

ТЕХНОЛОГИИ КОРПУСИРОВАНИЯ — КЛЮЧ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК mmWAVE

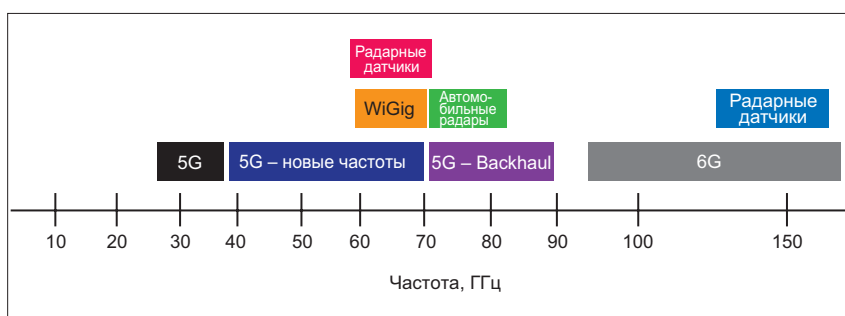
В статье рассмотрены разные технологии корпусирования и интеграции компонентов, включая LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic), AiP (Antenna in Package), Fo-WLP (Fanout-Wafer Level Package), а также PolyStrata.

В последние годы неуклонно растет интерес к системам, работающим в миллиметровом диапазоне (mmWave). По некоторым прогнозам, количество разрабатываемых и производимых устройств этого типа к 2023 г. может составить около 1 млрд шт. в год [1]. Столь бурное развитие во многом связано с появлением технологии 5G (рис. 1). Первоначально, если говорить о США, сети 5G развертывались на частотах 28 и 39 ГГц, однако в соответствии с недавним решением Федеральной комиссии по связи (FCC) к этим частотам также добавилось значение 48 ГГц, а в 17-м релизе консорциума 3GPP рассматривается возможность использования частот до 71 ГГц.

Кроме того, растет интерес к высокоскоростным беспроводным транспортным сетям (backhaul networks) с частотными диапазонами E (71–86 ГГц), W (92–114 ГГц) и D (130–175 ГГц). Использование радарных датчиков диапазона E в автомобилях во многом заложило основу для построения систем автономного управления. Примером использования D-диапазона может послужить не так давно продемонстрированный компанией IMEC радарный датчик, работающий на частоте 140 ГГц, который, главным образом, предназначен для систем распознавания жестов, контроля поведения водителей или пациентов [3].

Заметим также, что обсуждения концепции сетей 6G в настоящее время предполагают использование частот 95 ГГц и выше. Не стоит забывать и о таких стандартах, как WiGig или IEEE 802.11ad, работающих на частоте 60 ГГц, а также радарных датчиках, применяемых в смартфонах и также использующих частоту 60 ГГц [2].

Вне зависимости от назначения (организация связи, распознавание объектов и жестов и т. д.) многие mmWave-устройства используют в своем составе



▲ Рис. 1. Основные технологии, использующие mmWave

антенные решетки, конфигурируемые в соответствии с требованиями конкретной системы. Антенные решетки могут состоять из нескольких или сотен элементов, использовать одинарную или двойную поляризацию, базироваться на полосковых антеннах (патч-антенны) или на более сложных по структуре элементах. Однако вне зависимости от используемого типа решетки при работе в миллиметровом диапазоне одной из главных задач является правильное подключение к ней приемопередатчика или микросхемы, отвечающей за формирование луча (beamformer IC, BFIC). При выполнении подключения особое внимание следует уделить возможным потерям, импедансу и уровню гальванической развязки.

Несмотря на бурное развитие mmWave, построение компактного и экономичного устройства, работающего в этом диапазоне, является достаточно сложной задачей. Технические характеристики полупроводниковых компонентов и компонентов для обработки данных в mmWave-устройствах, как правило, не вызывают нареканий — большинство проблем связано с технологиями корпусирования и интеграции. Мы рассмотрим разные технологии корпусирования и интеграции компонентов, включая LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic), AiP (Antenna in Package), Fo-WLP (Fanout-Wafer Level Package), а так-

же PolyStrata. При анализе данных технологий основной упор будет делаться на следующие аспекты:

- уровень потерь;
- тепловые характеристики;
- размеры конечных устройств и уровень гальванической развязки;
- поддержка гетерогенной интеграции;
- масштабируемость.

