

А. А. ГЛУБОКОВ, Д. Б. БОНДАРЬ, к. т. н. Б. Н. ШЕЛКОВНИКОВ

Украина, г. Киев, НТУУ "Киевский политехнический институт"  
E-mail: alglubokov@mail.ru, bshelk@inbox.ru

Дата поступления в редакцию  
28.07 2005 г. — 30.01 2006 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО  
(НПП "Сатурн", г. Киев)

## ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ТЕХНОЛОГИИ LTCC

*Представлены конструкции монолитных трансформаторов. Предлагается новая конструкция широкополосного интегрального балуна. Продемонстрирована работа балансного кольцевого смесителя с применением разработанных трансформаторов.*

В современном мире стремительно развиваются беспроводные системы связи в УВЧ- и СВЧ-диапазонах. К интегральным схемам, составляющим основную часть приемно-передающих устройств таких систем, и их элементам предъявляются все более высокие требования по стоимости и размерам. Основной вклад в размеры и стоимость смесителей и усилителей вносят катушки индуктивности и трансформаторы, составленные из них. Трансформаторы в смесителях необходимы для согласования сопротивлений, частотной избирательности и изоляции входов, а в усилителях мощности — для согласования каскадов усиления и их разделения по постоянному току.

Имеющиеся публикации в основном затрагивают варианты реализации монолитных трансформаторов в полупроводниковых технологиях ИС. Так, примеры использования трансформаторов в схемах мультиплексоров, усилителей мощности и смесителей, реализованных на кремниевой подложке, продемонстрированы в работах [1—3]. Некоторые топологии монолитных трансформаторов на кремнии и арсениде галлия представлены в [4—6]. Методы моделирования интегральных трансформаторов и разработки схем их замещения предложены в [5, 6]. В работах, которые описывают ИС в технологиях, использующих многослойную керамику, таких как LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic — «керамика, обжигаемая при низких температурах»), много внимания уделяется индуктивным элементам и балунам<sup>1</sup>. Однако работ, освещающих монолитные трансформаторы в LTCC, по мнению авторов, крайне мало. В настоящей статье предлагаются конструкции таких трансформаторов с выводом из средней точки, обеспечивающих трансформацию сопротивления 1:1 и 1:4 в частотном диапазоне 0,5—6 ГГц. Сделана попытка

<sup>1</sup>Балун — от англ. «balun» — balanced-to-unbalanced convertor; пассивный элемент, осуществляющий согласование несбалансированного входа с балансными выходами, сигналы на которых имеют одинаковые амплитуды и находятся в противофазе.

установить соответствие между их конструктивными параметрами и электрическими характеристиками на основании моделирования их топологий в САПР.

### Особенности конструирования трансформаторов в технологии LTCC

Технология LTCC позволяет реализовывать сложные многослойные структуры на основе керамики. Ее используют для создания интегральных модулей, применяемых в сотовой связи, локальных беспроводных сетях (2,4 и 5 ГГц), технологии Bluetooth. Упрощенная структура такого модуля показана на рис. 1.

