

КОРПУСИРОВАНИЕ СВЧ-МИКРОСХЕМ НА ПЛАСТИНЕ: ТЕХНОЛОГИЯ, ПРЕИМУЩЕСТВА, РЕЗУЛЬТАТЫ

Корпусирование электронных устройств (модулей) — одна из наиболее трудоемких и дорогостоящих операций, особенно при разработке аппаратуры военного назначения. Однако во многих случаях не все составные части модуля требуют корпусирования, а только его наиболее чувствительные микроэлектронные компоненты, такие, например, как СВЧ монокристаллические схемы (МИС). В настоящее время ряд зарубежных фирм разрабатывает и внедряет в производство технологию корпусирования МИС непосредственно на пластине (Wafer-Level Packaging — WLP), что значительно снижает требования к герметичности устройства в целом и в ряде случаев исключает затраты на корпусирование на более высоких уровнях аппаратуры (подсистема, система). WLP-технология является групповой и полностью совместима со стандартными процессами производства СВЧ-микросхем на основе полупроводниковых соединений группы A^3B^5 . Помимо корпусирования она позволяет осуществлять трехмерную интеграцию СВЧ МИС, изготовленных на разных подложках, что обеспечивает значительную экономию массы, сокращение размеров и снижение стоимости при сборке многофункциональных входных модулей. Из компаний, разрабатывающих WLP-технологии применительно к военной аппаратуре космического назначения, следует назвать Northrop Grumman Space Technology (NGST). На коммерческом рынке электронных компонентов также появляются компании, выпускающие СВЧ-микросхемы по технологии корпусирования на пластине. В их числе компания Avago Technologies.

РАЗРАБОТКИ КОМПАНИИ NORTHROP GRUMMAN SPACE TECHNOLOGY

Общие подходы к корпусированию на пластине

Сегодня разработан ряд методов корпусирования на пластине. Большинство из них предназначены для микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния и не применимы для корпусирования СВЧ МИС на полупроводниковых со-

И.Викулов, к.т.н.,
член Европейской СВЧ-ассоциации

единениях группы A^3B^5 из-за высокой температуры процессов обработки [1]. Корпусирование на пластине может выполняться двумя способами:

- с использованием уже существующей в подложке полости или полости, формируемой в дополнительной пленке, которая закрывается пластиной-крышкой из материала, аналогичного подложке (рис.1а);
- созданием вокруг схемы микрокапсулы, открытый край которой закрывается путем последующего нанесения пленки (рис.1б).

При выборе конкретного метода корпусирования необходимо принимать в расчет следующие соображения.

Совместимость с технологией МИС. В процессе корпусирования следует учитывать температуру, при которой происходит соединение пластин, профиль изменения температуры и длительность теплового воздействия. Любой из этих факторов может повлиять на характеристики и надежность чувствительных к температуре компонентов МИС. Многие МИС, содержащие выращенные молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) структуры на полупроводниковых соединениях группы A^3B^5 , очень чувствительны к температуре. Слишком высокая температура или большая продолжительность процесса могут вызвать взаимную диффузию тонких МЛЭ-слоев и потерю параметров и надежности МИС. Необходимо также учитывать возникающие при нагреве механические напряжения между присоединяемой пластиной и любыми контактами разнородных материалов, таких как полупроводник-металл или диэлектрик-металл. Для исключения таких напряжений температура процесса корпусирования должна быть по возможности низкой.

Герметичность. Обеспечение герметичности в процессе корпусирования МИС гарантирует их устойчивую работу при воздействии влажности и нежелательных органических веществ. Влажность внутри корпуса может вызвать конденсацию влаги на активной области МИС, что приводит к коррозии структуры и деградации параметров схемы.

Определенные требования предъявляются и к применяемым материалам. Такие материалы, как полимеры и адгезивы, могут нарушать герметизацию за счет газовыделения.