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ mmWAVE-РЕШЕНИЙ

При выборе технологии корпусирования следует учитывать множество аспектов, к которым относятся: тип диэлектрической подложки, способ интеграции пассивных или активных элементов и т. д. Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки при построении mmWave-решений. Основными факторами, определяющими развитие описываемых в статье технологий, являются коммерческие направления 5G и IoT. Эти технологии успешно применяются во многих изделиях и активно рассматриваются разными компаниями для разработки собственных mmWave-приложений.

LTCC

LTCC представляет собой довольно популярную технологию, используемую при производстве многослойных печатных плат для РЧ-устройств. Многослойные керамические платы первоначально изготавливались из ок-

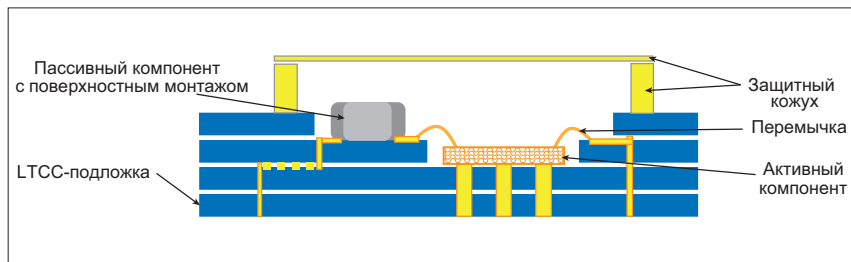
сида алюминия (НТСС-технология). Этот материал обжигался при температуре ≥ 1500 °С, что ограничивало выбор материалов, используемых для металлизации. Применение LTCC позволило решить эту проблему за счет уменьшения температуры обжига ниже 1000 °С, что, в свою очередь, позволило подключать пассивные элементы (фильтры, катушки индуктивности и конденсаторы) к слоям с более высокой проводимостью. Активные элементы, как правило, устанавливаются с помощью более традиционных способов монтажа — перемычек, монтажа методом перевернутого кристалла (flip chip), столбиковых выводов (solder bumps) (рис. 2). Как и в других описываемых в статье технологиях, характеристики материалов и технологический процесс зависят от области применения конечного приложения. Применение LTCC позволяет создавать компактные модули с пассивными компонентами, встроенными напрямую в керамическую подложку платы.

AiP

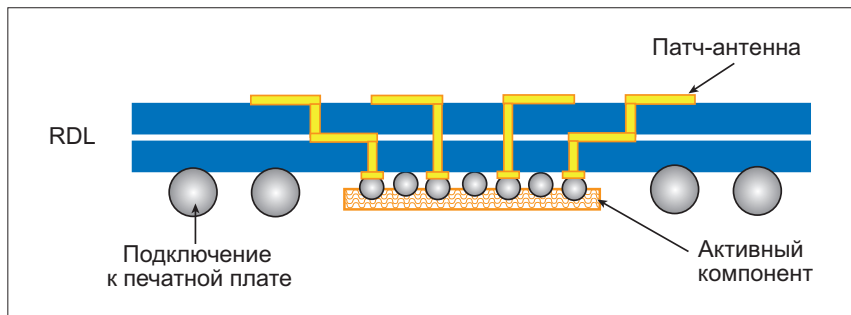
Технология AiP является достаточно новым, но быстро набирающим популярность решением. При использовании AiP антенна больше не является отдельным компонентом, а интегрирована в компонент. Технология строится на основе антенн, в конструкции которых применяются фрактальные или квазифрактальные структуры, что позволяет максимизировать их эффективную длину либо увеличить периметр. Быстро растущий интерес к AiP обусловлен возможностью использования этой технологии в широком ряду mmWave-приложений, к которым относятся смартфоны с поддержкой 5G. Решения на основе AiP, как правило, состоят из небольшого количества антенных элементов, которые можно интегрировать в пакет совместно с активными компонентами (рис. 3). AiP не является технологией единого проекта — скорее, она представляет собой набор методов двухсторонней сборки, RDL, интеграции пассивных компонентов и экранирования [4].

