

# Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига

## Часть 3. Активные устройства, антенны и многофункциональные СВЧ-модули

**Александр СИМИН**  
alexander.simin@philips.com  
**Дмитрий ХОЛОДНЯК**  
DVKholodnyak@mail.eltech.ru  
**Ирина ВЕНДИК,**  
д. ф.-м. н., профессор  
IBVendik@eltech.ru

В заключительной части обзора по многослойным ИС СВЧ, выполненным с использованием керамики с низкой температурой обжига (части 1 и 2 см. КиТ 05' 2005 и 06' 2005), представлены конструкции активных СВЧ-устройств, антенн и многофункциональных приемо-передающих СВЧ-модулей.

### 1. Активные СВЧ-устройства

Многослойные структуры на основе КНТО используются не только для реализации пассивных СВЧ-устройств, но и в качестве подложки для размещения безкорпусных активных СВЧ-компонентов: полевых и биполярных транзисторов, диодов Шоттки, *p-i-n*-диодов и т. д. Преимуществом подложек из КНТО над кремниевыми или текстолитовыми (*FR4*) является более высокая степень интеграции и добротность размещаемых в КНТО пассивных компонентов. Кроме того, многослойные подложки из КНТО позволяют организовать эффективный отвод тепла от мощных транзисторов и удобную разводку по питанию.

На рис. 1 представлена конструкция пятикаскадного усилителя мощности компании *Motorola*, реализованного с применением КНТО [1]. В качестве усилительных элемен-

тов использовались дискретные псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (*ПНЕМТ* — *pseudo-morphed high electron mobility transistor*). Часть пассивной обвязки усилителя, в том числе выходной трансформатор сопротивления, выполнена в нескольких слоях КНТО. Остальные пассивные элементы — разделительные конденсаторы, дроссели — навесные. Характеристики усилителя в режиме слабого сигнала и в нелинейном режиме показаны на рис. 1г и 1д соответственно.

Помимо усилителей, на многослойных подложках из КНТО выполняют диодные смесители. Как и в случае с усилителями, активные компоненты монтируются на поверхность подложки, в то время как интегральные пассивные компоненты располагаются в нескольких слоях КНТО.

На рис. 2 показана реализация двойного балансного смесителя компании *Mini-Circuits*,

выполненного на диодном мосте [2]. На коммерческом рынке этот смеситель доступен в нескольких вариантах исполнения для различных частотных диапазонов. Данный смеситель характеризуется малыми потерями преобразования; хорошей развязкой между каналом гетеродина и каналами СВЧ-сигнала промежуточной частотой, но при этом имеет не очень хорошее согласование по входам, что, впрочем, является ахиллесовой пятой всех двойных балансных смесителей.

Конструкция более сложного двойного балансного смесителя с подавлением зеркального канала представлена на рис. 3. Реализованный на основе КНТО смеситель разработан специалистами фирмы *Nokia* [3]. Смеситель состоит из двух квадратурных направленных ответвителей (НО), моста Уилкинсона, двух двойных балансных диодных смесителей, аналогичных представленному выше, и фильтра верхних частот. Для разме-

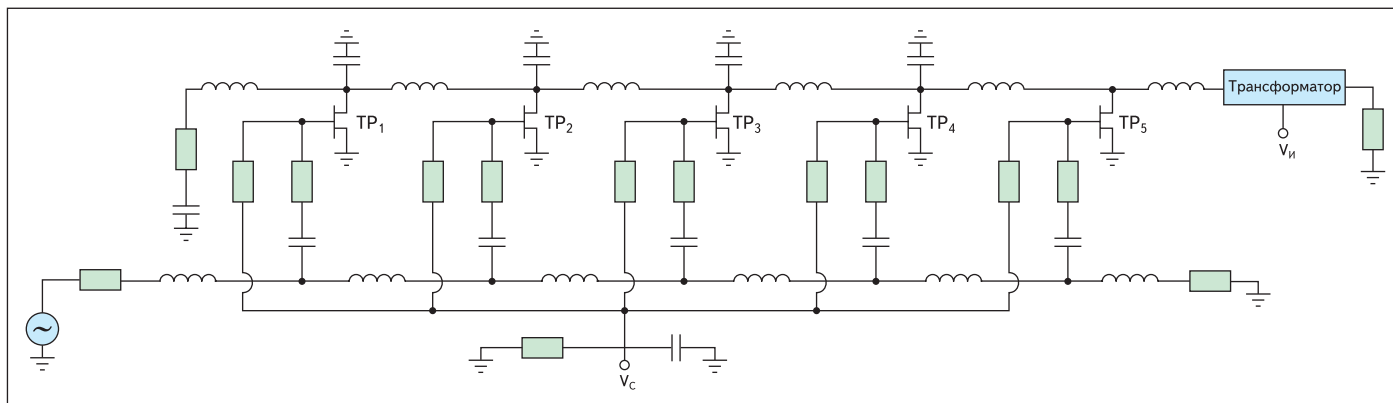


Рис. 1а. Пятикаскадный усилитель на многослойной подложке из КНТО. Эквивалентная схема [1]