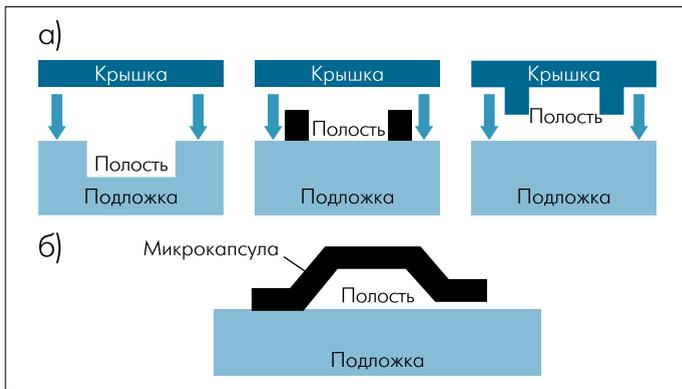


Рис. 1. Способы корпусирования на пластине с помощью дополнительной пластины (крышки) (а) и с использованием микрокапсулы (б)

В некоторых случаях для повышения надежности прибора в корпусе необходимо создавать контролируемую среду. Наилучшая среда для СВЧ МИС – бескислородная (азотная). А специальные приборы на основе МЭМС, такие как резонаторы и датчики давления, требуют вакуума или определенного уровня давления внутри корпуса.

Надежность корпусов. Соединения, выполняемые в процессе корпусирования, должны оставаться химически и физически стабильными в течение всего срока службы прибора. Выделение газов и воздействие органических адгезивов могут приводить к нарушению физической целостности корпуса и нарушению параметров МИС. Один из важных факторов, влияющих на надежность корпуса, – рассогласование механических свойств материалов корпуса и прибора, что может привести к сильным остаточным напряжениям, а впоследствии к деформации и разрушению корпуса. Чтобы избежать эти явления, необходимо тщательно проектировать корпус и выполнять процесс корпусирования при низкой температуре.

Стоимость. Стоимость СВЧ МИС определяют ряд факторов, в том числе выход годных приборов и корпусов, надежность, сложность реализации и воспроизводимость производственных процессов. Процесс корпусирования МИС на пластине фактически увеличивает их стоимость, добавляя один или более этапов к групповой обработке микросхем. Вместе с тем WLP-технология позволяет сократить время сборки устройства, обеспечивая более высокий выход годных по сравнению с герметизацией всего устройства в целом.

WLP-процесс

Процесс корпусирования МИС на пластине, разработанный компанией Northrop Grumman Space Technology, представляет собой групповой процесс, проводимый после завершения стандартных технологических операций изготовления МИС. В ходе обработки лицевой стороны 100-мм GaAs-пластины формируются основные элементы монолитной схемы. На завершающей стадии процесса на обратной стороне пластины создаются сквозные контакты к схеме. Процесс корпусирования на пластине не влияет ни на топологию схемы, ни на

структуру обратной стороны пластины и тем самым не приводит к изменению параметров СВЧ МИС.

WLP-процесс объединяет достоинства низкотемпературной пайки припоем и пайки термодинамически стабильным сплавом (эвтектикой). Он также позволяет корпусировать набор из нескольких пластин и совместим со стандартными сборочными процессами. Температура в процессе корпусирования не превышает 180°C.

Базовый процесс корпусирования компании Northrop Grumman предусматривает объединение двух пластин, одна из которых служит основанием, а другая – крышкой (рис.2). Сначала на лицевых поверхностях обеих пластин с помощью стандартных групповых процессов отдельно изготавливаются микросхемы. Затем для последующего совмещения пластин на каждую из них наносятся металлические соединительные кольца. При сжатии пластин в специальном устройстве в ходе низкотемпературного WLP-процесса кольца плавятся, и между пластинами образуются замкнутые полости, герметизирующие микросхемы, сформированные на их лицевых сторонах. После этого обрабатываются обратные стороны пластин, на которых создаются сквозные контакты к схемам: по постоянному току, по ВЧ и для заземления [1].

