

# ФОРМ-ФАКТОР РАДИОЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

## Часть 2

В первой части статьи были описаны этапы процесса корпусирования РЧ-компонентов, рассмотрены компоненты для различных видов монтажа печатных плат. Во второй части речь пойдет о вариантах форм-факторов и будет продолжен рассказ о РЧ-компонентах.

В статье сохранена сквозная нумерация рисунков и использованных источников литературы.

### ФОРМ-ФАКТОРЫ СВЧ ИС (CIRCUIT PACKAGE)

Ряд компаний предлагает на рынке корпуса для СВЧ-компонентов. Кроме ранее упомянутых компаний, в группу таких производителей входит российское предприятие АО «Завод «МАРС» — производитель металлокерамических корпусов, проходных изоляторов ([www.z-mars.ru/?category=101](http://www.z-mars.ru/?category=101)).

Разработчиками корпусов для СВЧ-компонентов являются компании:

- Century Seals ([www.centuryseals.com/index.cfm?ref=10410](http://www.centuryseals.com/index.cfm?ref=10410));
- Inseto ([www.inseto.co.uk/microelectronic-materials-egide-microelectronic-packages.php](http://www.inseto.co.uk/microelectronic-materials-egide-microelectronic-packages.php)).

### Однокристалльные компоненты SCP

Однокристалльные компоненты SCP, называемые также одночиповыми корпусами, однокристалльными модулями, однокристалльными интегральными модулями, представляют собой корпусированный элемент, содержащий одно микроэлектронное устройство, с поддержкой его электрических, механических, температурных и химических характеристик.

Однокристалльные компоненты (*Single chip package*) — это основные ИС компоненты, которые устанавливаются на платы системного уровня во всех электронных системах [16]. Такая корпусированная ИС может содержать миллионы транзисторов или ряд интегральных схем. ИС изготовлены из пластмассы для получения низкой стоимости или выполняются с применением керамики для достижения высоких тепловых характеристик и надежности.

Современная тенденция к миниатюризации компонентов и реализации портативных устройств электронных систем приводит к тому, что однокристалльные модули устанавливаются в корпуса, в которых для создания соединения может

использоваться любая часть площади поверхности микросхемы, а не только по внешнему периметру (*Area Array Packaging*). К ним относятся ИС с массивом шариков на нижней стороне подложки BGA (*Ball Grid Array*) или корпуса с размерами кристалла CSP (*Chip Scale Package*).

### Компоненты в плоском корпусе FPAK

Компоненты в плоском корпусе FPAK (*Flat Pack*) представляет собой тип корпусирования, в котором выводы находятся в плоскости, параллельной поверхности крепления подложки. Наиболее употребляемые плоские корпуса варьируются от узкого с шириной 0,25 дюймов (6,35 мм) до длинного с шириной свыше 2 дюймов (50,8 мм). Корпуса изготавливаются размером до 4 кв. дюймов более чем с 350 выводами. Такие обычно прямоугольные или квадратные корпуса имеют толщину стенки 0,04 дюйма (1 мм) или больше.

Компоненты в плоском корпусе могут быть отнесены в одну из следующих групп:

- **Однокомпонентный (цельный) плоский корпус (*One-piece flatpack*)** — это тип плоского корпуса, в котором тело формируется из одного куска металла в процессе, называемом глубокой вытяжкой (*deep drawing*). В результате получается тело без пайки или швов. Толщина основания первоначально соответствует толщине сте-

нок, но может быть уменьшена путем шлифования после того, как тело сформировано.

- **В составном или многокомпонентном плоском корпусе (*Multi-piece flatpack*)** кольцевая рама (четыре стены) формируется путем глубокой вытяжки. Дно отдельно штампуется из плоского материала. Кольцевая рама и днище изготовлены из металла того же типа. Во время сборки днище и кольцевая рама соединяются вместе с использованием процесса пайки.

- **Специальный плоский корпус (*Special flatpack*)** может быть цельным или составным корпусом, который имеет одну или несколько специальных характеристик, например, таких как:

- расширенное днище;
- отсутствие днища;
- специальный соединитель (*Special connector*);
- волоконно-оптические порты (трубки) *Fiber optic ports (tubes)*;
- необычное формирование выводов (*Unusual lead forming*);
- различный материал для изготовления рамки кольца и днища.

Компоненты и интегральные схемы в плоском корпусе FPAK размещаются в корпусах различного размера с выводами на двух или четырех сторонах (рис. 11) В этих корпусах применяются выводы типа «крыло чайки» (*Gullwing*



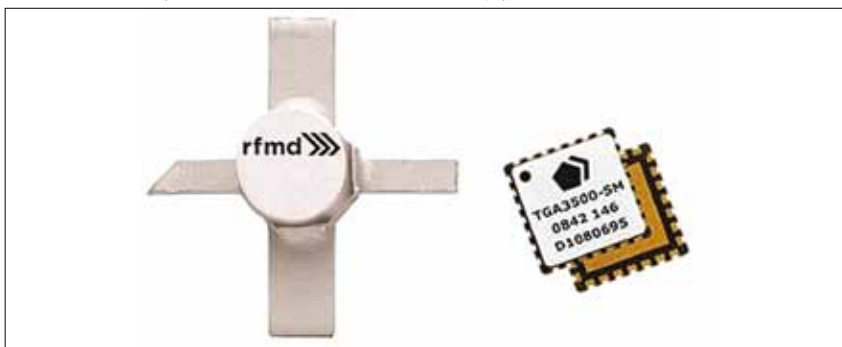
▲ Рис. 11. Компоненты в плоском корпусе FPAK

Leads) или плоские выводы, установленные со стандартными интервалами. Следует упомянуть широко распространенные у РЧ-компонентов квадратные плоские безвыводные корпуса QFN (Quad Flat No Leads), у которых выводы загнуты под корпус, что уменьшает площадь, занимаемую компонентом на плате. Корпуса с расстоянием между выводами (шагом) меньше 50 мил (1,27 мм) принято относить к компонентам с мелким шагом (Fine Pitch Packages).

Компоненты в плоском корпусе имеют очень хорошие тепловые и электрические характеристики. Компоненты доступны в корпусах типа «полость сверху» (cavity-up), где кристалл монтируется со стороны выводов — на «дне» корпуса, и в корпусах типа «полость снизу» (cavity-down) (рис. 12). Корпус второго типа, в котором кристалл размещается со стороны, противоположной стороне выводов, то есть на его верхней части, отличается от традиционного корпуса «полость сверху» улучшенными тепловыми характеристиками и устойчивостью к изгибу печатной платы. Плоские корпуса компонентов обычно являются керамическими, герметичными и монтируемыми на поверхности.



▲ Рис. 12. Выпускаемые компанией АМТЕК ЕРС плоские корпуса FPAK для СВЧ-компонентов



▲ Рис. 13. Примеры РЧ-компонентов в керамических корпусах

### Керамические корпуса (Ceramic)

В РЧ-компонентах с использованием керамических корпусов (рис. 13) обеспечивается эффективная защита кристаллов интегральных микросхем от влияния внешней среды, отведения тепла от кристалла, имеются надежные электрические связи между кристаллом и выводами, что позволяет гарантировать надежность и долговечность аппаратуры. Керамические корпуса предназначены для использования в составе гражданской и военной техники различного назначения.

Корпуса типа **керамический безвыводной кристаллоноситель CLCC** (Ceramic Leadless Chip Carrier) — эффективная альтернатива монтируемым на поверхность SMD-корпусам (Surface Mounted Device), которые широко используются в промышленности, однако обладают неудовлетворительными частотными характеристиками. К преимуществам корпусов CLCC относится

возможность работы в широком частотном диапазоне, малый габаритный размер, пригодность для автоматического поверхностного монтажа, относительно низкая стоимость.

В России используются корпуса, соответствующие зарубежным прототипам — керамическим корпусам типа CLCC (QFN) для поверхностного монтажа LC3, LC3B, LC3C, LC4, LC4B, LC5.

На рис. 14 приведен ряд моделей керамических корпусов.

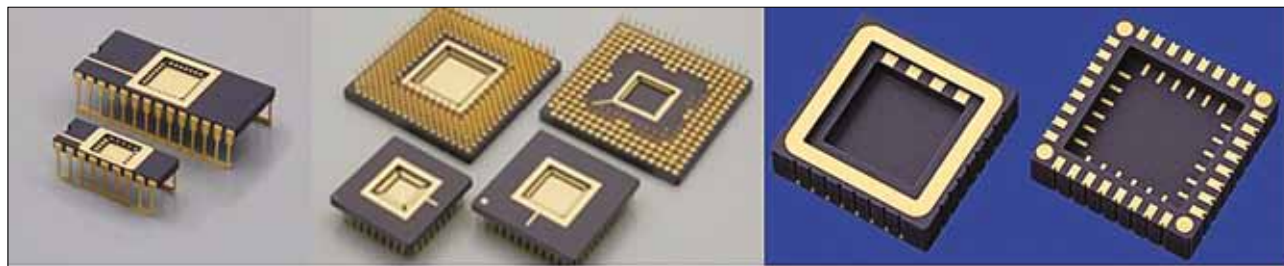
Наиболее популярные модели керамических корпусов:

- LCC (Leadless Chip Carrier) — корпус (кристаллоноситель) с выводами и без выводов;
- LCC (Ceramic Leadless Chip Carrier) — безвыводной керамический кристаллоноситель;
- CLCC (Ceramic Leaded Chip Carrier, Gullwing Leads) — с выводами типа «крыло чайки»;

- CLCC (Ceramic Leaded Chip Carrier, J formed Leads) — с J-образными выводами;
- LDCC (Leaded Chip Carrier) — керамический кристаллоноситель с выводами;
- PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) — пластиковый LCC с выводами.