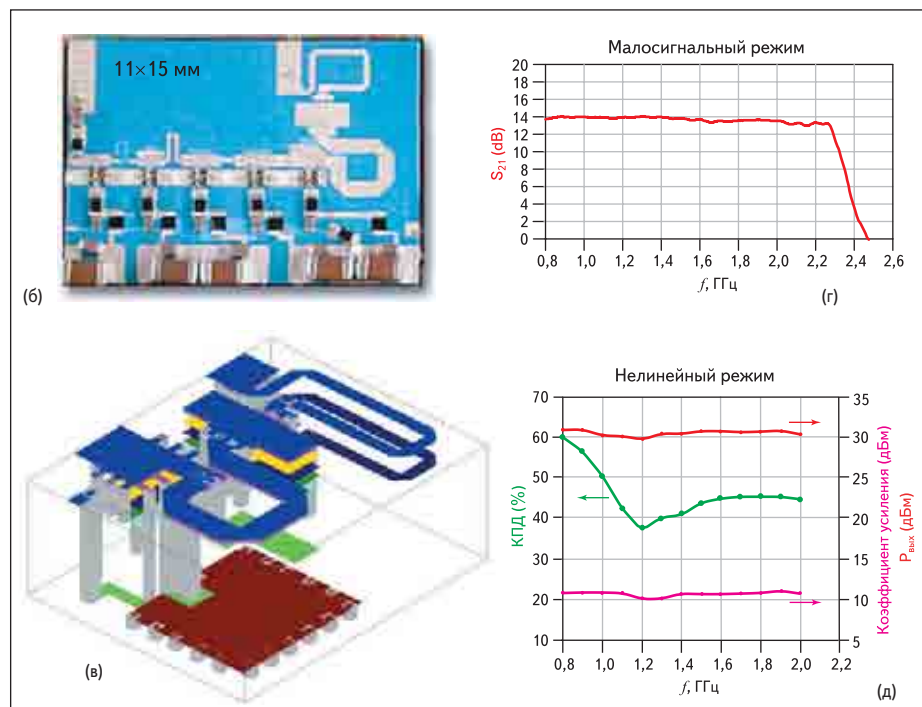


Рис. 1. Пятикаскадный усилитель на многослойной подложке из КНТО: внешний вид (б), конструкция выходного трансформатора сопротивления (в), характеристики в режиме слабого сигнала (r) и в нелинейном режиме (д) [1]

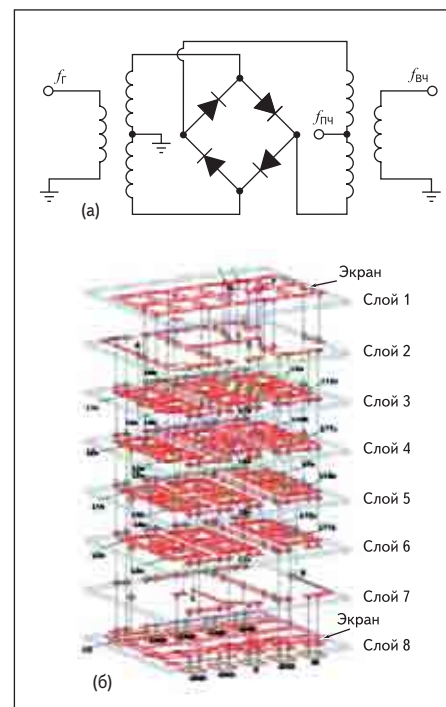


Рис. 2. Эквивалентная схема (а) и послонная топология (б) двойного балансного смесителя [2]

щения всех пассивных компонентов используется 20 слоев КНТО, смесительные диоды установлены сверху на подложке. Данный смеситель обеспечивает уровень подавления зеркального канала более 65 дБ.

## 2. Интегральные антенны

Технология многослойных ИС на КНТО предоставляет возможности для реализации интегральных антенн разнообразных конструкций и различного назначения.

Одна из наиболее распространенных конструкций интегральных антенн — так называемая чип-антенна — представляет собой керамическое основание с нанесенными на его поверхность печатными проводниками. Использование технологии КНТО позволяет уменьшить габариты чип-антенны за счет размещения проводников в объеме многослойной керамической структуры.