В завершение операции пакет пластин с корпусированными микросхемами (рис.3а) разделяют на отдельные кристаллы (рис.3б). Отдельная корпусированная полость с микросхемой и сквозными контактами, а также микрофотографии представлены на рис.3в и г, соответственно.

Герметичность корпусированных чипов проверяется на специальной гелиевой установке в соответствии с военным стандартом MIL-STD 883. Механические испытания проводятся с применением ударных и вибрационных воздействий по этому же стандарту. Для проверки термической устойчивости корпусов выполняется 50 термоциклов в ин-



Рис.2. Последовательность операций процесса корпусирования СВЧ МИС на пластине

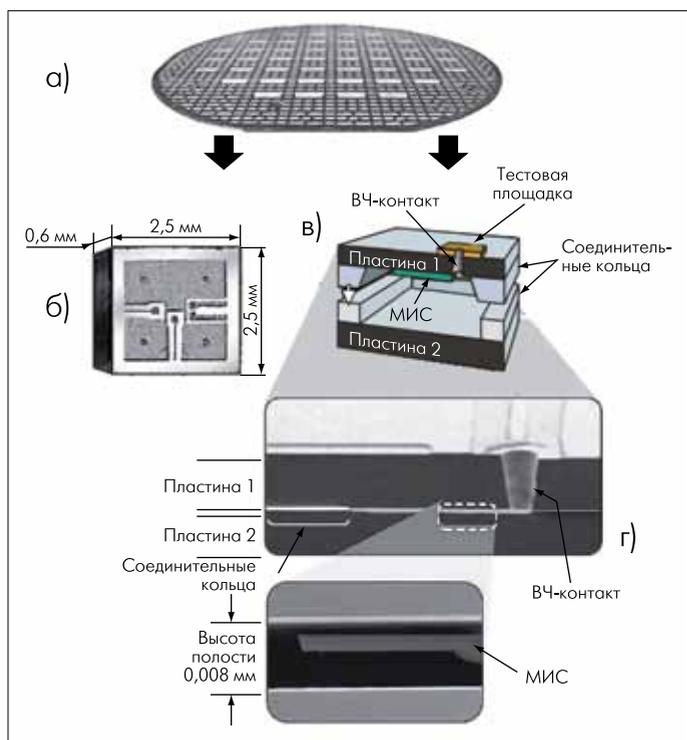


Рис.3. Завершающая часть процесса корпусирования: соединенные пластины с корпусированными МИС (а), корпусированные кристаллы после резки пластин (б), поперечное сечение корпусированной полости (в), ее микрофотография (г)

тервале температур от -55 до 125°C по методике стандарта 883. Согласно данным компании Northrop Grumman Space Technology, корпусированные по ее технологии приборы успешно выдерживают эти испытания [1].

Многослойная сборка как развитие процесса корпусирования на пластине

Одно из достоинств рассматриваемого метода корпусирования – возможность трехмерной интеграции различных схем или функциональных узлов, выполненных на различных полупроводниковых материалах. Так, в одном корпусе можно объединить маломощные усилители, оптимизированные по коэффициенту шума и, как правило, изготавливаемые на InP, и усилители мощности, оптимизированные по КПД и мощности,

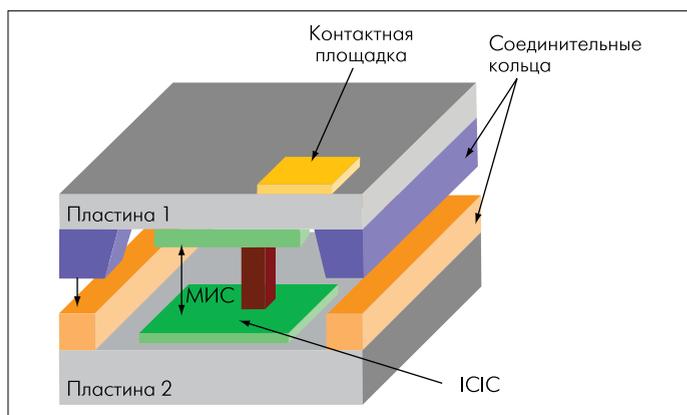


Рис.4. Внутриполостное межсхемное соединение ICIC

обычно изготавливаемые на GaAs или GaN. Возможна и интеграция СВЧ МИС с кремниевыми цифровыми схемами.