### Корпуса на основе керамики с низкой температурой обжига LTCC

Дальнейшее развитие многослойная керамика получила с внедрением технологии керамики с **низкой температурой обжига LTCC** (Low Temperature Cofired Ceramics), когда керамику начали смешивать со специальными стеклами [17, 18]. Температура обжига керамики снизилась до +850 °С, что привело к существенному упрощению производственного процесса. В настоящее время к технологии LTCC относят керамику, обжигаемую при температурах ниже +1000 °С.



▲ Рис. 14. Керамические корпуса CDIP (Ceramic Dual Inline Packages), CPGA (Ceramic Pin Grid Array) и C-SMD (Ceramic Surface Mount Device)

Низкие потери СВЧ и относительно невысокая стоимость производства являются ключевыми преимуществами ЛТСС-технологии для ВЧ- и СВЧ-приборов. По стоимости ЛТСС-технология приближается к технологии изготовления печатных плат на основе FR-4, а по своим диэлектрическим характеристикам низкотемпературная керамика сопоставима с аллюмооксидной керамикой.

Благодаря использованию толстопленочной технологии такие ЛТСС ИС отличаются низкой себестоимостью, что представляет значительный интерес с точки зрения массового производства СВЧ-устройств для телекоммуникационных систем различного назначения.

**Высокотемпературные отожженные керамические корпуса НТСС**

Отличие высокотемпературной керамики НТСС (*High Temperature Cofired Ceramics*) от низкотемпературной заключается в более высокой температуре спекания слоев керамических плат для корпусов, достигающей +1500...+1600 °С.

Высокотемпературные отожженные керамические корпуса (НТСС) представляют собой многослойную, герметичную и высоконадежную упаковку, созданную с использованием слоев керамической ленты толщиной 5–25 мм, которые прокатаны вместе. Слои ленточных керамических корпусов, состоящие из 92% керамики из оксида алюминия, вольфрама и полимарганца, имеют металлизированные рисунки [19].

Основные процессы и этапы производства многослойных металлокерамических корпусов на основе технологии НТСС кратко рассмотрены в [17]:

1. Основной материал при производстве плат по технологии НТСС — сырой керамический лист: из глинозема  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$  и других компонентов получают керамическую массу, которую разбавляют толуолом и получают шликер. Из шликера льется керамическая лента.

2. В сырых керамических листах (каждый из которых впоследствии станет слоем керамической платы) выполняются переходные и выравнивающие отверстия и пустоты.
3. Отверстия в керамических листах заполняются или покрываются вольфрамовой пастой для обеспечения электрических соединений.
4. С помощью трафаретной печати в каждом слое формируются проводники, различные площадки, маркировка и т. д., которые наносятся вольфрамовой пастой на поверхность керамических листов с последующей сушкой и отверждением в печи.
5. Каждый керамический лист с нанесенным рисунком и металлизированными отверстиями совмещается и укладывается в стек в последовательности, определенной при проектировании.
6. Проводят вырубку по габариту для отделения плат от общей массы. Поверхности шлифуют.
7. Выполняют спекание керамики и вольфрамовой металлизации при температуре +1500...+1600 °С.
8. Для лучшего смачивания припоя перед пайкой все металлические и металлизированные поверхности покрывают никелем.
9. Выводные рамки корпусов, коваровые ободки и теплоотводы к металлическим контактными площадкам припаяют при помощи серебро-медного эвтектического расплава (или чистым серебром) при температуре +800...+1000 °С.
10. Все открытые металлические и металлизированные поверхности корпуса покрывают металлом (зачастую золотом с подслоем никеля) электролитическим или электролизным методом для защиты от воздействия окружающей среды.

Описанные выше этапы производства представляют собой типовой технологический процесс и в каждом конкретном случае могут уточняться или исключаться.

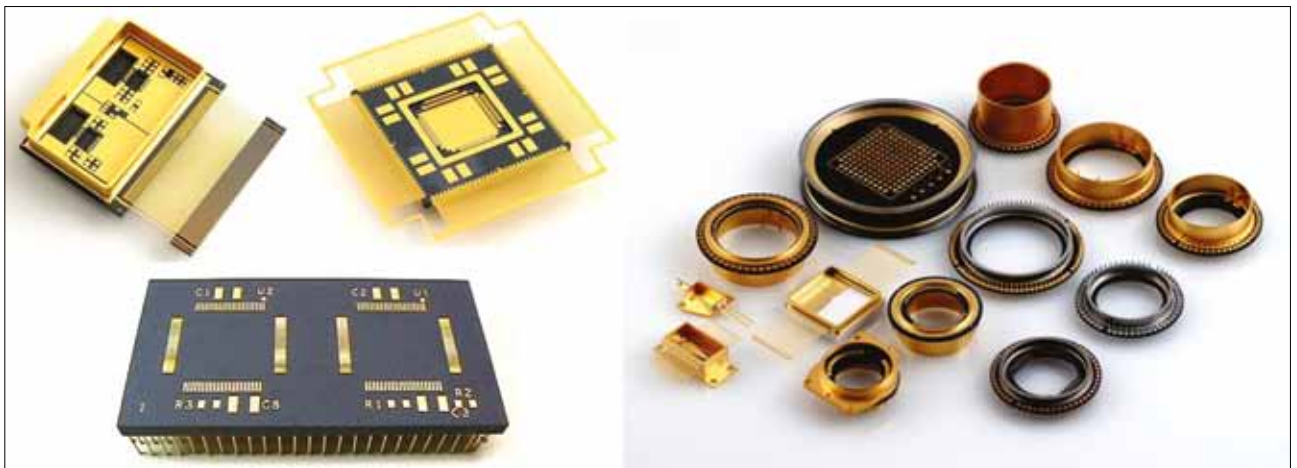
Достоинства технологии НТСС [17, 19]:

- малые допуски на размеры — благодаря низкому коэффициенту теплового расширения обеспечивается повышенная стабильность размеров корпусов;
- коэффициент теплового расширения (КТР) высокотемпературной керамики достаточно близок к КТР кремния, что позволяет монтировать кристаллы непосредственно на керамическое основание;
- высокие диэлектрические и тепловые характеристики корпусов: в зависимости от используемой марки керамики электрическая прочность варьируется в пределах 45–60 кВ/мм, тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) — 0,006–0,0021, а диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) — 8,5–10 в гигагерцевом диапазоне частот;
- возможность создания многослойных герметичных керамических плат: высокотемпературная керамика имеет плотную структуру, а после спекания многослойные керамические модули становятся монолитными; хорошее заполнение переходных отверстий и линий металлизации в плате вольфрамовой пастой;
- высокая твердость используемых керамических материалов.

Показанные на рис. 15 **металлокерамические цоколи** используются в микрокриогенной технике, в составе вакуумных криостатируемых корпусов, что необходимо для охлаждения чувствительных элементов в различных системах. Система позволяет производить охлаждение матриц всего спектрального ИК-диапазона.

**Радиационно-защитные корпуса**

Для локальной защиты кристаллов ИМС от воздействия ионизирующего излучения КП по дозовым эффектам существует ряд технических решений: специализированные корпуса ИМС



▲ Рис. 15. Изделия высокотемпературной керамики для корпусирования СВЧ-компонентов, выпускаемые компанией АМТЕК ЕСР [19]

(WALOPACK, RAD-PAK), покрытия и локальная защита ИМС в составе аппаратуры космических аппаратов [11]. Эти решения предназначены для повышения радиационной стойкости коммерческих микросхем либо микросхем с уникальными функциональными характеристиками, радиационно стойкие аналоги которых отсутствуют.

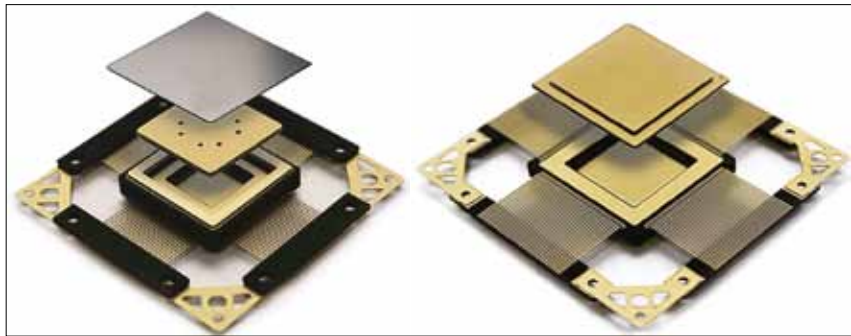
В российской компании «ТЕСТПРИБОР» [11] разработано два варианта специализированных металлокерамических корпусов с интегрированными радиационно-защитными экранами (РЗЭ): 4247.100-2 и 4248.144-2 (рис. 16). Их основное различие состоит в способе герметизации подкорпусного пространства. В первом корпусе металлическая крышка с Т-образным профилем соединяется с корпусом методом шовно-роликовой сварки, а защитный экран размещается под ней; во втором — защитный экран припаивается к корпусу и также служит крышкой. Оба корпуса имеют нижние защитные экраны, которые одновременно являются монтажными площадками для посадки кристаллов ИМС.

