

МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МИКРОСХЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LTCC*

Технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), используемая для изготовления многослойных керамических плат, находит широкое применение при производстве разнообразных СВЧ-устройств. Благодаря применению LTCC удалось уменьшить габариты устройств за счет размещения в объеме многослойной подложки сосредоточенных, квазисосредоточенных и распределенных СВЧ-компонентов. В заключительной статье серии, посвященной многослойным керамическим микросхемам, специалисты ФГУП "Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи" (РНИИРС) знакомят читателя с результатами разработки и изготовления по технологии LTCC таких аналоговых СВЧ-устройств, как широкополосные фильтры на квазисосредоточенных элементах, плавные фазовращатели, противофазные делители мощности и другие.

ФИЛЬТРЫ НА КВАЗИСОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Применение квазисосредоточенных элементов в СВЧ-устройствах позволяет устранить полосы пропускания на частотах, кратных основной, свойственные подобным устройствам на распределенных элементах. Правда, при этом потери в основной полосе пропускания несколько увеличиваются. Вот почему специалисты РНИИРС направили свои усилия на разработку фильтров низкой частоты (ФНЧ) на квазисосредоточенных элементах с различной частотой среза. Структура и эквивалентная электрическая схема ФНЧ показаны на рис. 1. Их многослойная подложка выполнена на основе керамики Du Pont Green Tape™, 951:

* Часть 3 статьи: Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №3, с.60–65; №5, с.42–45.



Г. Егоров, С. Капкин, Л. Стельмахович,
В. Трофименков, В. Хрипко.
egorov@rniirs.ru

один слой толщиной 0,096 мм – керамика 951PT, четыре слоя толщиной 0,14 мм в обожженном виде – 951P2. Габариты фильтра – 5х6х0,8 мм. Частота среза ФНЧ L-диапазона по уровню 3 дБ составляет 2,8 ГГц (рис.2).

После проработки схемно-конструктивных требований был создан полосовой фильтр на элементах с квазисосредоточенными параметрами на диапазон частот 0,95–2,1 ГГц (рис.3), предназначенный для применения в усилителях и переносчиках частоты различных диапазонов в L-диапазон. Подложка на основе керамики марки Green Tape, 951 набрана из четырех слоев 951P2 толщиной 0,14 мм и двух слоев 951PT толщиной 0,096 мм в обожженном виде. Габариты фильтра – 6,5х6х0,8 мм. Результаты измерений опытного образца (рис.4) показали, что по своим техническим параметрам разработанные фильтры аналогичны фильтрам фирмы RN2 Technologies.

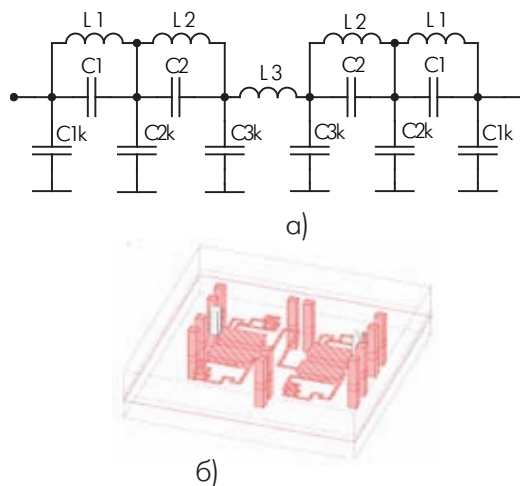


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема (а) и трехмерная структура (б) ФНЧ L-диапазона на квазисосредоточенных элементах. C_k – конструктивные емкости на внешнюю металлизацию

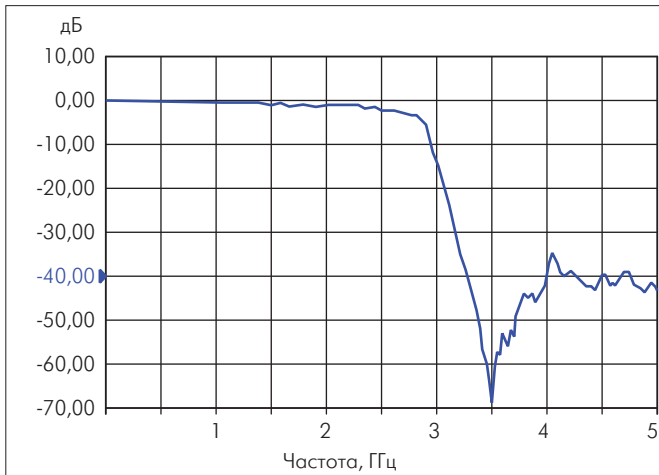


Рис.2. АЧХ ФНЧ L-диапазона на квазисосредоточенных элементах с частотой среза 2,8 ГГц