Fo-WLP

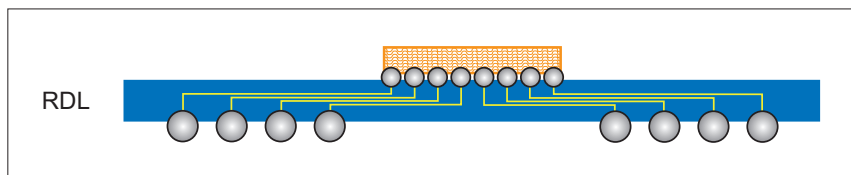
Как и AiP, Fo-WLP не является отдельной технологией, а представляет собой группу методов. Общая идея Fo-WLP заключается в том, чтобы компонент подключался к печатной плате даже в тех случаях, когда невозможно их прямое соединение. Как и в AiP, в этом случае применяется RDL (рис. 4). Одно из преимуществ Fo-WLP состоит в возможности выпускать в одном корпусе сразу несколько микросхем.



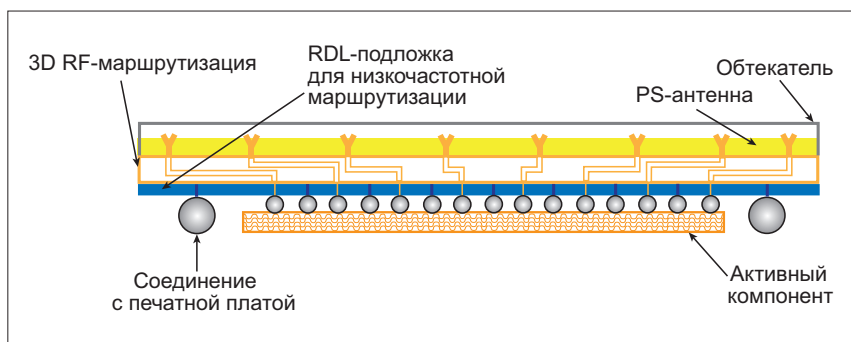
▲ Рис. 2. Поперечное сечение модуля, построенного по технологии LTCC



▲ Рис. 3. Поперечное сечение модуля, построенного по технологии AiP



▲ Рис. 4. Поперечное сечение модуля, построенного по технологии Fo-WLP



▲ Рис. 5. Поперечное сечение модуля, построенного по технологии PolyStrata

PolyStrata

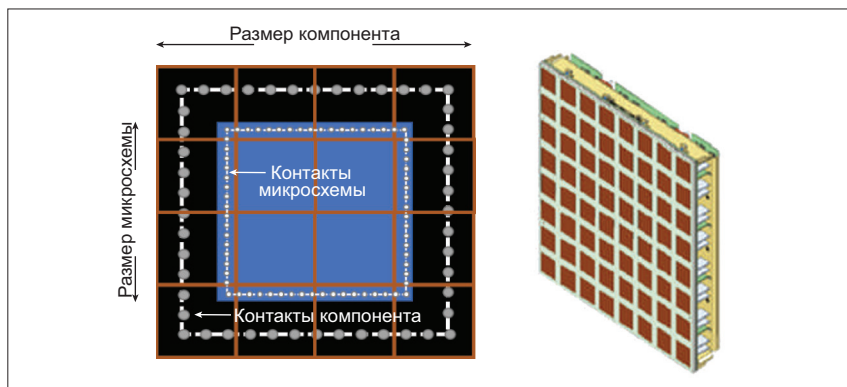
PolyStrata представляет собой коммерческую технологию, разработанную агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам DARPA в соответствии с программой развития 3-D MERFS (3D Micro Electromagnetic Radio Frequency Systems). Эта технология представляет собой пакетный аддитивный процесс, в котором применяются медные и воздушные диэлектрики. Использование технологии PolyStrata позволяет устанавливать MMIC или другие активные компоненты методом перевернутого кристалла или с помощью перемычки для соединения с подложкой (рис. 5). Использование PolyStrata дает преимущества в виде высокого уровня гальванической развязки, который достаточно сложно обеспечить при работе на высоких частотах, а также позволяет легко интегрировать фильтры,

диплексоры и другие высокопроизводительные компоненты.

В PolyStrata применяется медная подложка, которая поддерживает маршрутизацию микроаксиального сигнала в диапазоне 0–300 ГГц и выше, обеспечивая при этом изоляцию на уровне более 80 дБ. Помимо медного и воздушного слоев, в конструкции модулей на основе PolyStrata также имеется центральный проводник, а разводка поддерживает возможность трассировки в трех измерениях, упрощая проектирование и интеграцию пассивных компонентов.