Оригинальная конструкция двухполосной чип-антенны для мобильных телефонов стандарта GSM 900/1800, реализованной на основе КНТО, представлена на рис. 4 [4]. Комбинированная спирально-монополярная чип-антенна состоит из пространственной спирали, отдельные части которой находятся в разных проводящих слоях и соединяются друг с другом посредством переходных металлизированных отверстий, и системы из трех монополярных излучателей, размещенных внутри спирали в среднем слое структуры. Спиральная антенна настроена на частоту 900 МГц, а монополярные излучатели обеспечивают работу в диапазоне 1800 МГц. Для расширения рабочей полосы частот используется не один

излучатель, а система из трех монополярных излучателей различной длины. Поскольку входной импеданс такой антенны носит емкостный

характер, несколько дополнительных витков спирали выполняют функцию согласующей цепи. Разработанная двухполосная чип-антенна

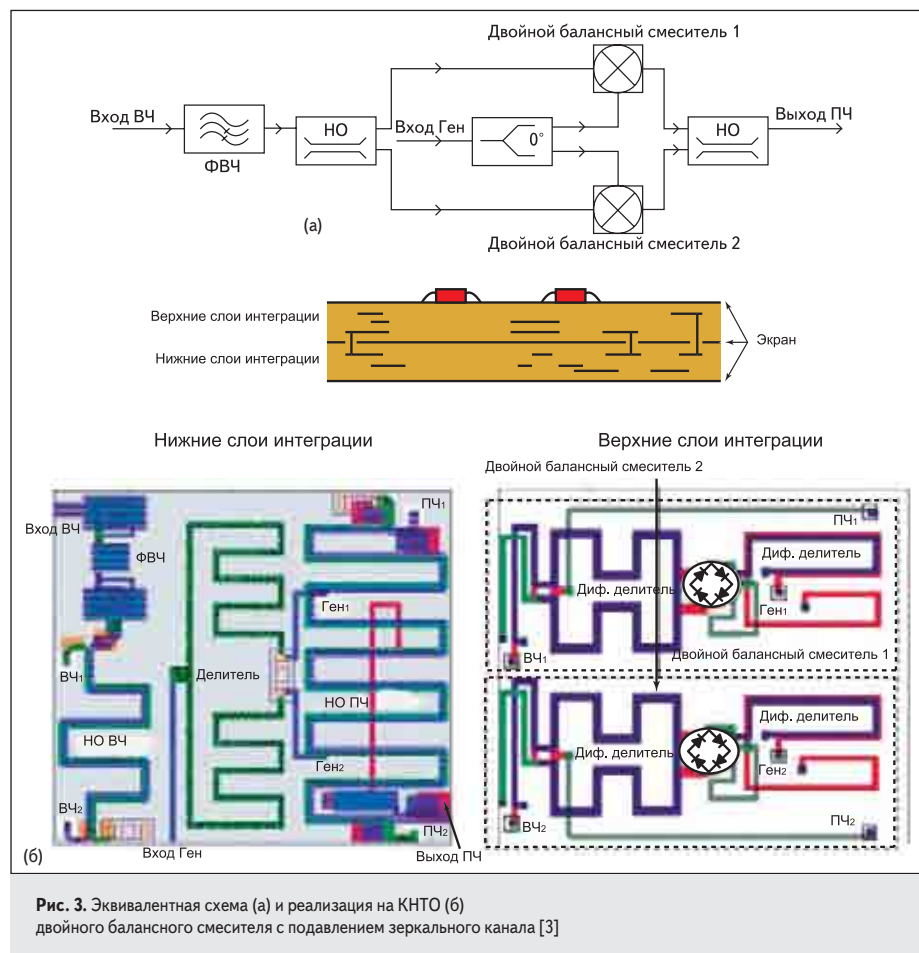
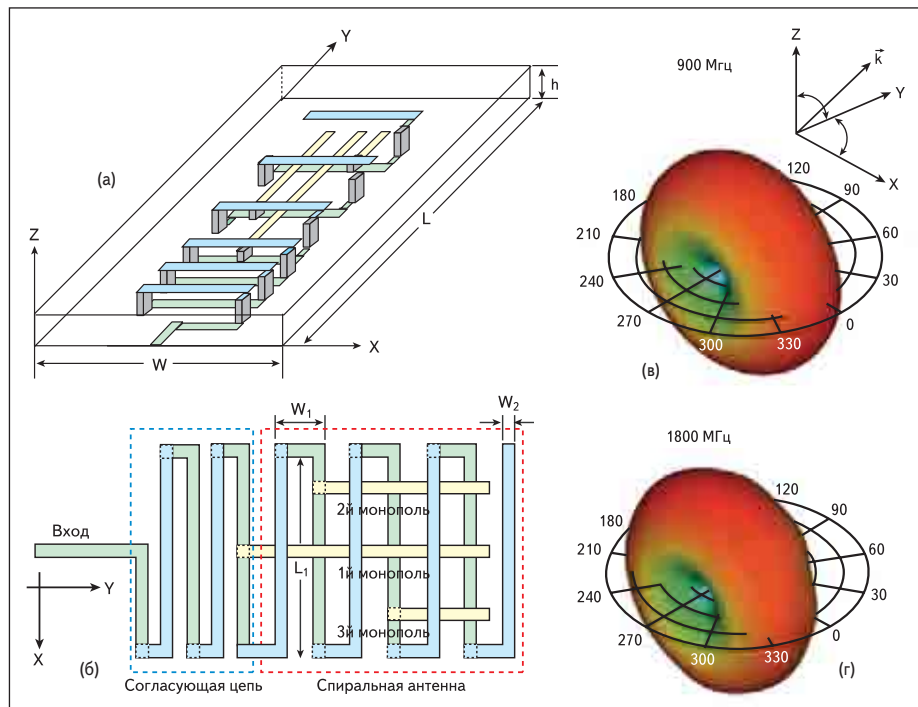
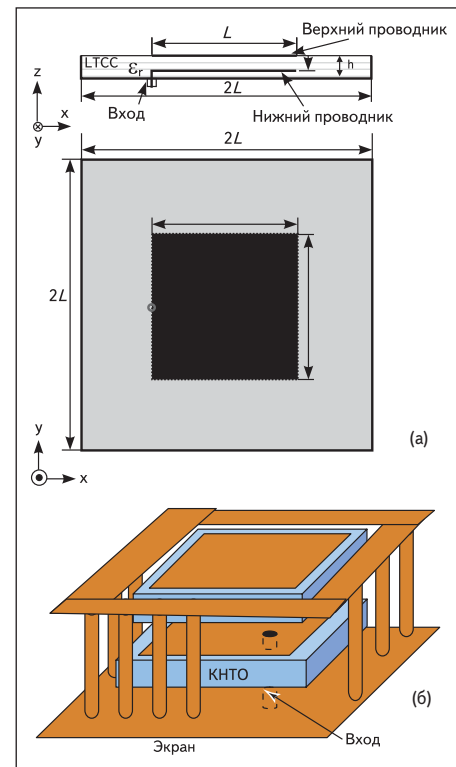