Бортовая радиоэлектронная аппаратура космических аппаратов в условиях воздействия ионизирующего излучения должна обеспечивать срок активного существования космических аппаратов в течение 10–15 лет, что может быть достигнуто при условии использования радиационно стойкой элементной базы. Разработанные в АО «ТЕСТПРИБОР» специализированные радиационно-защитные экраны (РЗЭ) локальной защиты блоков, узлов и электронных модулей бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов позволяют в значительной степени снизить суммарную накопленную дозу от воздействия электронов и протонов (рис. 17). Это позволяет использовать в космических аппаратах электронные компоненты коммерческого уровня качества, имеющие цену на 1–2 порядка ниже, чем на радиационно стойкую.

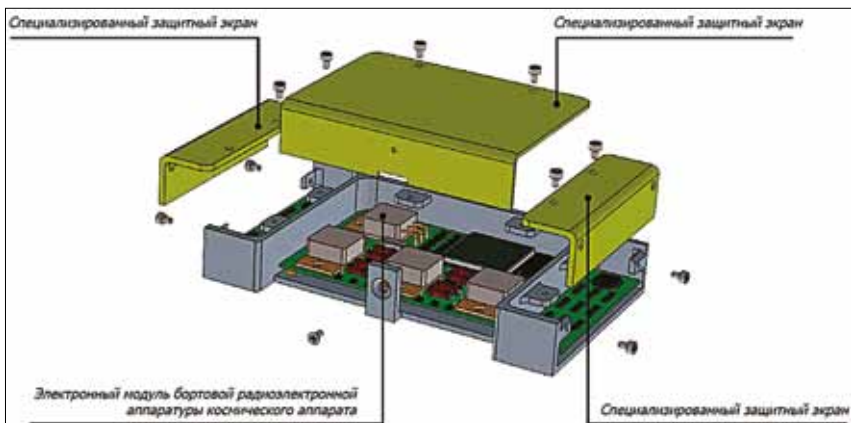
### Некорпусированные компоненты (Die)

Ведущие компании — разработчики и производители микроэлектронного оборудования, зачастую предлагают серии своих изделий в форм-факторах от отдельных некорпусированных кристаллов до микросхем высокой степени интеграции и корпусированных модулей. Некорпусированный кристалл или компонент (Die) требует при установке в изделие минимального пространства, что позволяет предельно уменьшить размеры конечного изделия [21].

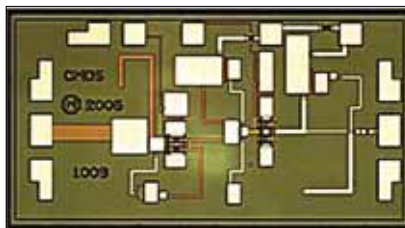
В настоящее время применение некорпусированных полупроводниковых при-



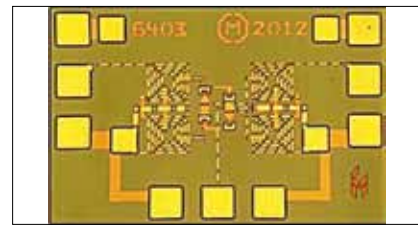
▲ Рис. 16. Специализированные планарные металлокерамические корпуса с интегрированными радиационно-защитными экранами 100-выводной 4247.100-2 и 144-выводной 4248.144-2



▲ Рис. 17. Конструктивная защита РЭА от электронного и протонного излучения космического пространства [20]



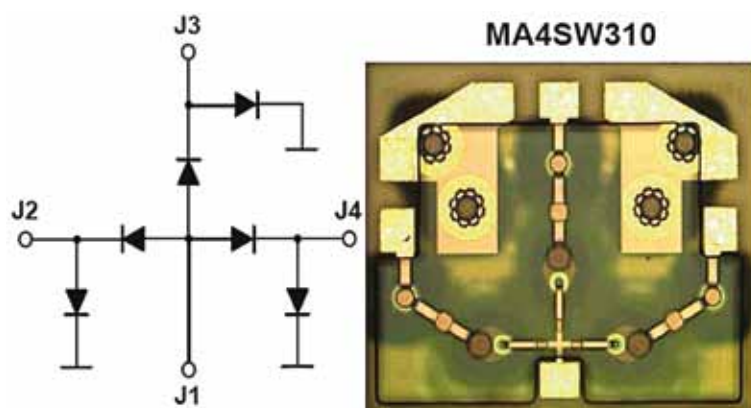
▲ Рис. 18. Некорпусированная СВЧ ИС активного удвоителя частоты диапазона 24–36 ГГц (К-, Ka-, Q-диапазоны). Модель CMD214 компании Custom MMIC



▲ Рис. 19. Некорпусированная GaAs СВЧ ИС широкополосного двойного балансного смесителя 16–26 ГГц CMD179 компании Custom MMIC

боров в технологии печатного монтажа достаточно широко распространено при изготовлении многокристальных модулей (МКМ). В качестве примера на рис. 18–20 показан внешний вид ряда некорпусированных компонентов.

Некорпусированный СВЧ широкополосный активный GaAs удвоитель частоты CMD214 компании Custom MMIC (рис. 18) предназначен для применения в диапазоне 24–36 ГГц. При использовании входного сигнала  $f_0$  с уровнем



▲ Рис. 20. Некорпусированная микросхема PIN-диодного SP3T переключателя MA4SW310 от компании MACOM

+13 дБм умножитель обеспечивает выходную мощность +17 дБм. На частоте 26 ГГц подавление  $f_0$  и  $3f_0$  составляет более 32 дБн и 25 дБн соответственно.

Двойной балансный GaAs-смеситель общего назначения **СМД179** (рис. 19) можно использовать для преобразования частоты с повышением и понижением в диапазоне 16–26 ГГц. Некорпусированный смеситель, который обеспечивает потери преобразования 7 дБ, развязку гетеродин-РЧ более 40 дБ, ширину полосы ПЧ 8 ГГц и точку пересечения по входу IP3, равную +18 дБм, идеально подходит для использования в гибридных сборках, учитывая его небольшой размер 0,9 кв. мм.

Выпускаемая компанией **MACOM** некорпусированная микросхема **МА4SW310** (рис. 20) — это последовательный шунтирующий широкополосный PIN-диодный SP3T-переключатель. Благодаря применению новой технологии и небольшому расстоянию между элементами схемы реализован РЧ-компонент с низкими вносимыми потерями и высокой развязкой (изоляция) на частотах до 26,5 ГГц.

#### МАЛЫЙ ФОРМ-ФАКТОР SFF

Достаточно часто в описаниях РЧ-компонентов встречается термин «маленький форм-фактор» **SFF** (*Small Form Factor*) и его варианты: **smallest form factor**, **ultra-small form factor**, **industries smallest and lightest form factor**, **compact form factor**. Как правило, за этими терминами стоят только характеристики размера РЧ-компонента, его массогабаритные параметры, а сам термин используется лишь для обозначения **маленького размера** компонента. Однако с SFF-стандартом текущая ситуация становится более сложной.

С понятием малого **форм-фактора SFF** в настоящее время связывают реализацию необходимого изделия с максимальным использованием серийно выпускаемых коммерчески доступных компонентов и плат [22].

Постоянное развитие РЧ-схемотехники и технологий вызвало переход от транзисторов к интегральным схемам (ИС). Затем ИС эволюционировали в системы на кристалле SoC (*Systems on Chip*). Больше не нужно покупать несколько ИС и дискретных компонентов, размещать их на плате и соединять друг с другом. Теперь можно приобрести компоненты уровня SoC и просто подключиться к ним через набор стандартизированных электронных соединений на стандартизированном модуле или промежуточной плате (*midplanes*). Продолжая эволюционный путь, концепция SoC развивается далее в компо-

ненте «система на модуле» SoM (*System on Module*), предлагая компоненты еще более высокой степени интеграции, такие как РЧ-часть, сетевые компоненты, память и источники питания. Это делает SoM практически полной системой, размещаемой в отдельном корпусе. В результате системы становятся компактнее, выделяют меньшее количество тепла, обладают хорошей функциональностью; имеют возможности, преимущественно ограниченные плотностью размещения соединителей и допустимыми температурными режимами устройства.

У инженера есть дилемма выбора наилучшей технологии, которая будет применяться при проектировании качественных изделий формата SFF. Традиционно разработчики могут выбирать или отдельные готовые РЧ-компоненты, или же целые модули, платы и делать все возможное, чтобы адаптировать их к своим требованиям. Множество доступных технологий и компонентов может послужить причиной неудачной разработки, потому что неправильный выбор, сделанный в начале проекта, способен позднее привести к печальному результату.