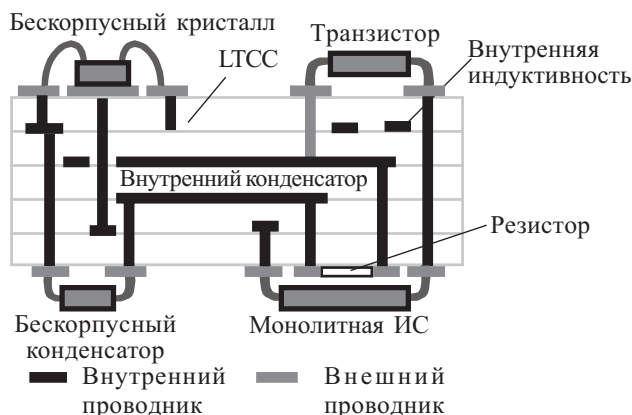


Рис. 1. Структура модуля LTCC

Как видно из рисунка, в LTCC возможны не только интеграция пассивных элементов, но и соединение с внешними пассивными и активными компонентами, ИС полупроводниковых технологий. Эта особенность технологии позволяет реализовывать т. н. системы в корпусе (system-on-package). Один из многочисленных вариантов LTCC, который используется в данной работе, предусматривает использование керамики DuPont System 951 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=7,8$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta=0,0062$ . Толщина керамического слоя — 90 мкм. В качестве проводника использовалось серебро. Толщина металлизации внутренних слоев структуры 8 мкм, верхнего слоя — 15 мкм. Минимально допустимая ширина полосы проводника — 150 мкм.

Здесь возникает резонный вопрос: зачем при современных жестких требованиях к миниатюризации использовать технологию с разрешающей способностью 150 мкм, в то время как кремниевая технология BiCMOS обладает минимум в 50 раз лучшей? Ответ

прост: LTCC выигрывает за счет использования большего количества слоев, меньшего сопротивления металлизации (что означает меньшие потери) и, что немаловажно, более низкой стоимости. Кроме того, компьютерное моделирование показывает, что площадь, занимаемая трансформаторами одного частотного диапазона (0,5—6 ГГц) в BiCMOS и рассматриваемыми в данной работе, отличается всего в 2—4 раза в пользу BiCMOS.

Работа трансформаторов основана на наличии магнитной связи между катушками индуктивности первичной и вторичной обмоток. Идеальный трансформатор обеспечивает изоляцию цепей по постоянному току, выполняет функции балуна, обеспечивает трансформацию сопротивлений, при этом являясь пассивным элементом и не потребляя мощности. Реальный трансформатор, вообще говоря, может не выполнять некоторые из этих функций, в том числе выполнять в ограниченном частотном диапазоне. Авторы решили ориентироваться на функцию балуна как основную, т. к. тестирование исследуемых устройств предполагалось производить в схеме кольцевого балансного смесителя. Поэтому трансформаторы, описанные ниже, рассматриваются как 5-портовые устройства с выводом из средней точки вторичной обмотки (рис. 2). Предполагалось, что функция балуна реализуется при заземлении одного из выводов первичной обмотки и вывода из средней точки вторичной. При этом сигнал подается на свободный вход первичной обмотки и снимается с балансных выводов вторичной.

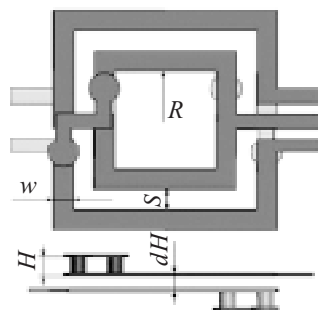


Рис. 2. Топология трансформатора Tr1 с выводом из средней точки вторичной обмотки (указаны конструктивные параметры)

Очевидно, что для реализации широкой рабочей полосы трансформатора необходимо обеспечить высокий коэффициент индуктивной связи между катушками. В общем случае это достигается либо увеличением количества витков в катушках, либо уменьшением расстояния между ними. Первый способ сопровождается увеличением размеров устройства (для индуктивностей в LTCC он приемлем до тех пор, пока размеры трансформатора не превысят граничных). Второй способ вызывает увеличение паразитной емкости. В LTCC второй способ реализуется только использованием вертикально связанных катушек индуктивности, когда катушки находятся одна под другой в смежных слоях (см. рис. 2). К сожалению, при этом рассмотренная выше схема балуна будет работать только в очень узкой полосе частот (что, кроме прочего, требует настроенных конденсаторов). Это объясняется тем, что паразитные емкости по-разному влияют на сигнал на выходах вторичной обмотки, т. к. симмет-

рия схемы нарушена заземлением вывода первичной обмотки.

Тем не менее такие трансформаторы можно рассматривать при дифференциальном включении, т. е. в балансных цепях. Действительно, если входной сигнал подавать между выводами первичной обмотки, то между соответствующими им выводами вторичной и выводом из средней точки можно снимать сигналы, находящиеся в противофазе. Трансформаторы, используемые в таком включении, будем далее называть дифференциальными.