Основой технологии такой многослойной сборки (Wafer-Scale Assembly – WSA) является создание вертикальных элементов связи между схемами, или так называемых внутрисхемных соединений (Intra-Cavity Interconnection – ICIC). ICIC формируются между двумя внутренними поверхностями пластин внутри полости, образуемой в процессе корпусирования на пластине (рис.4) [2, 3]. Элементы ICIC создаются одновременно с соединительными кольцами, и поэтому для их получения не требуются дополнительные технологические операции. Элементы ICIC, обеспечивающие соединение схем по постоянному току, представляют собой простые металлические перемычки. Эти перемычки могут быть также использованы для создания изолирующих стенок между отдельными чувствительными СВЧ-компонентами схем [3].

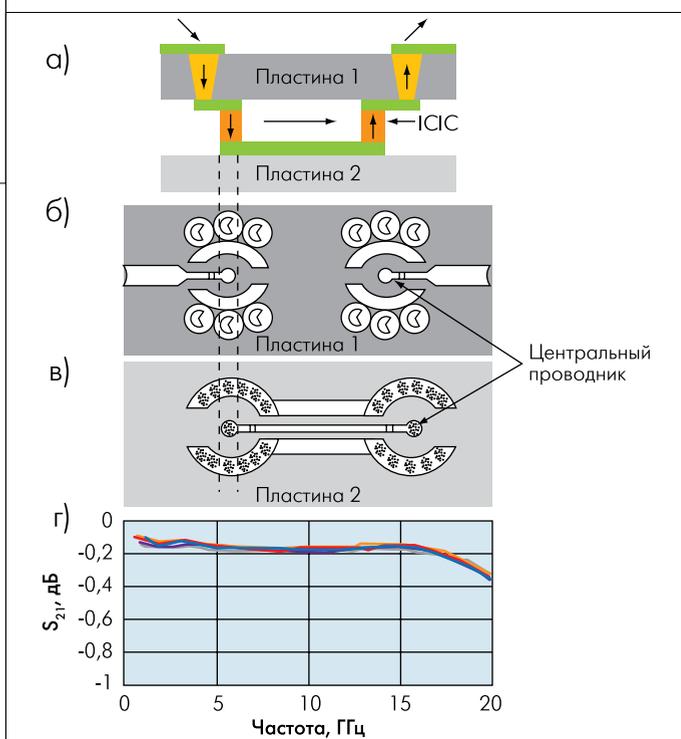


Рис.5. Тестовая структура для проверки качества СВЧ-переходов от пластины к пластине: конструкция перехода (а), внутренняя сторона пластины 1 (б), внутренняя сторона пластины 2 (в), коэффициент передачи перехода S_{21r} в X-диапазоне (г)

Более сложными являются СВЧ-соединения. На рис.5 показана тестовая структура для оценки характеристик таких соединений, состоящая из двух сквозных СВЧ-переходов и соединяющей их линии, расположенной внутри корпусированной полости. Вносимые потери всей структуры в X-диапазоне не превышают 0,2 дБ, т.е. потери на один переход составляют менее 0,1 дБ.

ICIC позволяют значительно сократить число проводных соединений в схемах, снизить потери и паразитные эффекты, особенно на высоких частотах. Хорошие характеристики ICIC сохраняются и в миллиметровых диапазонах. Так, в W-диапазоне (75–110 ГГц) потери такого соединения не превышают 0,2 дБ, а обратные потери равны 24 дБ (рис.6) [3].