Обычно при изготовлении готовых плат разработчики СВЧ-оборудования стараются придерживаться принятых надежных коммерческих стандартов, например, VME, VPX, cPCI, часто используемых в системах, ориентированных на авиационно-космические и оборонные рынки. С развитием технологий на основе модулей и почти повсеместным внедрением SoC-компонентов теперь конечные пользователи могут при меньших затратах получать более качественные решения, которые точно отвечают их потребностям. Этот факт относится ко многим отраслям, включая военные и авиакосмические системы (MIL/Aero), медицину, тяжелую промышленность, транспорт и автомобильные рынки.

Общепризнанные отраслевые стандарты заставляют рынок производить гармонизированные и совместимые продукты. Уделяя повышенное внимание стандартизации, ведущие производители компонентов и модулей создают объединения, чтобы инженеры могли проектировать специализированные платы, объединительные платы (*backplanes*) или промежуточные платы, поддерживающие множество приемлемых стандартных расширений. Такой подход позволяет специалисту по проектированию и интеграции выбирать необходимые варианты из широкого спектра поставщиков и предложений. Таким образом, снижается его личный риск, накладные расходы и время выхода на рынок.

Органы по стандартизации во всех важнейших секторах рынка наращивают темпы разработки нормативных документов, которые непосредственно влияют на рынок SFF. В качестве таких стандартов можно назвать:

- стандарты **COM Express**, опубликованные PCI Группой производителей промышленных компьютеров (Industrial Computer Manufacturers Group, PICMG);
- стандарт **SMARC** (Smart Mobility Architecture), опубликованный Группой стандартизации встраиваемых технологий (SGET, Standardization Group for Embedded Technologies);
- стандарт **MiniPCIe** (Mini PCI Express), опубликованный Специальной группой по межсоединениям периферийных компонентов (PCI-SIG, Peripheral Component Interconnect Special Interest Group);
- стандарт **mSATA** (Mini-SATA) Международной организации Serial ATA (SATA-IO, Serial ATA International Organization).

Примерами основных стандартов, применение которых ранее рассматривалось главным образом на промышленном и коммерческом рынках, являются **COM Express PICMG, MiniPCIe PCI-SIG и SMARC-модули SGeT**.

Параллельно традиционные разработчики стандартов для типично консервативных авиационных и военных применений, в частности ассоциация ANSI/VITA (*American National Standards Institute u VITA Standards Organization*), в этой ситуации проявляет активность [23]. Несмотря на то что ANSI/VITA выпускает стандарты с меньшей скоростью, чем их промышленные родственники, она начинает использовать традиционные коммерческие и промышленные стандарты. Завершается работа над новым стандартом, специально предназначенным для надежного рынка малого форм-фактора SFF. Этот новый стандарт называется **VITA 74**, он также известен как **VNX** и одобрен ассоциацией VITA, проходит этап публикации ANSI и будет представлен как **стандарт ANSI/VITA 74** или **AV74**.

Стандарт VNX (VITA 74) предназначен для высокопроизводительных малогабаритных систем с жесткими требованиями по SWaP-C (Size, Weight and Power and Cost).

Версия стандарта VITA 74.0 касается базовой конструкции и функциональности модуля, а также других «точечных стандартов» для особых случаев использования, таких как **SpaceVNX** (VITA 74.4) для CubeSAT, **VNX с оптической платой**

(VITA 74.5) и **VNX с объединительной платой RF** (VITA 74.6) и т.д.

Популярность SFF-модулей выросла в связи с быстрым распространением компьютерных технологий в автомобильной, медицинской и биотехнологической отрасли. Эти новые рынки позволяют резко снизить цены на модульные платы. Разрабатываются новые промышленные модули, которые достаточно дешевы для своего предполагаемого рынка и в то же время достаточно прочны для использования в изделиях MIL/Aero. С их применением РС-система может фактически стать дешевле при уменьшении физического размера.

Компонентные решения типа «система на модуле» (SoM), основанные на отраслевых стандартах, сейчас появляются на рынке SFF-изделий для военных и авиационных проектов. Теперь инженерам выгоднее разрабатывать полужаказные соединительные платы (*midplanes*) или несущие платы, чтобы поддерживать стандартные компоненты и объединить максимальное число функциональных возможностей, которые являются подходящими по рабочим температурам — термически практичными, с минимальным риском отклонений от графика разработки. Более того, эти модули на основе коммерческих и промышленных стандартов могут быть размещены на платах на основе MIL-стандарта, таких как XMC, VPX и VNX.

Некоммерческая организация VITA объединяет производителей, интеграторов, поставщиков и пользователей, имеющих общий рыночный интерес к модульным встроенным вычислительным системам реального времени. Они вносят основной вклад во многие надежные стандарты, используемые сегодня, такие как PMC, XMC и OpenVPX. После того как стандарт VPX был окончательно создан, следующей целью для VITA стало создание среды, где игроки могли бы продолжать естественное движение к стандартам малого форм-фактора SFF, используя инновационные концеп-

ции, сделавшие успешным VPX. В то же время это позволяет внедрять передовые коммерческие технологии SoM и параллельно рассчитывать на еще более высокие скорости и интерфейсы шины данных PCIe. Стандарт по своей сути позволяет использовать другие успешные стандарты для объединительной платы, внутрисистемного подключения, чтобы сократить риск разработки, стоимость и время выхода на рынок; с наиболее определяющей чувствительностью к SWaP-C. Результатом является создание **стандарта VITA 74**, также известного как **VNX**.

Коммерческий стандарт модулей VNX готовых коммерческих изделий **COTS (Commercial off the Shelf)** применяется для компонентов форм-фактора SFF с радиаторным охлаждением, надежных одноплатных компьютеров, сигнальных процессоров и модулей ввода/вывода, которые могут стать частью интегрированной системы. Используя принципы модульной архитектуры открытых систем **MOSA (Modular Open Systems Architecture)**, стандарт VNX предлагает основанный на существующих стандартах первый модульный подход к созданию систем SFF (рис. 21).

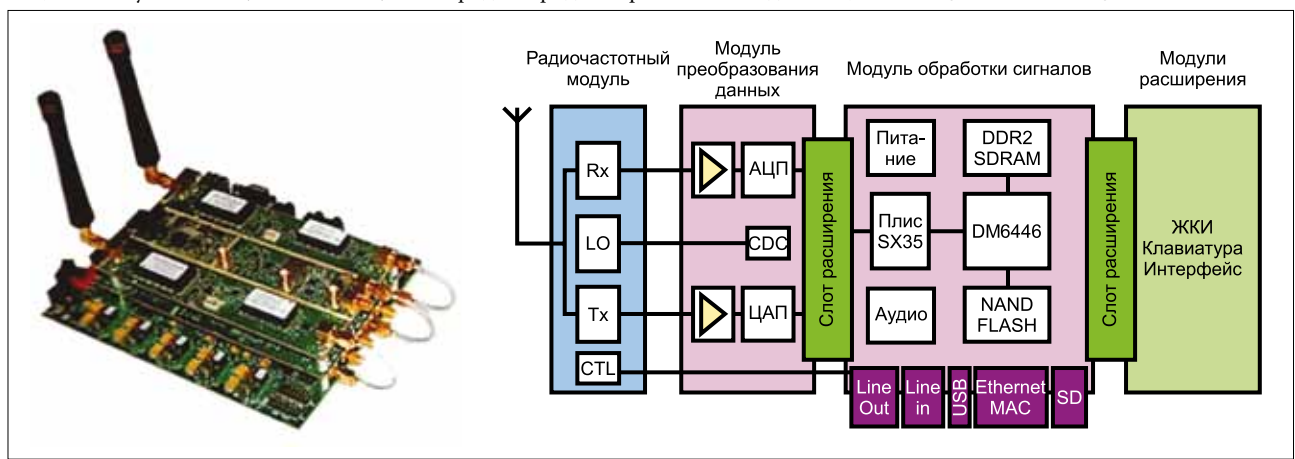
Для того чтобы минимизировать экономический, технический и плановый риски при работе над новым стандартом VNX SFF, компании-разработчики решили применить существующие проверенные технологии и накопленный опыт из максимально возможного количества стандартов. Подход VNX заключался в том, что описывает модуль не «изнутри», а «снаружи»: соединители, профили слотов, сигнализация перегрузки, размер модуля и основные детали охлаждения, предлагая гибкость внутри модулей конструкторам. Это позволяет инженерам интегрировать коммерчески доступные компоненты форматов **COM** и **SoM** в предварительно определенный надежный модуль. Такой модуль по определению должен поддерживать среды с радиаторным охлаждением,

обычно используемые в системах, соответствующих стандартам Mil-STD-810 и VITA 47, включая повышенные рабочие температуры, сильные удары и вибрацию. Проще говоря, подобные изделия можно рассматривать как стандартные модули большой степени интеграции, построенные на стандартных модулях меньшей степени интеграции; что приводит к быстрому выходу на рынок систем с ограниченными или нулевыми единовременными затратами на проектирование **NRE (Non Recurring Engineering)**, независимо от того, насколько уникальны требования к характеристикам компонента.