РЕШЕТКИ mmWAVE

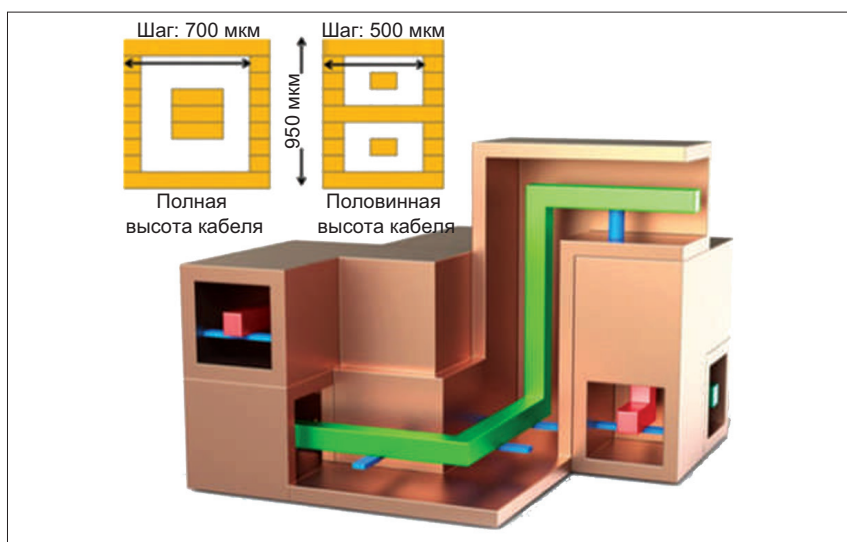
Несмотря на то, что описанные выше технологии имеют определенное сходство, у них есть немало различий, проявляющихся, главным образом, при упаковке mmWave-решений. Первое — это уровень потерь. Необходимость мини-



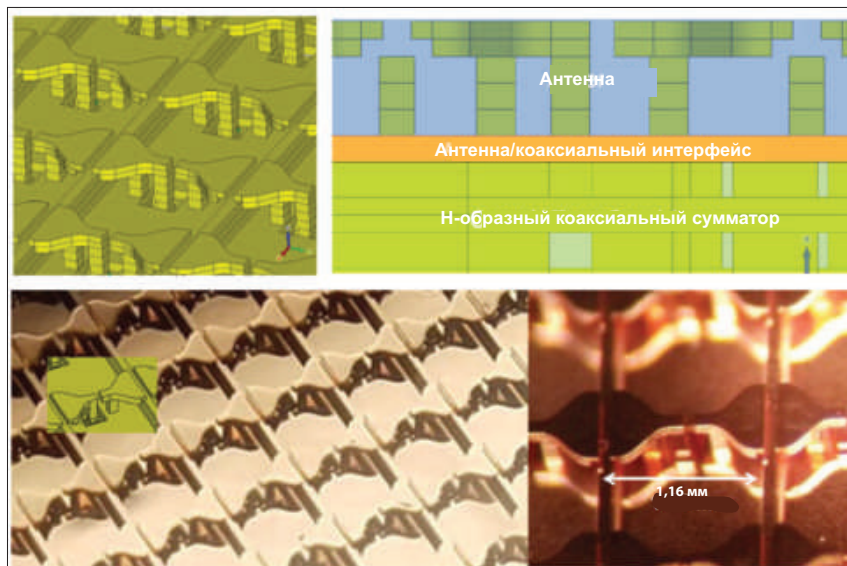
▲ Рис. 6. Пример соединения антенной решетки с микросхемой BFIC/MMIC

Таблица 1. Свойства материалов, используемых в популярных технологиях корпусирования

| Материал | Потери в линии 4 мм на частоте 60 ГГц, дБ | Диэлектрическая проницаемость ϵ_r | Коэффициент теплового расширения (КТР), ppm/°C |
|------------|---|--|--|
| RDL | 1,0–1,5 | ~3 | |
| Керамика | 0,2–0,6 | | |
| PCB | 0,15–0,25 | ~3 | 16–18 |
| PolyStrata | 0,08–0,1 | ~1 | 16,6 |
| Алюминий | | 9,8 | 7–8 |



▲ Рис. 7. Трехмерные коаксиальные конструкции, построенные по технологии PolyStrata



▲ Рис. 8. Схема соединения антенной решетки и PolyStrata при работе в D-диапазоне

мизации потерь зависит от конкретного приложения. Например, при работе на низких частотах и у решетки небольших размеров потери могут быть несущественными, однако этот показатель становится намного более важным, когда речь идет о работе на высокой частоте и с использованием антенных решеток со множеством составляющих элементов.