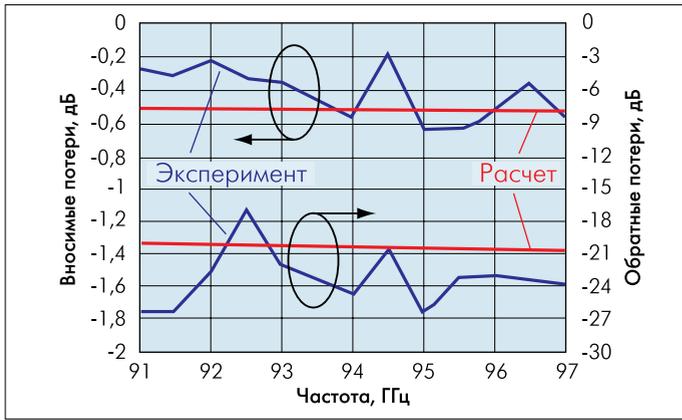


Рис.6. Частотные характеристики СВЧ перехода в W-диапазоне

Компания Northrop Grumman Space Technology провела отдельное статистическое исследование выхода годных сквозных контактов и ICIC. Выход годных сквозных контактов превысил 99,9%, выход годных ICIC диаметром более 30 мкм оказался выше 99%. Работоспособность ICIC, обеспечивающих СВЧ-связь, была продемонстрирована и на более сложных конструкциях, состоящих не из двух, а из четырех пластин, соединенных по той же WSA-технологии [3].

Опираясь на разработанный метод корпусирования и сборки, компанией Northrop Grumman Space Technology был изготовлен ряд модулей на основе GaAs HEMT, в том числе малошумящие усилители диапазонов УВЧ (300–3000 МГц), Ku (15,35–

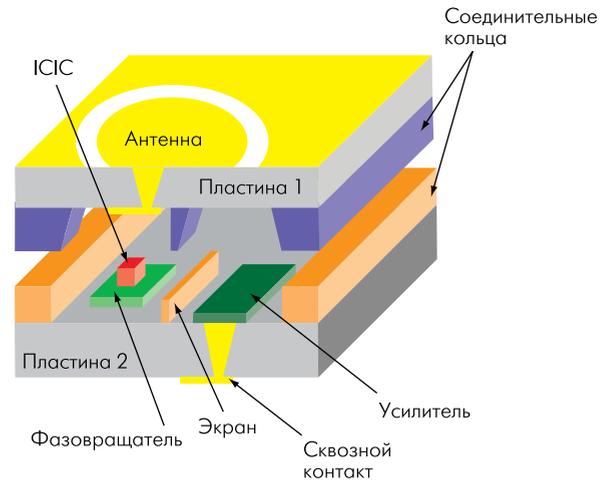


Рис.7. Схема входного модуля, интегрированного с антенной

17,5 ГГц), Ka (33–36 ГГц) и Q (40–50 ГГц); усилители мощности в Ku- и W-диапазонах [3]. Создан также сложный входной корпусированный модуль Q-диапазона, содержащий антенну, усилитель и 3-бит фазовращатель (рис.7) [3].

Размещение активных элементов в непосредственной близости к излучателю значительно снижает массу и объем СВЧ-устройства. Использование трехмерной технологии корпусирования, обеспечивающей возможность объединения антенны с входными устройствами, позволяет развивать такое важное

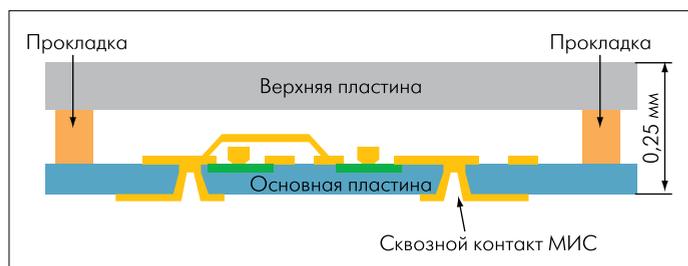


Рис.8. Конструкция корпуса МИС компании Avago Technologies

направление СВЧ-техники, как создание активных приемных антенн. Подобные работы ведут и европейские фирмы, но с помощью другой, более сложной технологии [4].