Подводя итог, можно отметить, что если инженер в полной мере использует преимущества стандартных модулей, плат и систем, неудачи при проектировании должны исчезнуть. Еще более важным фактом является растущая доступность высококвалифицированных поставщиков, предлагающих готовые компоненты малого форм-фактора SFF во многих вариантах для поддержки даже самых уникальных требований; многообещающее максимальное сохранение SWaP с минимальными затратами NRE, что приводит к экономически эффективному оптимальному решению.



▲ **Рис. 21.** Концепция выполнения компонентов с использованием форм-фактора SFF стандарта VITA 74 (VNX) для рынка MIL/Aero [22]



▲ **Рис. 22.** Вид платформы SDR формата FFM фирмы Lyrtech и структурная схема платформы SDR формата FFM фирмы Lyrtech [24]

Особый интерес к модулям формата SFF возник в процессе развития программируемого **радиооборудования SDR**, особенно в последнее время, в связи с построением **когнитивных систем** [24].

Многодиапазонный и многостандартный радиоинтерфейс SDR-оборудования может быть наилучшим образом реализован при использовании модульного принципа построения системы. Такой выбор, во-первых, связан со сложившимся техническим менталитетом инженерно-научных кадров мира, поэтому сегодня модульная архитектура представляется наиболее очевидным этапом дальнейшего развития систем SDR. В статье [24] рассказано об элементной базе, оптимальной для разработки устройств архитектуры SDR.

Основными компонентами, без которых трудно обойтись при реализации SDR, являются программируемые логические микросхемы ПЛИС (FPGA) и цифровые сигнальные процессоры DSP для обработки цифровых сигналов. Эти компоненты широко распространены и имеют невысокую стоимость, а потому при грамотном и тщательном проектировании можно получить недорогое универсальное многостандартное радио на базе архитектуры SDR.

Для систем, получивших название **SFF (Small Form-Factor)**, характерны высокие требования к производительности подсистемы цифровой обработки сиг-

налов и высокая сложность алгоритмов. Использование связки DSP + FPGA позволяет применять традиционный подход к проектированию, снизить стоимость системы и время разработки.

Примером такой SFF-платформы служит система с модульной архитектурой построения фирмы Lyrtech (рис. 22), реализованная на базе цифрового сигнального процессора компании Texas Instruments и Xilinx ПЛИС [24]. Внешний вид системы указывает на то, что она выполнена по модульной архитектуре. Платформа содержит радиочастотный модуль, модуль преобразования данных, модуль цифровой обработки сигналов и необязательные дополнительные модули расширения.

Набор SFF-компонентов можно использовать для создания одно- или многостандартных радиосистем для военных и коммерческих приложений. Для военных целей такие платформы находят применение в тактических системах связи, коммуникационных шлюзах, ретрансляционных радиостанциях и автомобильных станциях связи. Коммерческий сектор внедрения платформы SDR SFF уже сейчас представлен устройствами чтения меток бесконтактной радиочастотной идентификации RFID, абонентским оборудованием мобильной связи — примерами могут служить любые широкополосные беспроводные системы данных, а также базовые станции мини- и микро-

формата. Вообще же области применения систем SFF SDR поистине безграничны, на основе данных платформ можно создать практически любую радиосистему, которая наилучшим образом будет удовлетворять заданным требованиям.

Большое преимущество SFF SDR состоит в том, что она может быть использована для быстрого **прототипирования** и проверки различных вариантов платформ и их конфигураций. Есть еще одно важное достоинство — эта платформа интегрируется с инструментами на базе моделей Simulink, благодаря чему разработчики имеют возможность использовать системы C/HDL или MATLAB Simulink для быстрой проверки концепции опытной системы и оптимизации ее параметров с целью обеспечения минимальной стоимости и других характеристик [24]

### КОАКСИАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

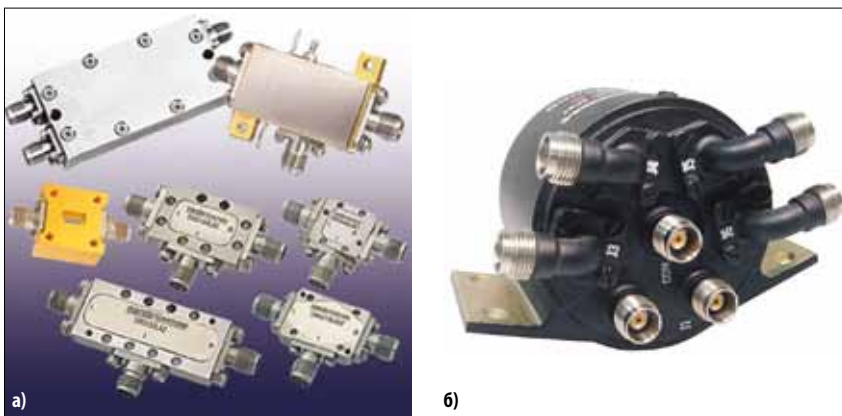
Коаксиальные компоненты, компоненты для кабельного подключения, компоненты с соединителями (разъемами), подсоединяемые (подключаемые) (*Connectorized, Module with Connector, Coaxial*) подключаются с помощью коаксиальных или другого типа соединителей (разъемов).

В качестве примера данного формата на рис. 23 приведен активный смеситель **MixNV** компании **Windfreak Technologies**, оснащенный встроенным ФАПЧ-синтезатором и предназначенный для использования в диапазоне 1 МГц — 6 ГГц. Устройство управляется и получает напряжение питания через USB-соединитель от компьютера. Смеситель имеет встроенную энергонезависимую память, поэтому его можно запрограммировать для самостоятельной установки и поддержки любой частоты гетеродина, ЧМ-модуляции или других параметров. Это позволяет конечному пользователю поместить его в коробку или стойку без необходимости управления ПК. Смеситель доступен в оснащенных коаксиальными соединителями модуле, имеющем размер 6,35×3,5×1,9 см, и оптимален для программно-определяемого радиооборудования SDR, радаров, преобразователей частоты с повышением и понижением.

Компания **L3 Narda-MITEQ** производит и предлагает на рынке одну из самых обширных линеек РЧ-смесителей (рис. 24а). В стандартном каталоге более моделей 400 смесителей с частотами до 50 ГГц. Продукты представлены в различных вариантах корпусирования как в недорогих коммерческих, так и в высоконадежных герметизированных смесителях, в том числе и в коаксиальном исполнении. Компания L3 Narda-MITEQ может предложить также индивидуаль-



▲ Рис. 23. Активные смесители серии MixNV компании Windfreak Technologies



▲ Рис. 24. Различные модели смесителей компании L3 Narda-MITEQ в коаксиальном исполнении и коаксиальный SP6T-ключ модели CS18T16-12, производимый компанией Teledyne Microwave

ные решения, отвечающие конкретным требованиям заказчика.

В качестве еще одного примера форм-фактора коаксиального РЧ-компонента на рис. 246 показан коаксиальный РЧ SP6T-ключ модели CS18T16–12, изготовленный компанией Teledyne Microwave.

### РЧ-КОМПОНЕНТЫ В ПРОХОДНОМ (IN-LINE) КОНСТРУКТИВНОМ ИСПОЛНЕНИИ

РЧ-компоненты с использованием проходного (in-line) форм-фактора для выполнения своей функции включаются в разрыв коаксиальной или волноводной линии передачи.

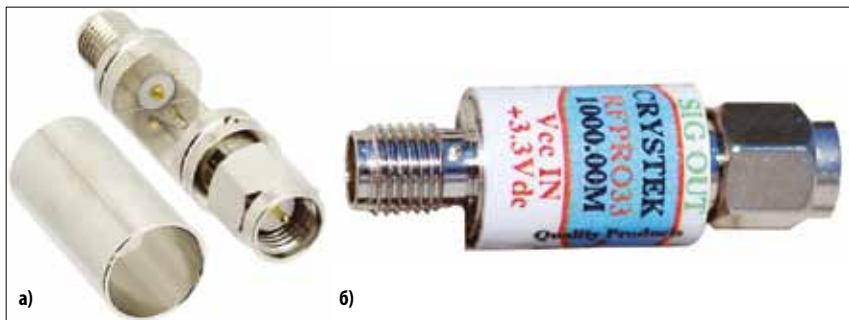
В таком конструктиве выпускаются РЧ-усилители различного рода, устройства защиты РЧ-трактов, детекторы, аттенюаторы, переключатели и многочисленные варианты адаптеров (переходников) типа «волновод-коаксиал» (Waveguide to Coax Adapter, WCA). По сути дела, компоненты в проходном исполнении, оказываются встроенными в линию передачи и иногда называются соответственно — «встраиваемые компоненты».

Зачастую для удобной сборки и эксплуатации таких РЧ-компонентов в составе тестовых и лабораторных установок эти модели изготавливаются в прочных SMA-корпусах (SMA Housing) (рис. 25а). На рис. 25б показан генератор сигнала 1 ГГц RFPRO33–1000 компании Crystek в проходном исполнении с использованием такого корпуса.