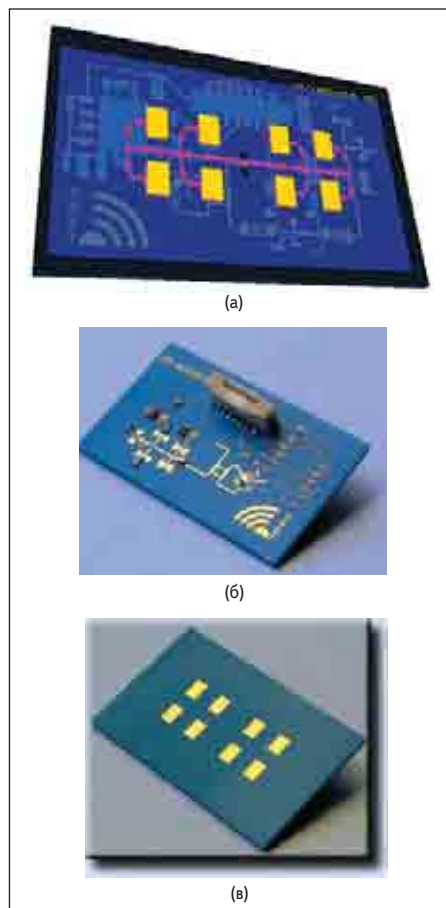
Рис. 3. Эквивалентная схема (а) и реализация на КНТО (б) двойного балансного смесителя с подавлением зеркального канала [3]



**Рис. 4.** Комбинированная спирально-монополярная двухполюсная чип-антенна, выполненная на КНТО [4]: многослойная реализация (а), вид сверху (б), диаграммы направленности антенны на частотах 900 МГц (в) и 1800 МГц (г), полученные моделированием в пакете HFSS



**Рис. 5.** Многослойная стекловая модификация прямоугольной печатной антенны (а) и ее реализация на КНТО (б) [5]



**Рис. 6.** Реализация на основе КНТО полностью интегральной антенны автомобильного радара, состоящей из 8 стекловых печатных излучателей [6]

имеет габариты  $5,4 \times 13,1 \times 1,14$  мм<sup>3</sup>. По всенаправленности излучения такая антенна приближается к обычному полуволновому диполю (см. рис. 4в и 4г).

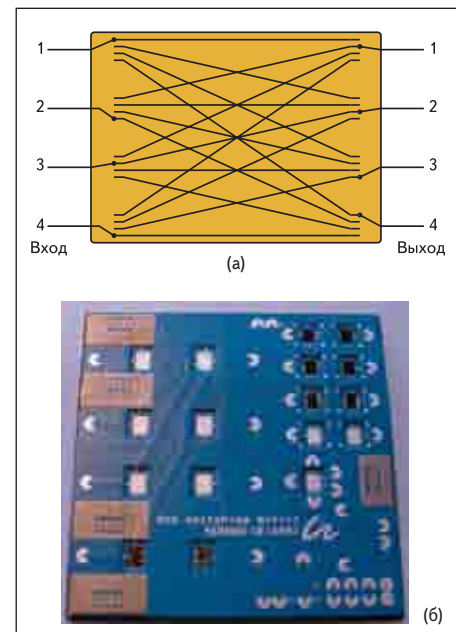
Многослойная реализация позволяет улучшить характеристики обычных печатных антенн. На рис. 5 показана стекловая модификация традиционной печатной антенны, которая не может быть реализована без применения многослойной технологии. Такая конструкция позволяет улучшить согласование антенны по входу и до двух раз расширить тем самым рабочую полосу частот. Характеристики такой антенны в полосе частот могут быть оптимизированы путем изменения числа слоев КНТО между электродами [5].