В качестве примера рассмотрим на рисунке 6 решетку размером 4×4 с установленной BFIC или MMIC. Размер элементов решетки в данном случае зависит от частоты: например, при работе в V-диапазоне длина каждого элемента составляет около 2 мм. На рисунке также отчетливо видна разница между размерами BFIC/MMIC и длиной решетки, которая в рассматриваемом случае может превышать 4 мм. Принцип работы этого mmWave-компонента заключается в маршрутизации высокочастотных сигналов от микросхемы к матрице решетки; при этом вне зависимости от используемой технологии компонент должен уметь работать как с mmWave, так и с низкочастотными сигналами, вплоть до сигналов с нулевой частотой: возможна передача около 16 mmWave-сигналов и в 5–10 раз больше низкочастотных. Описываемые в статье технологии используют в своей основе либо PCB, либо RDL, либо керамику или PolyStrata. Их потери во многом зависят от структуры линий передачи (полосковые, микрополосковые, коаксиальные), толщины подложки и других факторов. В таблице 1 сравниваются потери, возникающие при использовании тех или иных материалов в указанных технологиях для линии передачи длиной 4 мм на частоте 60 ГГц.

Еще один важный параметр технологии корпусирования — тепловые характеристики. Необходимо учитывать два аспекта. Первый — тепловое сопротивление компонента. При использовании AiP, Fo-WLP и PolyStrata активные компоненты могут быть связаны между собой специальным теплоотводом или теплоотводящим переходным отверстием через т. н. материал теплового интерфейса (thermal interface material, TIM). TIM также при необходимости можно объединить с крышкой корпуса компонента или дополнительным радиатором. Первый аспект не терпит существенных изменений при смене технологии корпусирования, чего нельзя сказать о втором аспекте — коэффициенте теплового расширения (КТР) корпуса. КТР должен быть учтен при проектировании и согласован между микросхемой, подложкой и печатной платой устройства, иначе контакт между поверхностями нарушится при нагреве или охлаждении компонента. В таблице 1

Таблица 2. Сводные характеристики наиболее популярных технологий корпусирования

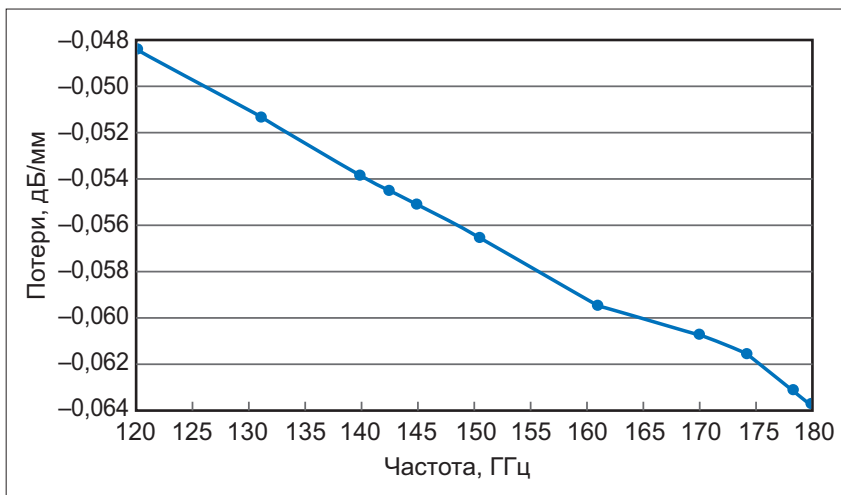
| Технология | Потери на высоких частотах | Электрическая изоляция | Тепловые характеристики | Возможности интегрирования | Масштабируемость | Работа на частотах >80 ГГц |
|------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| LTCC | умеренные | умеренная | умеренные | хорошие | хорошая | ограничена |
| AiP | низкие с высокопроизводительной PCB | умеренная | хорошие | ограниченные | хорошая | ограничена |
| Fo-WLP | значительные потери RDL | умеренная | хорошие | ограниченные | хорошая | ограничена |
| PolyStrata | низкие | высокая | хорошие | высокие | хорошая | да |

также приведены значения КТР для материалов, применяемых в разных технологиях корпусирования.