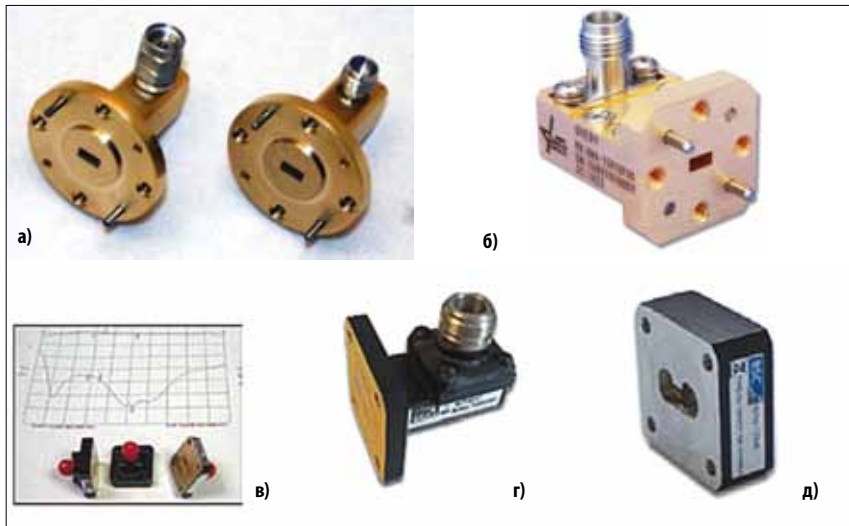
На рис. 26а показан волноводно-коаксиальный адаптер (переходник) серии WCA компании Millitech, работающий до 110 ГГц. Подключение к адаптеру происходит с использованием соединителей 2,92; 2,4; 1,85 и 1,0 мм. В этом же диапазоне частот работает и адаптер QWA компании QuinStar (рис. 26б).

Компания BSC Filters, входящая в состав группы компаний SMP, является одним из ведущих мировых производителей СВЧ-фильтров и диплексеров в частотном диапазоне 300 кГц — 94 ГГц для коммерческого и военного применений. Продукция компании BSC Filters используется в аппаратуре телекоммуникаций, спутниковой связи, радиолокации, измерительной технике, аэрокосмической промышленности. Ряд изделий выпускается компанией в проходном исполнении (рис. 26в).

**Ультракороткие волноводно-коаксиальные переходы** компании BSC производятся для различных частотных диапазонов. Линейные размеры данных переходов такие же, как и у стандартных волноводных фланцев, однако они мень-



▲ Рис. 25. SMA корпус (1,5" SMA Housing) и генератор сигнала 1 ГГц RFPRO33-1000 компании Crystek в проходном исполнении с использованием такого корпуса



▲ Рис. 26. Волноводно-коаксиальные адаптеры серии WCA компании Millitech (а) и QWA компании QuinStar (б), РЧ-компоненты компании BSC в проходном исполнении (в, г, д)

ше по размерам, легче, проще в установке и дешевле, чем стандартные переходы. Материал: латунь или посеребренный алюминий.

Волноводные и **волноводно-коаксиальные переходы BSC** (рис. 26г) находят широкое применение в сфере телекоммуникаций и военной промышленности. Компания BSC представляет три типа переходов:

- 1) Обычные угловые переходы с размерами волноводов от WR 28 до WR 430.
- 2) Запатентованные ультракороткие переходы, обеспечивающие полное согласование на очень малой длине.
- 3) NANO-переходы — оптимальны для МШУ и других типов усилителей.

**Возбудители NANO** компании BSC представляют собой экономичное решение в применениях, требующих, чтобы в волноводном возбудителе отсутствовал коаксиальный переход (рис. 26 д), — это уменьшает вносимые потери или коэффициент шума. NANO позволяет соединить волновод с ближайшим СВЧ-модулем без дополнительного коаксиального перехода. Сопряженные элементы могут быть протестированы при помощи съемных коаксиальных соединителей. Низкая стоимость и революционный подход делают работу NANO сопоставимой со стандартными пере-

ходами. Потери на отражение: > 14 дБ во всей полосе. Материал: бронза или посеребренный алюминий.

### КОМПОНЕНТЫ БЕЗ ВНЕШНИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ. РЧ-ВСТАВКИ

Компоненты без внешних соединителей (*Drop-in, drop-in module*): РЧ-компоненты, которые не требуют обязательного использования соединителей, а могут подключаться к внешним цепям, например, распаяться непосредственно на месте установки или помещаться в специальный корпус. Корпус компонента может быть привинчен к экранирующей плоскости устройства (рис. 27).

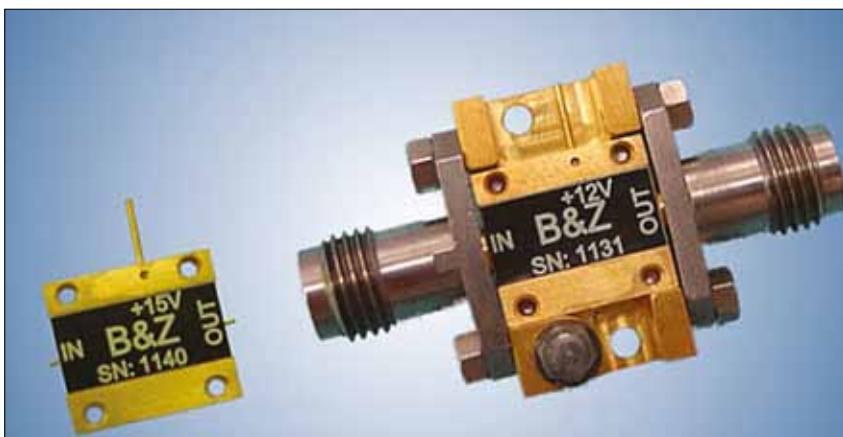
В отечественной литературе для обозначения таких компонентов нет закрепившегося русскоязычного эквивалента, поэтому используются термины: *drop-in-компонент*, конструктивный элемент, **РЧ-вставка**. Некоторые компании сразу позиционируют выпускаемые *drop-in*-компоненты как заменяющие вставки — *Drop-In Replacement*, предназначенные для легкой замены конкретных используемых компонентов при модернизации или улучшения характеристик оборудования.

Центральный проводник выводов компонента может быть соединен с ми-





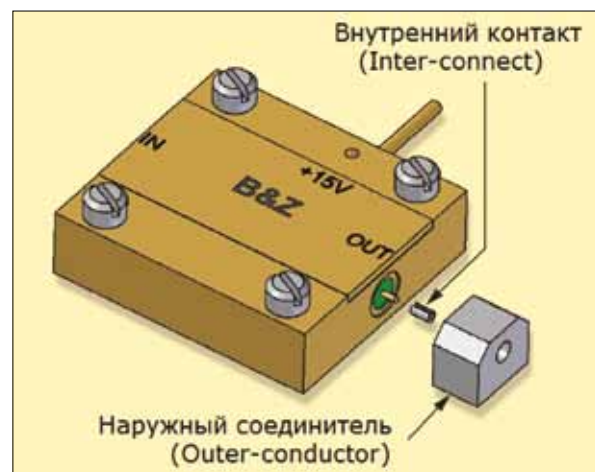
▲ Рис. 27. Примеры РЧ-компонентов в drop-in-исполнении



▲ Рис. 28. Выполнение усилителей в виде конструктивного элемента, то есть в Drop-in исполнении (слева), и вариант корпусирования с применением стандартных соединителей на входе и выходе, предлагаемый компанией B&Z Technologies



▲ Рис. 29. Внутренний контакт (interconnect) и наружный соединитель (outer conductor) корпуса Ultra Package



▲ Рис. 30. При использовании корпусов Ultra Package полностью смонтированный на общем шасси преобразователь с понижением частоты диапазона MMB имеет длину всего 63,5 мм (2,5 дюйма)

крошечной линией, внутренним контактом радиочастотного соединителя или выводами аналогичных компонентов. Электрическое соединение выводов компонента с необходимыми цепями и его корпусирование выполняется различными способами: пайкой (*solder*), прижимом (*clamp*) и обжимом с деформацией (*crimp*).

Например, РЧ-компоненты, выпускаемые компанией **B&Z Technologies**, устанавливаются в едином стандартном корпусе (рис. 28) [26]. В нем размещаются различные комбинации РЧ-вставок, отличающиеся по функциям, мощности, коэффициенту усиления и коэффициенту шума для диапазона 5 кГц — 60 ГГц.

Инженеры компании работают над созданием на одном стандартном подсистемном шасси (*subsystem chassis*) устройств и трактов с различными параметрами. При использовании компоновки и конструктивного оформления устройств компании **B&Z Technologies**, а также инновационного метода каскадирования этих устройств высокочастотные системы могут быть смонтированы с предсказуемыми характеристиками. Дополнительное достоинство этих методов — значительное уменьшение пульсаций частотных характеристик (*frequency response ripple*) без необходимости дополнительной изоляции между отдельными компонентами. Это следствие уменьшения электрической длины контактирования (*electrical length*) между элементами микроволновой схемы.

Для получения необходимых и предсказуемых характеристик отдельных компонентов следует использовать корпус, который имеет небольшие размеры, работает на частотах до 70 ГГц и может быть просто и надежно подключен к оборудованию для тестирования и получения характеристик устройства. Кроме того, корпусированное устройство должно надежно включаться в цепь компонен-

тов тракта обработки сигналов. При этом требуется исключить возможность утечки РЧ-сигналов, что могло бы привести к возникновению ряда нежелательных явлений, в частности паразитной генерации. Эти соображения наряду с необходимостью обеспечения надежного монтажа компонентов, РЧ-заземления, хорошего теплового рассеяния и простого метода подключения (connectorization) устройств имеют решающее значение при разработке специалистами стандартных корпусов для компонентов.