На рис. 6 показана антенна автомобильного радара (24 ГГц), разработанная компанией IMST. Антенна представляет собой систему из восьми стекловых прямоугольных излучателей [6], аналогичных рассмотренному выше. Излучатели вместе со схемой возбуждения размещены в пяти слоях КНТО *DuPont Green Tape 951* толщиной 200 мкм. С обратной стороны антенны (рис. 6б) располагаются элементы СВЧ-тракта радара и цепи подачи смещения. Реализация антенной решетки на КНТО позволила получить полностью интегральную малогабаритную антенну, а применение стекловых печатных излучателей — обеспечить рабочую полосу частот шириной более 10%.

Многослойное размещение и возможность вертикальной коммутации значительно упрощают создание схем возбуждения многоэлементных антенн, которые включают большое

число делителей-сумматоров мощности СВЧ (обычно мостов Уилкинсона). При этом уменьшение длины подводящих линий ведет к снижению потерь энергии в антенной системе.

Многослойные керамические структуры незаменимы для интегральной реализации од-



**Рис. 7.** Принцип построения переключаемой диаграммообразующей матрицы  $4 \times 4$  (а) и внешний вид устройства, реализованного на основе КНТО (б) [7]

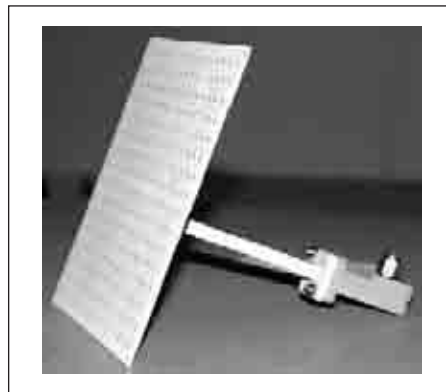


Рис. 8. Антенная решетка, содержащая 256 (16×16) излучателей, выполненная с использованием КНТО [8]

ной из разновидностей схем возбуждения антенн — диаграммообразующих матриц, позволяющих управлять распределением мощности между излучателями. Назначение переключаемой диаграммообразующей матрицы 4×4 (рис. 7а) — коммутировать СВЧ-сигналы с четырех входов на четыре выхода во всех возможных комбинациях. На рис. 7б показан пример реализации на КНТО такой матрицы, разработанной в рамках Европейского научно-технического проекта *KERAMIS* для систем спутниковой связи в диапазоне 17–22 ГГц [7]. Для коммутации в матрице используются навесные переключатели на *p-i-n*-диодах.

Удобная организация схем возбуждения позволяет реализовывать на основе КНТО интегральные антенные решетки с большим числом излучательных элементов. На рис. 8 представлена антенна, состоящая из 256 печатных излучателей (16×16) [8]. Площадь антенны, работающей на частоте 29 ГГц, составляет 12,7×12,7 см<sup>2</sup>. Антенна возбуждается при помощи стандартного прямоугольного волновода (*WR28*). Система излучателей и распределения мощности выполнена в двенадцати слоях КНТО.

### 3. Многофункциональные СВЧ-модули

Как уже отмечалось, технология многослойных ИС на основе КНТО позволяет объединять различные СВЧ-устройства в составе одной многослойной структуры, во внутренних слоях которой реализуются все пассивные элементы, а на поверхности размещаются дискретные активные компоненты и монокристаллические ИС. Высокая степень интеграции пассивных элементов делает возможным создание миниатюрных многофункциональных СВЧ-модулей, вплоть до реализации всего приемопередатчика телекоммуникационной системы в виде единой многослойной ИС СВЧ (*system-in-package*).

На рис. 9а показана структурная схема антенного переключателя мобильного терминала стандартов *GSM/DCS*, в состав которого входят СВЧ-диплексер, транзисторные