Следует отметить, что разработанный компанией Northrop Grumman Space Technology процесс корпусирования и сборки микросхем требует трехмерного проектирования, учитывающего влияние очень малой высоты образуемых при корпусировании полостей и близости паяемых соединительных колец к активным элементам микросхем.

РАЗРАБОТКИ КОМПАНИИ AVAGO TECHNOLOGIES

При разработке нового типа корпуса WaferCap компания Avago Technologies ставила задачу миниатюризации электронных СВЧ-компонентов (транзисторов, усилителей) и расширения их частотных диапазонов [5, 6]. При создании современных мобильных устройств на основе компонентов в обычных пластмассовых корпусах могут возникать ограничения, обусловленные их размерами. К тому же при массовом производстве пластмассовые корпуса вызывают ряд нежелательных эффектов, связанных с влиянием на монтируемый в корпус прибор диэлектрических свойств материала корпуса, проводников, присоединяемых к кристаллу, и рамки с выводами, на которую монтируется кристалл. Особенно сильно это влияние сказывается при корпусировании широкополосных и высокочастотных приборов. Зачастую выводы кристалла и рамки также ограничивают и минимальные размеры корпуса прибора как по высоте, так и по площади.

С помощью технологии корпусирования на пластине компания Avago Technologies создала полностью герметизированный прибор размером 1 0,5 0,25 мм, соответствующий по площади стандарту 0402 для пассивных компонентов, но значительно меньший по высоте. В сравнении с пластмассовым корпусом

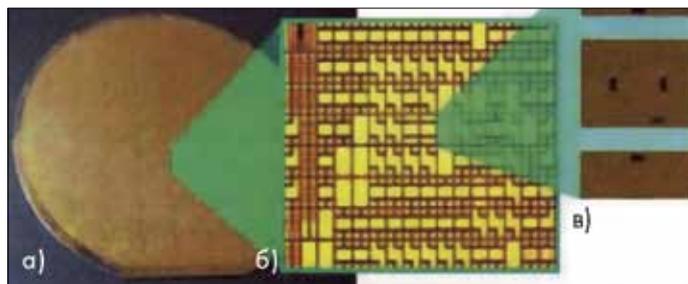


Рис.9. Корпусированная пластина диаметром 150 мм в сборке с крышкой (а), корпусированный кристалл (б), обратная сторона корпусированного кристалла (в)

Таблица 1. Характеристики малошумящих широкополосных транзисторов компании Avago Technologies

Параметр	Марка	
	VMMK-1225	VMMK-1218
Диапазон частот, ГГц	0–26	0–18
Напряжение питания /ток, В/мА	2/20	3/20
Тестовая частота, ГГц	12	10
Коэффициент усиления, дБ	14,9	10
Коэффициент шума, дБ	0,4	0,9
Выходная мощность в точке компрессии 1 дБ, дБм	10	16

Таблица 2. Характеристики широкополосных усилителей компании Avago Technologies

Параметр	Марка				
	VMMK-2103	VMMK-2203	VMMK-2303	VMMK-2403	VMMK-2503
Диапазон частот, ГГц	0,5–6	0,9–11	0,5–6	2–4	1–12
Напряжение питания /ток, В/мА	5/25	5/28	1,8/20	5/50	5/60
Коэффициент усиления, дБ	14	16	13	15	14
Коэффициент шума, дБ	2,4	2,3	<2,5	2,5	3,7
Выходная мощность в точке компрессии 1 дБ, дБм	–	–	10	20	17

типа SOT-343 корпус формата 0402 занимает всего 5% объема и 10% площади платы. Компания предполагает, что приборы в таких корпусах могут достигать частоты 100 ГГц [6].