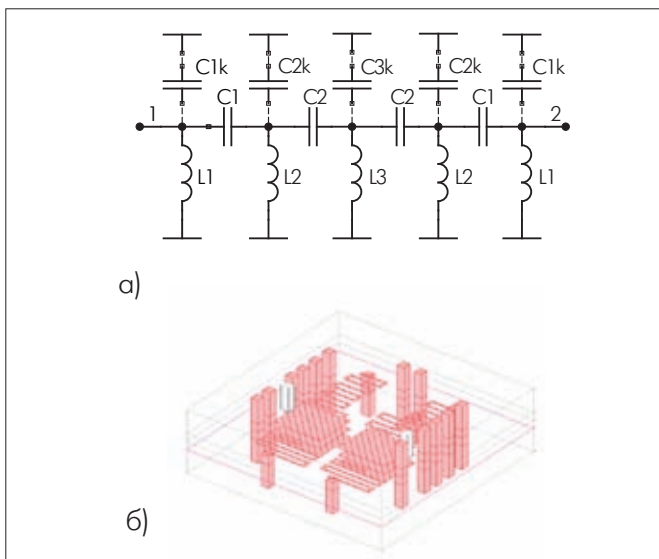


Рис.3. Эквивалентная электрическая схема (а) и трехмерная структура (б) полосового фильтра L-диапазона на квазисосредоточенных элементах. C_k – конструктивные емкости на внешнюю металлизированную поверхность

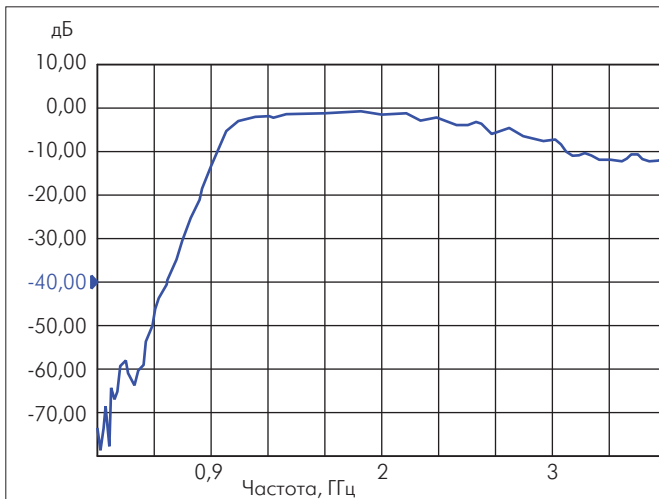


Рис.4. АЧХ ППФ L-диапазона на квазисосредоточенных элементах

Один из вариантов полосно-пропускающего фильтра (ППФ) с малыми габаритами и хорошими характеристиками затухания в полосе заграждения – фильтр на спиральных резонаторах. В