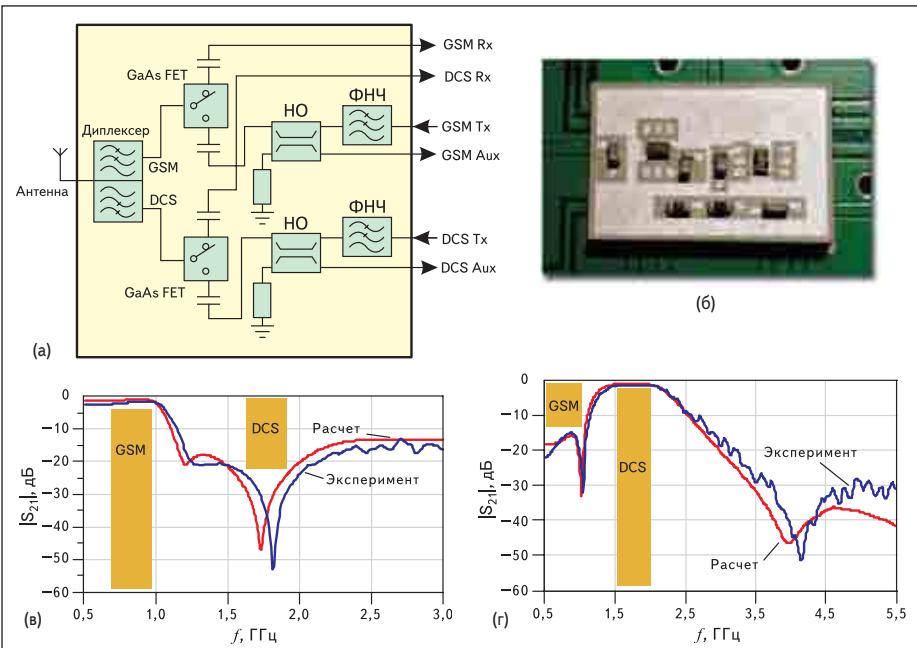


Рис. 9. Структурная схема (а), внешний вид (б) и характеристики (в, г) антенного переключателя, выполненного в виде многослойной ИС на КНТО [9]

ключи, два фильтра нижних частот в передающих каналах для подавления кратных гармоник и два 20-децибелльных НО для контроля мощности передатчиков.

СВЧ-диплексер служит для разделения частотных диапазонов (880–960 МГц для стандарта *GSM* и 1710–1880 МГц для стандарта *DCS*). Диплексер состоит из фильтра верхних и фильтра нижних частот, каждый из которых пропускает сигнал «своего» частотного канала и обеспечивает заграждение другого канала. Так как стандарты *GSM* и *DCS* предусматривают полудуплексную связь с временным разделением, для коммутации приемного и передающего каналов с общей антенной используются транзисторные ключи.

Внешний вид многослойной ИС антенного переключателя, разработанного компанией

*Motorola* [9], показан на рис. 9б. Во внутренних слоях КНТО реализована вся пассивная часть устройства, включая цепи подачи управляющих сигналов на ключи. На поверхности керамической структуры установлены навесные транзисторные ключи, разделительные конденсаторы и два резистора номиналом 50 Ом, которые используются в качестве согласованных нагрузок развязанных плеч НО. Расчетные и измеренные передаточные характеристики устройства в режимах работы *GSM* и *DCS* приведены на рис. 9в и 9г соответственно.

На рис. 10 представлена конструкция четырехканального приемного модуля диапазона 5–6 ГГц, каждый канал которого включает интегральную антенну, малошумящий усилитель (МШУ), полосно-пропускающий фильтр (ППФ) для подавления зеркального канала,

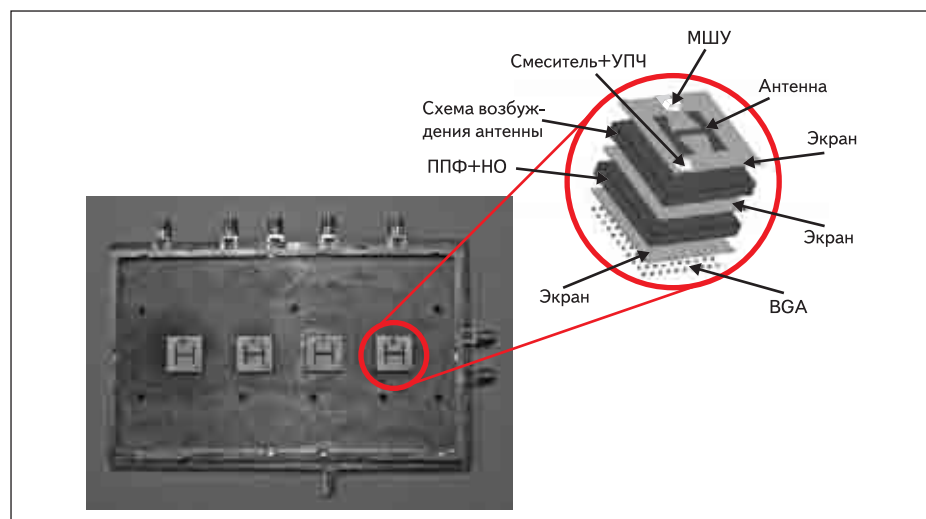


Рис. 10. Конструкция четырехканального приемного СВЧ-модуля [10]