Технологические приемы. Технологию корпусирования на пластине компания Avago Technologies использует в течение нескольких лет при производстве пленочных резонаторов на объемных акустических волнах [5]. Теперь этот опыт применен к GaAs СВЧ-микросхемам.

Последовательность технологических операций при корпусировании подобна той, которую применяет Northrop Grumman Space Technology. На базовой GaAs-пластине диаметром 150 мм с помощью стандартного процесса формирования псевдоморфных HEMT, работающих в режиме обогащения (E-pHEMT), изготавливаются МИС на основе малошумящих транзисторов с минимальным размером элементов 0,25 мкм, высоким усилением и широким динамическим диапазоном. Транзисторы питаются от единого источника положительного напряжения. Вся подводка к схемам выполняется на обратной стороне основной пластины через герметизированные сквозные контакты. К базовой пластине через специальную прокладку присоединяется вспомогательная GaAs-пластина (крышка) (рис.8). Между пластинами образуются закрытые воздушные полости, изолирующие микросхемы от внешней среды. Далее конструкция из двух соединенных пластин разрезается на отдельные кристаллы (рис.9).

Влагостойкость корпусированных приборов соответствует первому уровню стандартных требований к влажности, что

допускает их длительное хранение и надежное использование при автоматизированной сборке на линиях для поверхностного монтажа. Площадки под пайку расположены на нижней поверхности корпуса и не требуют никаких дополнительных соединений. Корпусированные приборы отличаются хорошим теплоотводом и механической прочностью.

Параметры. Компания Avago Technologies выпустила на рынок несколько типов приборов, собранных по технологии WaferCap (табл.1 и 2). Эти миниатюрные транзисторы легко согласуются с 50-омной линией и находят широкое применение в системах связи, включая системы стандартов 802.11a/b/g/n, WLAN, WiMax всех диапазонов, приемники DBS, системы VSAT и SATCOM в диапазонах от 13 до 18 ГГц, системы стандартов 802.16 и 802.20 (BWA) и др.

Согласованные с 50-омной линией усилители серии VMMK помимо систем связи могут использоваться также и в военной технике: в РЛС, радиосистемах, РПД.

Корпусирование маломощных СВЧ-микросхем на уровне полупроводниковой пластины имеет ряд существенных достоинств. В случае сложных схем – это повышение степени интеграции и многофункциональности при снижении объема, массы и стоимости устройств; в случае однофункциональных схем – возможность миниатюризации аппаратуры в условиях массовой сборки. Во всех случаях сформированные на пластине корпуса позволяют значи-

тельно повысить рабочую частоту и расширить частотный диапазон СВЧ-микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chang-Chien P. et al.** Low Temperature, Hermetic, High-yield Wafer-Level Packaging Technology. – Northrop Grumman Technology Review Journal, Spring/Summer, 2006, v.14, N1, p. 57–78.
2. **Yajima M. et al.** High yield Intra-Cavity Interconnection Fabrication Method and Characterization Methodologies. CS MANTECH Conference, May 14–17, 2007, Austin, Texas, USA, p. 151–154.
3. **Chang-Chien P. et al.** MMIC Packaging and Heterogeneous Integration Using Wafer-Scale Assembly. – CS MANTECH Conference, May 14–17, 2007, Austin, Texas, USA, p.143–146.
4. **Bonnet B. et al.** 3D Packaging Technology for Integrated Antenna Front-Ends. – Proceedings of the 38th European Microwave Conference, Oct. 2008, Amsterdam, the Netherlands, p.1569–1572.
5. **Ingram B.** WaferCap-packaged Amplifiers Drive Innovation into RF Designs. – Microwave Journal, Dec. 2008, v.51, N12, p.114, 116, 118.
6. RF Newsletter, Millimeter Wave Special, Nov. 2008. www.bfioptilas.com/wafercap.