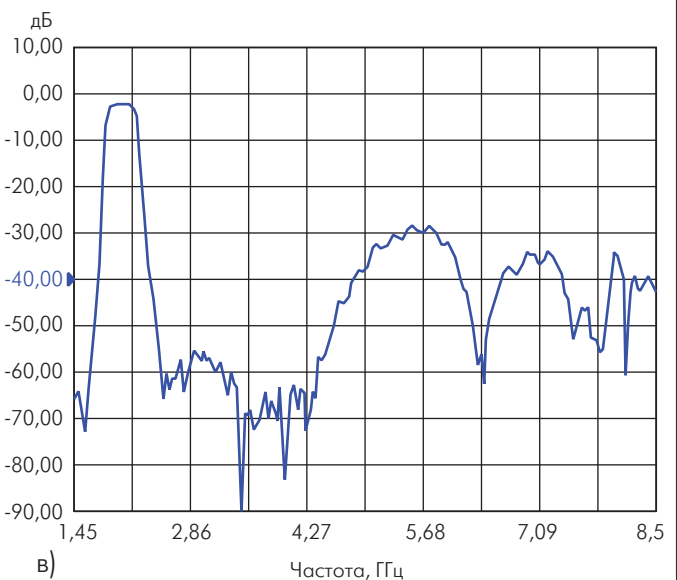
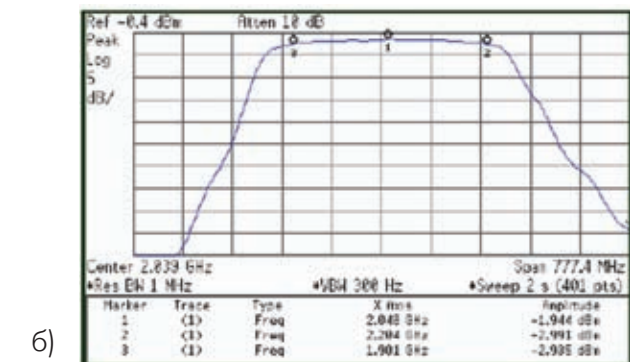
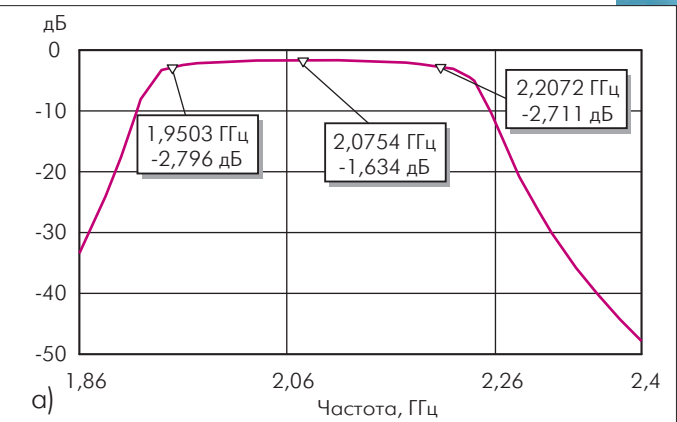


Рис.5. Расчетная (а) и измеренная в полосе пропускания (б) и в полосе заграждения (в) АЧХ фильтра на спиральных резонаторах

таком устройстве благодаря магнитной связи между витками обеспечивается требуемое значение индуктивности при меньших, чем в планарных конструкциях, габаритах [1]. Размер фильтра с полосой пропускания 1,9–2,2 ГГц по уровню 3 дБ составляет 16х4х2 мм. Подложка его набрана из девяти слоев керамики Du Pont Green Tape™, 951PX толщиной 0,216 мм в обожженном виде. Результаты измерения АЧХ фильтра показали достаточно высокую степень соответствия расчетным данным (рис.5 а,б).

Габариты аналогичного фильтра с полосой пропускания 1,14–1,4 ГГц по уровню 3дБ – 16х6х2 мм. Фильтры этого типа