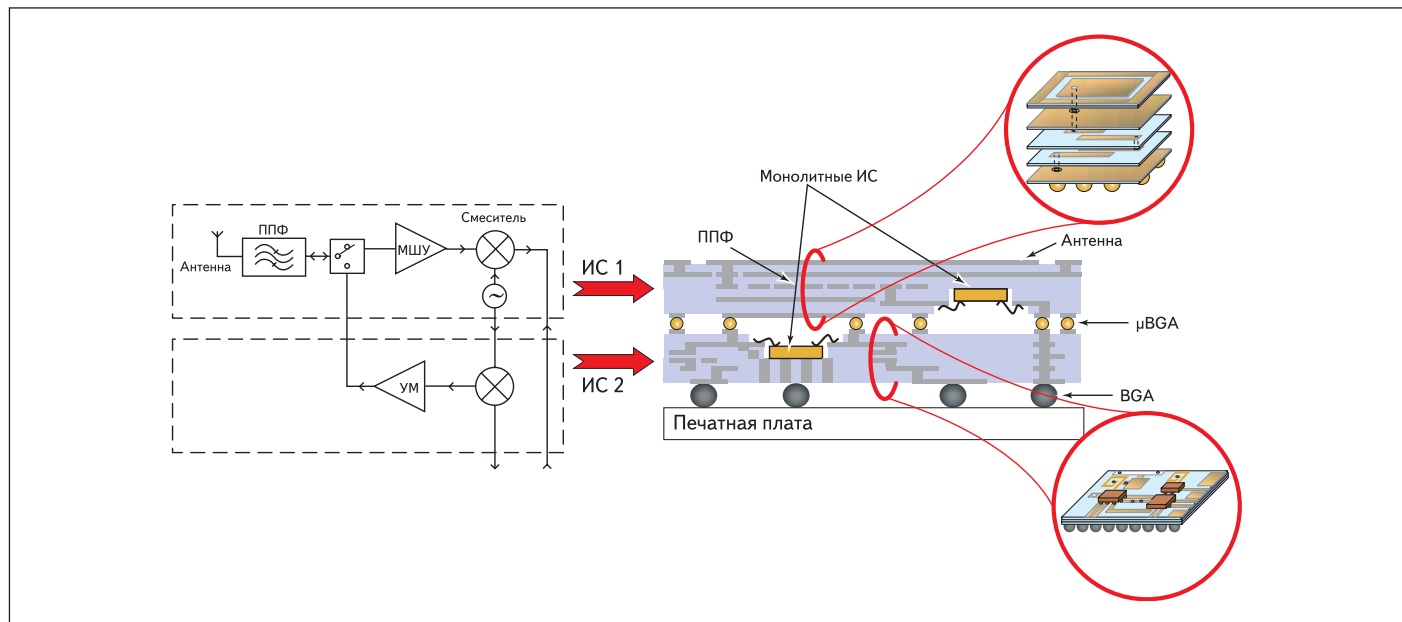


Рис. 11. Приемно-передающий СВЧ-модуль для WLAN [11]

смеситель с усилителем промежуточной частоты (УПЧ), а также входной 15-децибелльный НО [10]. Каждый канал выполнен в виде отдельной ИС на КНТО и устанавливается при помощи BGA на общую печатную плату. Показанный приемный модуль представляет собой опытный образец линейки излучателей, являющейся частью двумерной 16-элементной антенной решетки для тестирования беспроводных каналов связи в условиях множественных переотражений сигналов.

Пример интеграции приемно-передающего СВЧ-модуля для WLAN, состоящего из двух

многослойных ИС на КНТО с установленными в специальные полости активными устройствами, показан на рис. 11 [11]. В одной многослойной структуре реализована стекловая печатная антенна (рис. 5), двухзвенный ППФ, ключ на основе микроэлектромеханической структуры (МЭМС), МШУ, генератор сигнала и смеситель приемного канала. Другая многослойная подложка содержит смеситель передающего канала, усилитель мощности и согласующие цепи. Соединение двух отдельных ИС СВЧ между собой осуществляется с использованием технологии микро-BGA ( $\mu$ BGA).

Основным преимуществом СВЧ-модулей, выполненных на КНТО, является существенное уменьшение габаритов устройств по сравнению с традиционной реализацией на дискретных компонентах. Эффект от использования КНТО тем заметнее, чем большее число компонентов интегрировано в модуль. Это демонстрирует рис. 12 на примере двухканального приемно-передающего модуля для систем беспроводной связи (*IEEE 802.11a* и *IEEE 802.11b/g*), в состав которого входит двухканальный переключатель, два диплексера, восемь фильтров, навесные активные компоненты, а также цепи питания и развязки. Реализация модуля в виде многослойной ИС на КНТО (рис. 12б) выполнена специалистами компании *Epcos* [12].

### Заключение

Технология многослойных ИС СВЧ на основе КНТО получает в последнее время все большее распространение благодаря широкому спектру предоставляемых возможностей и низкой себестоимости.

Размещение в нескольких слоях КНТО обеспечивает высокую степень интеграции

пассивных компонентов, а хорошая совместимость с другими интегральными технологиями позволяет включать в состав устройств навесные активные компоненты, полупроводниковые ИС, МЭМС и т. д. Вдобавок возможность вертикальной коммутации компонентов заметно упрощает конструкцию СВЧ-устройств.