При маршрутизации высокочастотных и низкочастотных сигналов в ограниченном пространстве немаловажным фактором является обеспечение должного уровня гальванической развязки. Этот параметр во многом зависит от структуры линии передачи и диэлектрической проницаемости (ϵ_r) используемых материалов (см. данные по диэлектрической проницаемости в таблице 1). Сигналы mmWave обычно маршрутизируются путем использования микрополосковых или интегрированных в подложку коаксиальных линий передачи. В этом отношении неоспоримое преимущество имеется у технологии PolyStrata, которая позволяет создавать полностью экранированные трехмерные коаксиальные структуры линий передачи с небольшими размерами (рис. 7). Использование PolyStrata обеспечивает гальваническую развязку 80 дБ при частоте 70 ГГц.

Все описываемые в статье технологии поддерживают гетерогенную интеграцию, т. е. допускается установка компонентов не только при помощи пайки, но и методом перевернутого кристалла, а также посредством специальных перемычек. Важным моментом в этом отношении является шаг между модулями, т. к. с ростом частоты может потребоваться уменьшить значение шага, например установить шаг 100 мкм на частоте 100 ГГц. При использовании технологий корпусирования на основе керамической подложки или PolyStrata интегрировать компоненты (например, фильтры или соединители) можно непосредственно внутрь подложки.

Еще одним важным параметром для любой технологии корпусирования является масштабируемость. Эта характеристика приобретает особую актуальность, когда речь идет о крупносерийном производстве с меняющимся в зависимости от проекта уровнем производительности и размером антенной решетки, которые могут складываться путем суммирования отдельных пакетов в формате одного модуля или устройства. Возможность объединения отдельных пакетов для создания более крупных решеток во многом определяется способностью марш-



▲ Рис. 9. Зависимость потерь от частоты в коаксиальной линии передачи PolyStrata

рутизировать сигналы, уровнем потерь и уровнем изоляции, что в конечном итоге зависит от рабочей частоты системы и количества передаваемых сигналов.

Для некоторых приложений важным параметром также является возможность включения дополнительного антенного элемента. В таких случаях использование PolyStrata предоставит разработчикам преимущества за счет трехмерной структуры и воздушного диэлектрика. Пример антенной решетки PolyStrata показан на рис. 8. Эта антенная решетка, испытанная на частотах 130–175 ГГц, показала прекрасные результаты во всем рабочем диапазоне [5]. Другие технологии могут поддерживать двумерные структуры, например резонаторные, апертурные и патч-антенны [6].

Заметим, наконец, что выбранная технология корпусирования должна легко поддерживать работу приложений во всем частотном диапазоне и по мере повышения частоты. Технология PolyStrata в этом случае продемонстрировала наиболее низкие потери (менее 0,064 дБ/мм) и высокий уровень изоляции при работе в D-диапазоне (рис. 9) на частоте 180 ГГц. Для сравнения: уровень потерь решения на основе печатной платы составил 0,19 дБ/мм уже на 150 ГГц у микрополосковой линии передачи и 0,18 дБ/мм у линии передачи с заземленным копланарным волноводом [6].

ВЫВОДЫ

Развитие mmWave-систем и постоянно растущие потребности рынка под-

стегивают развитие технологий корпусирования. Мы рассмотрели наиболее распространенные технологии, каждая из которых имеет свои отличительные особенности, меняющиеся в зависимости от проекта и подхода к проектированию. В таблице 2 приведены сводные характеристики рассмотренных технологий корпусирования. При выборе той или иной платформы следует учитывать не только частоту работы, количество передаваемых сигналов и способы интеграции компонентов, но и возможности масштабирования, тепловые характеристики, уровень потерь и электроизоляции элементов. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Gartner. *Small Cells Market Status Report*. Dec. 2018.
2. I. Nasr et al. *A Highly Integrated 60 GHz 6-Channel Transceiver with Antenna in Package for Smart Sensing and Short-Range Communications*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. № 9. Sept. 2016.
3. Imec Adds Machine Learning to 140 GHz Radar Technology. *Microwave Journal*. May 22. 2019.
4. C. Zwenger and V. Chaudhry. *Antenna in Package (AiP) Technology for 5G Growth*. *Chipscale Review*. Mar-Apr. 2020.
5. Jared Jordan et al. *Monolithically Fabricated 4096-Element. PolyStrata Broadband D-Band Array Demonstrator*. 2019. *MTT-S International Microwave Symposium*.
6. A. Lamminen, J. Säily, J. Ala-Laurinaho, J. de Cos and V. Ermolov. *Patch Antenna and Antenna Array on Multilayer High-Frequency PCB for D-band*. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*.