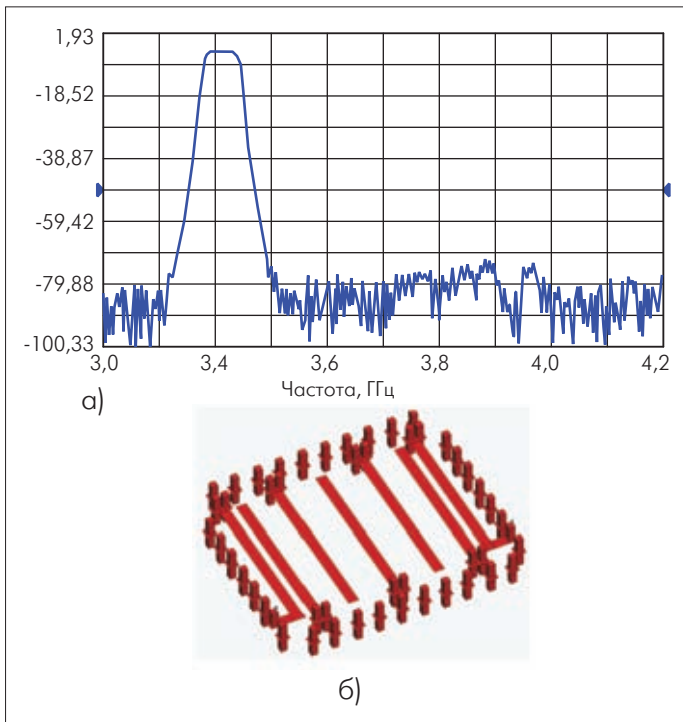


Рис.6. АЧХ (а) и трехмерная структура (б) ППФ с низкими потерями на связанных линиях

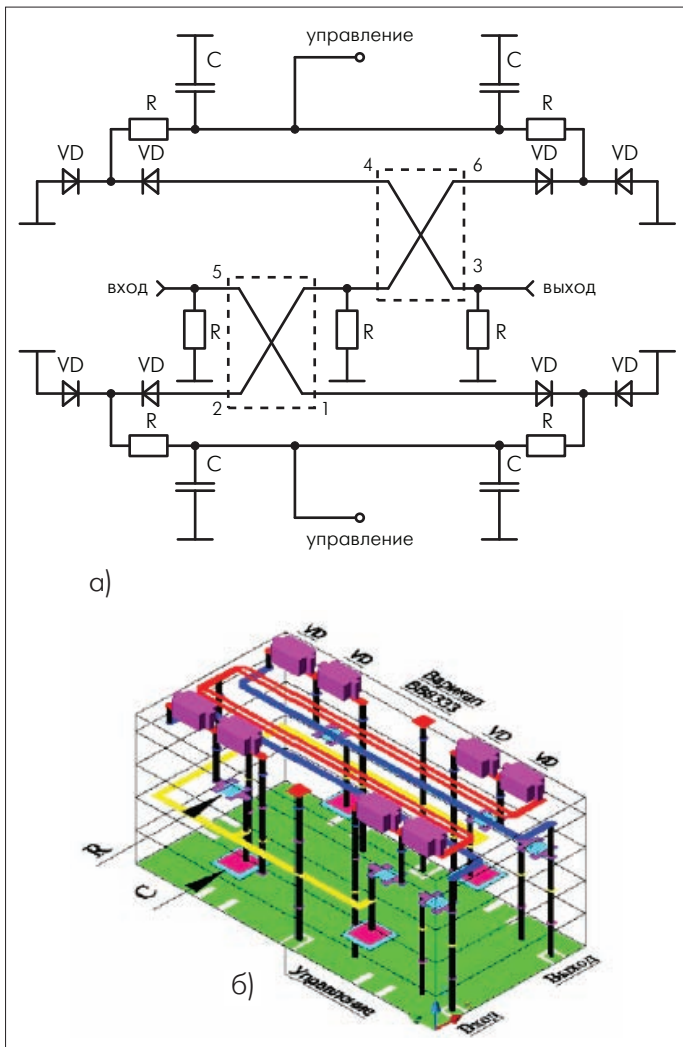


Рис.7. Эквивалентная электрическая схема (а) и трехмерная структура (б) ФВ с навесными компонентами и внутренними (скрытыми) пассивными элементами

находят применение в малогабаритных преобразователях СВЧ-сигналов.

ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР С НИЗКИМИ ПОТЕРЯМИ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ DU PONT GREEN TAPE™, 943

В ряде случаев необходимо уменьшать проходные потери фильтров, например при использовании их на входе приемников сигналов. Решить эту задачу позволяют фильтры на симметричных линиях с минимально возможными потерями в полосе пропускания. Выполнение этого требования во многом определяется выбором материала и технологией производства. Поэтому для снижения потерь фильтра в полосе пропускания керамика марки Du Pont Green Tape™, 951 с $\epsilon_r = 7,8$ и $\text{tg } \Delta = 0,0015951$, использовавшаяся в ранее описанных устройствах, заменена керамикой Du Pont Low Loss Green Tape™, 943 с $\epsilon_r = 7,5$ и $\text{tg } \Delta = 0,001$. На основе этой керамики был рассчитан и изготовлен фильтр на частоту 3430 МГц с полосой 100 МГц по уровню 3 дБ. По своей структуре фильтр, выполненный на связанных полосковых линиях, аналогичен описанному ранее фильтру [2] на частоту 2,7 ГГц с заземлением резонаторов через металлизированные отверстия. В качестве торцевого экрана применена так называемая радиочастотная стена, состоящая из ряда металлизированных отверстий, которые соединяют верхнюю и нижнюю металлизированные поверхности фильтра (рис.6). Размеры ППФ – 10,5x12,8x1,6 мм. Подложка набрана из восьми слоев керамики Du Pont Green Tape™, 943: два слоя 943P5 толщиной 0,114 мм и шесть слоев 943PX толщиной 0,228 мм в обожженном виде.