На основе современных материалов КНТО можно изготавливать многослойные ИС для любой части СВЧ-диапазона. При этом могут использоваться как традиционная элементная база планарных ИС СВЧ, так и новые оригинальные решения. С помощью КНТО могут реализовываться малогабаритные устройства на квазисосредоточенных элементах, преимущества которых особенно заметны в нижней части СВЧ-диапазона. В миллиметровом диапазоне длин волн могут быть реализованы СВЧ-устройства на основе волноводов и объемных резонаторов с высокой добротностью, выполненных внутри многослойных керамических структур.

С целью продемонстрировать разнообразие возможностей технологии КНТО, в данном обзоре были представлены конструкции различных СВЧ-устройств, выполненных в виде многослойных ИС: как доступных на коммерческом рынке, так и опытных разработок. В полной мере преимущества многослойной технологии раскрываются при использовании КНТО в качестве единой подложки для создания миниатюрных приемно-передающих СВЧ-модулей для систем связи и телекоммуникаций.

Дальнейшее совершенствование технологической базы КНТО и увеличение степени интеграции реализуемых СВЧ-устройств может оказать существенное влияние на развитие систем связи и заметно изменить расстановку сил на рынке телекоммуникационных услуг уже в ближайшие годы.

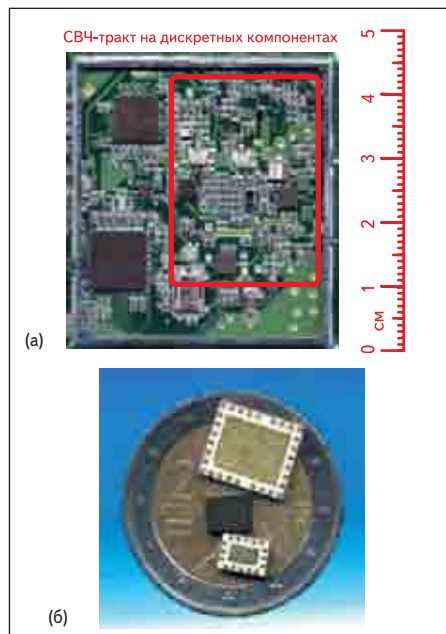


Рис. 12. Выигрыш в размерах приемопередатчика для WLAN при переходе от традиционной технологии (а) к реализации в виде единой многослойной ИС на КНТО (б) [12]

## Литература

1. Zhao L., Pavio A., Thompson W. A 1 watt, 3.2 VDC, high efficiency distributed power PHEMT amplifier fabricated using LTCC technology. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2003.
2. Mini-Circuits. An LTCC double-balance mixer // Microwave Journal. 2002. Vol. 45, No. 10.
3. Passiopoulos G., Lamcraft K. A compact L-band LTCC mixer with high image rejection. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2002. Vol. 1.
4. Lin C.-C., Chang Y.-J., Chuang H.-R. Design of a 900/1800 MHz dual-band LTCC chip antenna for mobile communications applications // Microwave Journal. 2004. Vol. 47, No. 1.
5. Li R., DeJean G., Maeng M., Lim K., Pinel S., Tentzeris M. M., Laskar J. Design of compact stacked-patch antennas in LTCC multilayer packaging modules for wireless applications // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2004. Vol. 27, No. 4.
6. Holzwarth S., Kulke R., Kassner J. Integrated stacked patch antenna array on LTCC material operating at 24 GHz. Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2004.
7. Trabert J. F., Perrone R., Münnich R., Stephan R., Hein M. A., Thust H. 20 GHz LTCC applications for satellite communications — challenges for design and technology. Proc. of 11<sup>th</sup> International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. 2004.
8. Huang Y., Wu K.-L., Fang D.-G., Ehlert M. An integrated LTCC millimeter-wave planar array antenna with low-loss feeding network // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. No. 3.
9. Lucero R., Qutteneh W., Pavio A., Meyers D., Estes J. Design of an LTCC switch diplexer front-end module for GSM/DCS/PCS applications. Proc. of IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2001.
10. Pergola L., Vahldieck R., Gobel U., Nuchter P. An LTCC-based 5–6 GHz receiver with integrated antenna. Proc. of 7th European Conference on Wireless Technology. 2004.
11. Pinel S., Chakraborty S., Roellig M., Kunze R., Mandal S., Liang H., Lee C.-H., Li R., Lim K., White G., Tentzeris M., Laskar J. 3D integrated LTCC module using BGA technology for compact C-band RF front-end module. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2002.
12. Chernyakov A., Markov K., Kryshchyn A., Orlenko D., Royak S., Kravchenko R., Gordiyenko A., Kerssenbrock T., Sevskiy G., Heide P. Novel small-size LTCC-based WLAN frontend-modules with integrated power amplifiers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2004.