Одним из таких корпусов является *Ultra Package*, разработанный компанией B&Z Technologies (рис. 29). Этот корпус, действующий на частотах до 70 ГГц, имеет малые габариты — только  $10 \times 10 \times 2,54$  мм ( $0,4 \times 0,4 \times 0,1$ "), что обусловлено малыми размерами его коаксиального РЧ-вывода с диаметром контакта 0,23 мм (0,009"), дизайном микроволновой рабочей полости (*microwave cavity*) и особенностями крепления блока. Малые паразитные прохождения сигнала (*feed-throughs*) снижают возможность паразитного возбуждения.

Внешние подключения к корпусу могут выполняться очень просто, что позволяет получать точные параметры устройства. Кроме того, микроволновые полости корпуса спроектированы так, чтобы уменьшить любой волноводный эффект (*waveguide effect*). Рабочая полость корпуса позволяет устанавливать в ней дискретные устройства толщиной 0,1 мм, свойственной большинству вы-



▲ Рис. 31. Смесители компании Pulsar Microwave без внешних соединителей в drop-in-исполнении и принцип их установки на монтажную плату

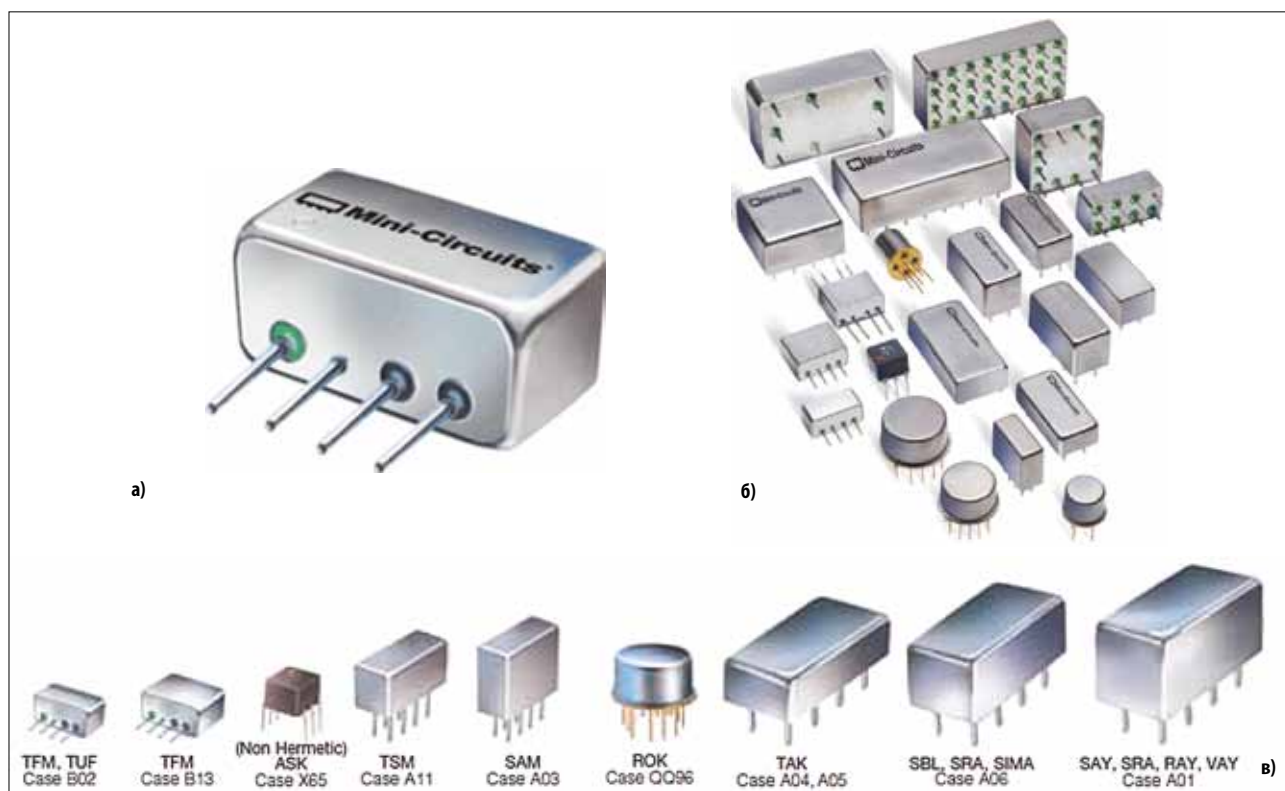
сокочастотных дискретных устройств и монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (ММИС). Такие корпуса используются с доступными ММИС- и РЧ-компонентами — ГУНами, усилителями, антеннооторами, смесителями, а также схемами, содержащими отдельные дискретные элементы.

**Метод каскадирования** этих типов корпусов прост, но эффективен [26]. Первым шагом процесса является корпусирование (упаковка) отдельного микроволнового компонента и оценка его параметров. Затем, начиная с одного конца РЧ-тракта, первое устройство укрепляется на своем месте общего подсистемного шасси (рис. 30). Далее на РЧ-штырьке (*RF pin*) первого устройства устанавливается внутреннее соединение — контакт «розетка-розетка» (*female-female interconnect*), к которому подсоединяется уже следующее устройство РЧ-тракта.

После этого поверх РЧ-штырька с уже установленным внутренним контактом размещается наружный соединитель

(*outer conductor*), служащий для электрического соединения внешних компонентов с корпусом. Наконец, на свое место устанавливается следующее устройство и проверяется, насколько надежно входной РЧ-штырек подключился к другому концу внутреннего контакта, уже находящегося на первом устройстве.

Для предотвращения нежелательных излучений два последовательно включенных компонента должны находиться под постоянным прижимом (*end-end pressure*), чтобы обеспечить хороший контакт наружного соединителя с корпусом компонента. Прижим обеспечивается и поддерживается с помощью кулачковых винтов (*cam-screws*), у которых головка эксцентрична по отношению к основному центру винта. Последующие компоненты могут каскадироваться шаг за шагом, аналогично предыдущим процедурам. Окончания РЧ-трактов могут быть выведены на зажимы с различными типами интерфейсов. РЧ-соединения выполняются с помощью стандартных коаксиаль-



▲ Рис. 32. Компоненты во вставном (Plug In) исполнении, предлагаемые компанией Mini-Circuits

ных 3,5-; 2,92- или 1,85-мм контактов. Конфигурации входов и выходов могут быть копланарными (*coplanar*), полосковыми (*strip line*) или микрополосковыми (*microstrip*) линиями передачи.

В качестве еще одного примера на рис. 31 показаны смесители компании **Pulsar Microwave** моделей MM-04-L и MV-07-S без внешних соединителей — в drop-in-исполнении, и принцип их установки непосредственно на монтажную плату

### ВСТАВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Вставные, подключаемые, втычные [27] или сменные компоненты, в англоязычной литературе обозначаемые термином **Plug In**, в отечественной литературе имеют иногда совсем уж простое название — «плагины» [28, 29]. Данный форм-фактор имеет достаточно размытые границы. Прежде всего, это действительно вставные блоки, в том числе и по USB-входам.

Анализ рынка РЧ-компонентов показывает, что в подавляющем большинстве к классу вставных компаний-производителей относят компоненты в различных вариантах корпусирования, предназначенные для монтажа в отверстия печатных плат ТНТ (рис. 32).

Компания **Mini-Circuits** предлагает широкий ассортимент вставных Plug-in компонентов в различных стилях корпусирования для монтажа в отверстия печатных плат. Подавляющее большинство этих продуктов экранировано, а для герметизации корпуса используется процесс лазерной сварки (*laser welding*). Эта



▲ Рис. 33. РЧ-синтезатор LNO-HP01M-P3U4HP220E компании Advantex



▲ Рис. 34. Серийный модуль приемопередатчика Bluetooth HC06 HC-06 во вставном исполнении

автоматизированная процедура обеспечивает более высокую надежность, чем герметизация пайкой (*solder sealing*) или точечная сварка (*spot welding*), а также снижает производственные затраты.

На рис. 33 показан РЧ-синтезатор LNO-HP01M-P3U4HP220E во вставном варианте корпусирования (*Plug-in Unit*), предлагаемый компанией **Advantex**.

В силу постоянной тенденции к миниатюризации в настоящее время с использованием вставного форм-фактора производятся уже целые тракты или РЧ-блоки. В качестве примера на рис. 34 представлен широко используемый модуль приемопередатчика **Bluetooth HC06 HC-06** во вставном исполнении, изготовленный компанией **ZTZ**.