Благодаря применению керамики Du Pont Green Tape™, 943 потери в полосе пропускания уменьшились на 2 дБ по сравнению с фильтром на основе керамики Du Pont Green Tape™, 951 (минимальные потери 4 дБ против 6 дБ). Расчет и оптимизация характеристик всех фильтров производились с помощью подпрограммы EM-Sight, входящей в пакет программ Microwave Office.

ПЛАВНЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

В устройствах суммирования сигналов и различных модуляторах широко используются СВЧ-фазовращатели (ФВ). В ФВ

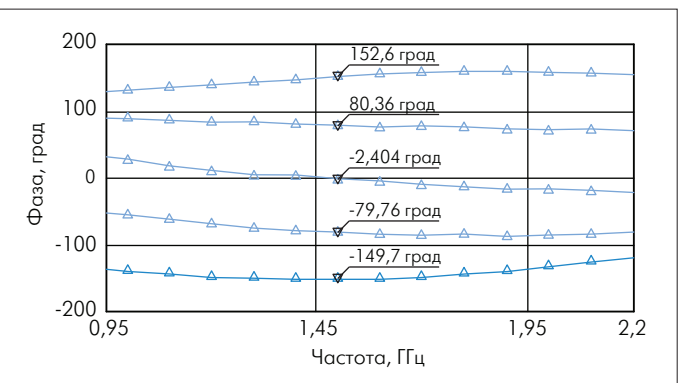


Рис.8. Расчетное изменение фазы сигнала, проходящего через ФВ, при изменении напряжения на варикапах

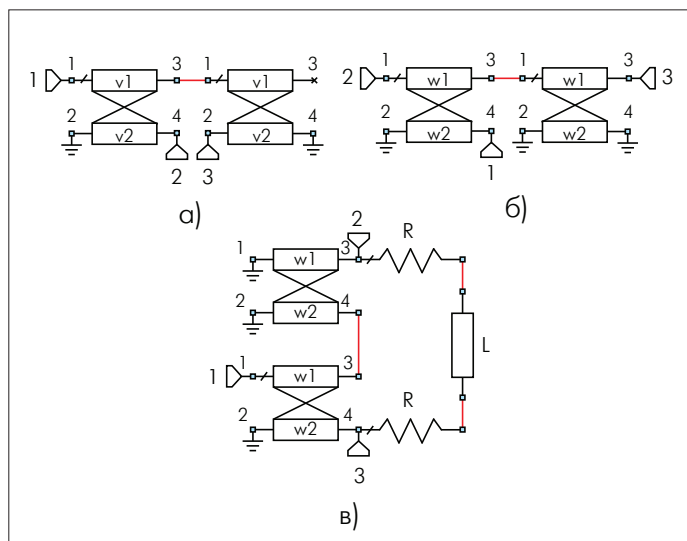


Рис.9. Схемы ПУДС Марчанда с отрезком в режиме холостого хода (а), без отрезка в режиме холостого хода (б) и модифицированная с диссипативным элементом (в)

с высоким фактором качества целесообразно выполнять управляющий элемент на основе варикапов или р-і-п диодов [3]. В РНИИРС разработан плавный фазовращатель на варикапах, структура которого при применении р-і-п-диодов может быть использована для реализации дискретных ФВ. Если ФВ проходящего СВЧ-сигнала не должен создавать отраженных волн во всем диапазоне регулирования фазы, в его состав вводят мостовое соединение, которое обладает свойством согласованности. Это значит, что при использовании в качестве мостового соединения квадратурного направленного ответвителя (КНО) с лицевой связью и широкой рабочей полосой, при подключении комплексных, но одинаковых нагрузок к выходам КНО и при нагрузке его развязанного выхода на согласованную нагрузку, вход его будет согласован. Фазовый сдвиг сигналов получают за счет изменения коэффициента отражения нагрузок [4]. Такой фазовращатель проходного типа реализован в объеме многослойной подложки по технологии LTCC. При проектировании ФВ вначале с помощью подпрограммы EM-Sight была рассчитана S-матрица КНО. Далее расчет проводился с помощью подпрограммы Schematics, также входящей в пакет программ Microwave Office, с учетом полной схемы ФВ с КНО, варикапами VD и пассивными элементами (рис. 7а). В конструкции фазовращателя пассивные элементы (резисторы, конденсаторы) интегрированы в объем многослойной подложки (рис. 7б). Подложка набиралась из одного слоя керамики 951PT толщиной 0,14 мм и четырех слоев 951PX толщиной 0,216 мм в обожженном виде. Для изготовления резисторов во внутренних слоях использовалась резистивная паста CF041 с удельным сопротивлением 10 кОм/кв. Диэлектрик внутренних конденсаторов изготовлен на основе конденсаторной пасты 5674 с $\epsilon_r = 60-80$, обкладки – на основе проводниковой пасты 6148. Расчеты параметров образцов ФВ показали, что при изменении управляющего напряжения варикапов от 0,5 до 15

В изменение фазы может достигать 300 градусов (рис.8). Габариты фазовращателя – $20 \times 10 \times 1$ мм.

ПРОТИВОФАЗНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

В СВЧ-схемотехнике широко используются синфазные, квадратурные и противофазные устройства деления-суммирования мощности [5]. Так, в усилителях и смесителях СВЧ противофазные устройства деления-суммирования (ПУДС) мощности позволяют улучшить рабочие характеристики и технологичность конструкции [6]. Сложнее всего практически реализовать широкополосные ПУДС. Это связано с тем, что при расширении рабочего диапазона частот приходится усложнять схему, что может привести к увеличению габаритов и ухудшению технических параметров. Различают ПУДС, выполненные на сосредоточенных, квазисосредоточенных и распределенных элементах. Среди схем на распределенных элементах популярна схема Марчанда, реализованная на двух отрезках четвертьволновых связанных линий (рис.9а). Находит применение и модифицированная схема Марчанда, в которой отсутствует отрезок, находящийся в режиме холостого хода (рис.9б). Недостаток данных схем – большие габариты ПУДС. Поэтому было предложено свернуть ПУДС Марчанда в мандр [7]. Практический интерес представляют 3-дБ ПУДС, позволяющие минимизировать проходные потери. Чтобы обеспечить сильную 3-дБ связь, предлагается использовать

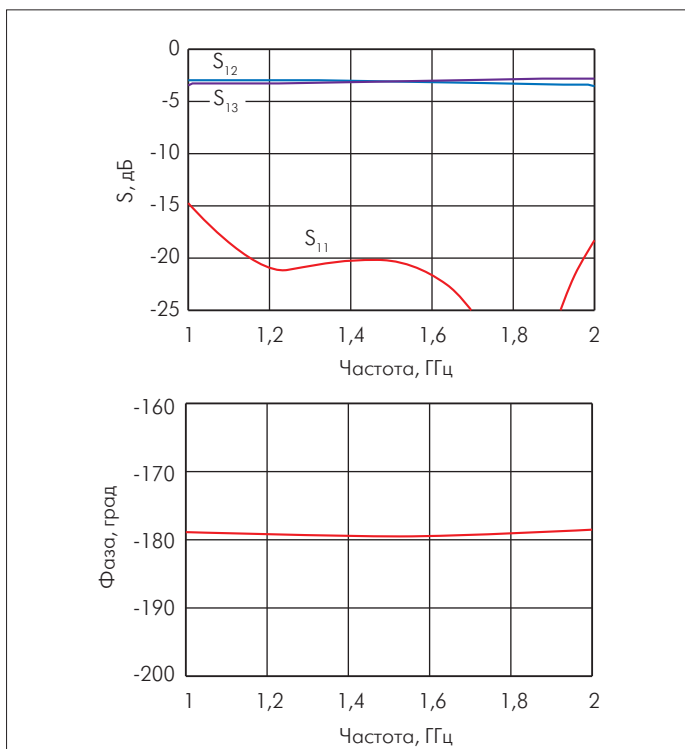


Рис. 10. Амплитудные (а) и фазовые (б) характеристики ПУДС, выполненного по схеме рис.9а