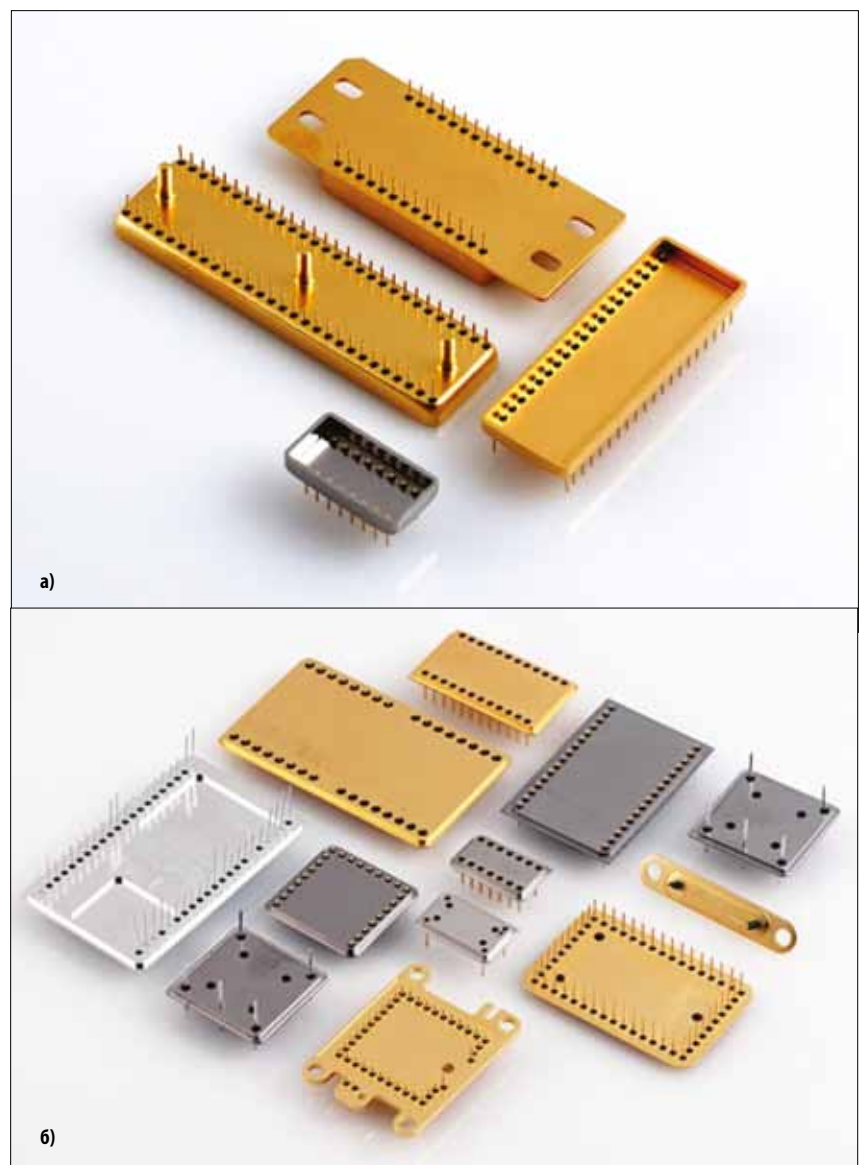
### Металлические плагины

Ряд производителей выделяют в отдельные группы металлические плагины или металлические вставные корпуса (*Metal Plug-ins*). Изготовителями металлических вставных корпусов являются

компания **AMETEK** [30], **Century Seals** [31], и **Inseto** [32].

Металлические плагины представляют собой герметичные корпуса с металлическим основанием и вертикальным расположением выводов для монтажа в отверстия печатной платы, которые выходят из нижней части корпуса (рис. 35). Такие корпуса вставного стиля (*Plug-in*) изготавливаются в двух основных вариантах, получивших названия «вставные ванны» **PB** (*Plug-in Bath Tub*) и «специальные вставки» **PS** (*Plug-in Specials*).

**Корпуса вставные типа корыта (ванны)** (*Plug-in Bath Tub packages*) — это готовые корпуса, полностью выкованные из плоской детали или необработанного металла, обычно из прецизионного сплава ковара (сплав 29 НК) или холоднокатаной стали калибра CRS (*Cold Rolled Steel*), и с расположением вводов-выводов, адаптированным к спецификациям заказчика. Данный тип оформления является наиболее экономичным, поскольку в нем для создания корпуса используется



▲ Рис. 35. Компоненты корпусов металлических плагинов (*Metal Plug-ins*) компании AMETEK

наименьшее число этапов изготовления, но имеет определенные ограничения.

**Специальные вставляемые корпуса**, или специальные плагин (Plug-in Special packages), также изготавливаются из плоских кусков сырья кузнечного плоского материала, но производятся с использованием двух отдельных процессов изготовления. Первый процесс — создание рамки (frame). Рамка формируется ковкой из кузнечного плоского материала или в процессе экструзии (выдавливания) и отрезается до нужной высоты.

Второй этап изготовления — создание базовой пластины (base plate). Это основание или дно может иметь различные формы, размеры и материалы. Некоторые базовые конфигурации содержат отверстия или прорезы для крепления на сопрягаемые поверхности, в то время как другие могут просто соответствовать требуемой точной конфигурации. Затем два компонента соединяются вместе с использованием различных сплавов, таких как медь, медь/серебро или низкотемпературные золотосодержащие сплавы — золото/олово или золото/германий. Достоинствами двухкомпонентной конструкции Plug-in Special являются расширенные возможности монтажа и более ровные поверхности корпусов РЧ-изделий.

Оба варианта корпусов предназначены для производства больших объемов изделий. Вертикальные конфигурации их выводов позволяют легко организовать сборку и в конечном счете добиться более высокой производственной мощ-

ности. Оба варианта плагин также могут иметь практически любую конфигурацию вводов и выводов, но чаще всего реализуются в виде сетки (grid pattern). Такие шаблоны обычно имеют шаг выводов 0,100 дюйма (0,254 см), но он может быть изменен в соответствии с конкретными требованиями заказчика. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

16. ГОСТ ИЕС 61188–5–8–2013 «Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5–8. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с матрицей контактов (BGA, FBGA, CGA, LGA)».
17. Максимов А. Многослойные металлокерамические корпуса: преимущества и особенности//Электроника НТБ. 2011. № 3.
18. Сими́н А., Холо́дняк Д., Вендик И. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот СВЧ на основе керамики с низкой температурой обжига//Компоненты и технологии. 2005. № 5. [www.kit-e.ru/articles/svch/2005\\_5\\_190.php](http://www.kit-e.ru/articles/svch/2005_5_190.php)
19. McGillivray K. High Temperature Cofired Ceramic (HTCC) Package. Design and Applications. Presented at iMAPS New England. 6 May 2014. [www.ametek-ecp.com/-/media/ametek-ecp/v2/files/productdownloadabledocuments/datasheets-hermetic-packaging/hightemperatureco-firedceramicpackage-designandapplicationsimaps2014.pdf](http://www.ametek-ecp.com/-/media/ametek-ecp/v2/files/productdownloadabledocuments/datasheets-hermetic-packaging/hightemperatureco-firedceramicpackage-designandapplicationsimaps2014.pdf)
20. Радиационно-защитные экраны для электронных модулей. [www.test-expert.ru/catalog/detail.php?ID=1037&SECTION\\_ID=212](http://www.test-expert.ru/catalog/detail.php?ID=1037&SECTION_ID=212)
21. Семенов С. Н., Волосов А. В., Голованов Н. В. Перспективы развития мон-

тажа некорпусированных кристаллов СВЧ и цифровых ИС в приборах РЭА. [www.nirilis.ru/files/55cc4a0dc9344.pdf](http://www.nirilis.ru/files/55cc4a0dc9344.pdf)

22. Ripley B., Ellins M. The Small Form Factor (SFF) Dilemma in System Design. October 24, 2017. [www.cotsjournalonline.com/small-form-factor-sff-dilemma-system-design/](http://www.cotsjournalonline.com/small-form-factor-sff-dilemma-system-design/)
23. Сайт VMEbus Manufacturers Group. [www.vita.com/Standards](http://www.vita.com/Standards)
24. Си́лин А. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ//Беспроводные технологии. 2007. № 2.
25. Cerda R. Pocket-Size Signal Source. Wireless Design and Development. APR109. [www.crystek.com/documents/appnotes/wd94\\_components.pdf](http://www.crystek.com/documents/appnotes/wd94_components.pdf)
26. Дингес С., Хасьянова Е. Сверхширокополосные усилители компании В&Z Technologies//Электронные компоненты. 2012. № 2. [www.radiocomp.ru/joom/images/storage/docs/articles/BandZ.pdf](http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/docs/articles/BandZ.pdf)
27. ГОСТ 24566–86 «Соединители плоские втычные. Основные размеры, технические требования и методы испытаний».
28. ГОСТ Р 50030.2–2010 (МЭК 60947–2:2006) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели. 2.4. Выключатель втычного исполнения (plug-in circuit-breaker)».
29. Международный электротехнический словарь (МЭС) МЭК 60060 (441).
30. Сайт компании АМТЕК. [www.ametek-ecp.com/products/hermetic-packages/plug-ins](http://www.ametek-ecp.com/products/hermetic-packages/plug-ins)
31. Сайт компании Century Seals. [www.centuryseals.com/index.cfm?ref=10410](http://www.centuryseals.com/index.cfm?ref=10410)
32. Сайт компании Inseto.: [www.inseto.co.uk/microelectronic-materials-egide-microelectronic-packages.php](http://www.inseto.co.uk/microelectronic-materials-egide-microelectronic-packages.php)