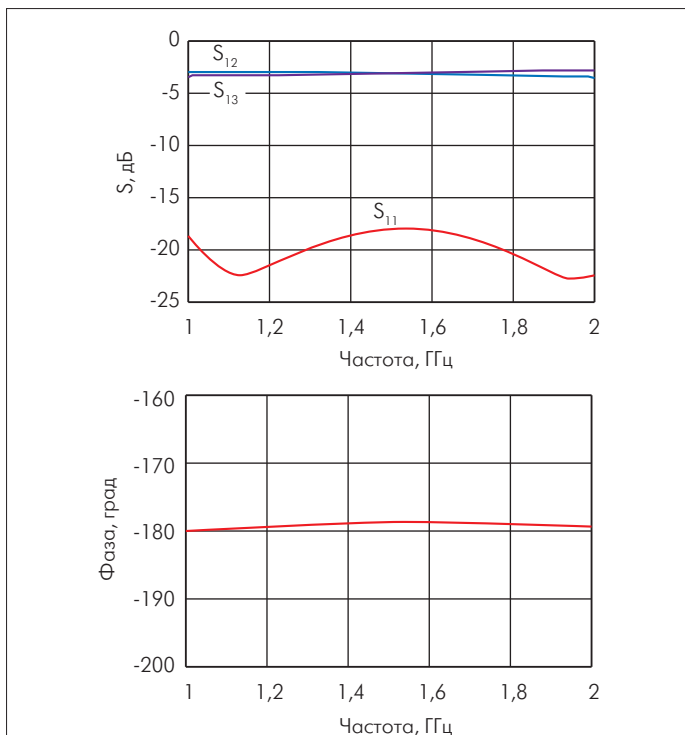


Рис. 11. Амплитудные (а) и фазовые (б) характеристики ПУДС, выполненного по схеме рис.9б

лицевую связь, реализуемую на многослойных структурах, изготавливаемых по технологии LTCC.

Известно, что шестиполусные устройства невозможно согласовать одновременно по всем портам – для этого требуется введение диссипативного элемента. В модифицированную схему Марчанда [8] был введен такой диссипативный элемент, состоящий из резисторов R и отрезка линии передачи длиной

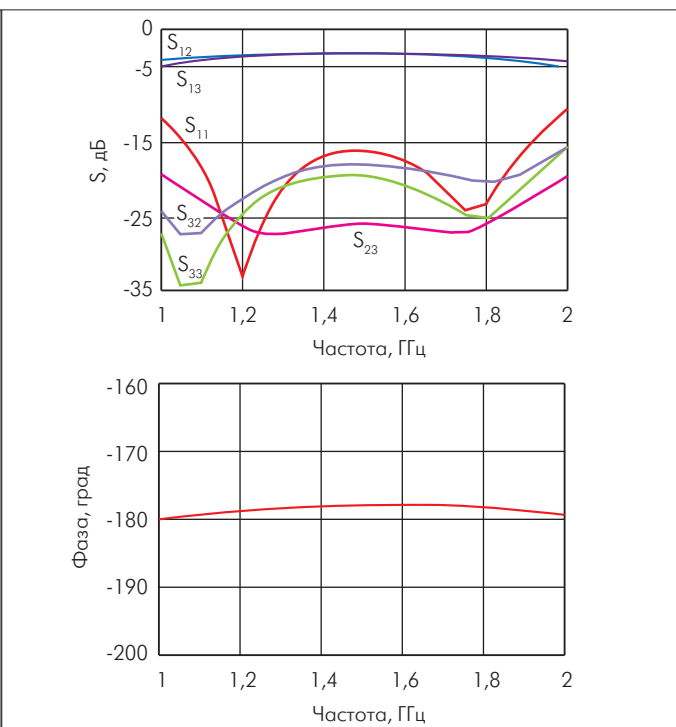


Рис. 12. Амплитудные (а) и фазовые (б) характеристики ПУДС, выполненного по схеме рис.9в

$L = \lambda/2$ (рис. 9в). Вместо полуволнового шлейфа можно использовать отрезок короткозамкнутых связанных линий.

Для анализа рассмотренных схем были изготовлены несколько макетов широкополосных ПУДС на отрезках связанных четвертьволновых линий (рис.9а,б,в). Технические характеристики полученных ПУДС представлены на рис. 10–12.

Схемы Марчанда без диссипативного элемента имеют схожие характеристики: их амплитудный разбаланс незначителен – 0,3 дБ, коэффициент отражения согласованного порта 1 составляет -15 дБ (КСВН 1,42), фазовый разбаланс – $180 \pm 3^\circ$, диссипативные потери – не более 1 дБ.

Важное достоинство модернизированной схемы Марчанда (рис.9в), свернутой в меандр с подключенным к плечам 2 и 3 через резисторы полуволновым шлейфом, – возможность согласования всех портов одновременно с развязкой между портами 2 и 3. ПУДС, реализованный по этой схеме, имеет следующие характеристики:

Амплитудный разбаланс	0,4 дБ
Коэффициент отражения	
порта 1	-11 дБ
портов 2 и 3	16 дБ
Фазовый разбаланс	$\pm 4^\circ$
Диссипативные потери	не более 1,5 дБ
Развязка	не менее 18 дБ

ПУДС по схемам Марчанда выполнены в объеме многослойной подложки, набранной из керамики Du Pont Green Tape, 951 – один слой 951РТ толщиной 0,14 мм и четыре слоя 951РХ толщиной 0,216 мм в обожженном виде. Габариты ПУДС составляют 24x10x1 мм.

Результаты проделанной работы показали, что технология LTCC позволяет реализовывать 3-дБ ПУДС, которые служат ба-



зовыми элементами для построения сложных многофункциональных СВЧ-устройств.

В предложенной читателям серии статей были представлены разработанные и изготовленные по технологии LTCC на производственной технологической базе ФГУП "РНИИРС" аналоговые устройства и узлы СВЧ-диапазона. Полученные экспериментальные результаты с высокой точностью совпадают с теоретическими расчетами. Это подтверждает правильность принятых схемных и технологических решений. Достигнутый уровень освоения технологии LTCC позволяет изготавливать интегрированные многофункциональные многослойные СВЧ-модули с высокой повторяемостью характеристик по техническому заданию или по документации заказчика.

Сейчас во ФГУП "РНИИРС" ведутся работы по проектированию и изготовлению по технологии LTCC аналогово-цифровых и цифровых многослойных керамических интегральных схем, а также многокристальных модулей (МКМ). С результатами этих работ планируется ознакомить читателей в следующем году.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Bahl. Lumped Elements for RF and microwave circuits. – Norwood, M. A. Artech House, 2003, p. 488.

2. Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №5, с.60–65.

3. Холодняк Д.В., Зубко С. П., Плескачев В.В., Никольский Н.А., Ситникова Н.Ф., Вендик И.Б. Сравнение интегральных СВЧ-фазовращателей на основе критерия качества. 14-я международная крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, 13–14 сентября, 2004.

4. Капкин С.П., Стельмахович Л.А. Некоторые варианты перестраиваемых фазовращателей. – Общие вопросы радиоэлектроники: ФГУП "РНИИРС", 2006, вып.1.

5. Кузовкин И.Н., Петров А.С. Миниатюрные СВЧ-устройства деления суммирования мощности. – Успехи современной радиоэлектроники, 2004, №12, с.12–46.

6. Robertson I.D., Lucyszyn S. RFIC and MMIC design and technology. – London: The Institution of Electrical Engineers, 2001.

7. M.C.Tsai. A New Compact Wideband Balun. – IEEE MTT-S Digest, 1993, p.123–125.

8. K. S. Ang, I. D. Robertson. Analysis and Design of Impedance-Transforming Planar Marchand Baluns. – IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Feb. 2001, v.49, No.2, p.402-406.