Вопрос о конструировании широкополосного балуна как 3-портового устройства в LTCC будет рассмотрен ниже в разделе "Балун".

### Параметры и характеристики трансформаторов

Для описания поведения дифференциальных трансформаторов и балунов в частотной области используется аппарат S-параметров. S-матрицы для обоих случаев будут выглядеть следующим образом:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

Отличие заключается в следующем: для дифференциальных трансформаторов применяется аппарат S-параметров для дифференциальных мод, соответствующих дифференциальным портам. Матрица S-параметров для дифференциальных мод является составной частью матрицы S-параметров для смешанных мод и описана в [7].

Из полученной при моделировании S-матрицы можно извлечь несколько параметров трансформаторов. Нами рассматриваются абсолютная полоса пропускания  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , измеряемая на уровне  $-6$  дБ коэффициента передачи трансформатора  $S_{21}$  (или  $S_{31}$ ), ширина полосы пропускания  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ , относительная ширина полосы пропускания  $\Delta f_{\text{отн}}$  как отношение ширины полосы пропускания к центральной частоте полосы пропускания:

$$\Delta f_{\text{отн}} = \frac{\Delta f}{f_{\text{cp}}}, \quad (1)$$

где

$$f_{\text{cp}} = \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2}. \quad (2)$$

Другими важными параметрами являются площадь, занимаемая трансформатором, и коэффициент индуктивной связи  $k$ . Последний определяется из Z-параметров, полученных стандартным преобразованием из S-матрицы, следующим образом:

$$k = \frac{\text{Im}(Z_{21})}{\sqrt{\text{Im}(Z_{11})\text{Im}(Z_{22})}}. \quad (3)$$

### Варианты реализации дифференциальных трансформаторов

Дифференциальные трансформаторы должны обеспечивать малую несбалансированность на выходах вторичной обмотки, т. к. дисбаланс (отклонение амплитуд сигналов от равенства и разности фаз на

выходах вторичной обмотки от  $180^\circ$ ) приводит к негативным эффектам в цепи, в которой они используются. Для достижения высокого уровня балансировки упомянутых выходов необходимо учитывать условие симметричности первичной и вторичной обмоток друг относительно друга, а также относительно "земли".

Топологии трансформаторов были сконструированы в технологии LTCC в соответствии с изложенными выше правилами. Для удовлетворения обозначенных требований к симметрии в структуре была выбрана реализация трансформаторов на полосковых линиях.

С целью упрощения классификации и сравнения трансформаторов нами были введены их условные обозначения. Структуры трансформаторов обозначаются:

- по количеству витков  $N$  и  $M$  в первичной и вторичной обмотках, соответственно;
- по количеству витков в обмотке, которые приходится на один слой металлизации  $L$ ;
- по количеству слоев металлизации  $W$ , на которых располагаются витки первичной и вторичной обмоток, исключая слои, в которых располагаются только межсоединения;
- по общему количеству керамических слоев  $U$ , используемых в структуре трансформатора (включая используемые для межсоединений).

Обозначение трансформатора выглядит как  $TN(\text{число})M(\text{число})L(\text{число})W(\text{число})U(\text{число})$ .

Рассмотрим детально несколько реализаций трансформаторов, их параметры и характеристики.

На рис. 2 представлена топология трансформатора  $TN2M2L2W2U5$  (далее Tr1) с выводом из средней точки вторичной обмотки. Трансформатор Tr1 состоит из двух симметричных катушек индуктивности квадратной формы, расположенных одна над другой. Каждая катушка индуктивности, а значит, первичная и вторичная обмотки, содержит по 2 витка. Такая топология позволяет осуществить вывод из средней точки на обеих обмотках. Трансформатор имеет коэффициент трансформации 1:1 и, таким образом, осуществляет трансформацию сопротивления 1:1.

На рис. 3 представлены типичные характеристики передачи трансформатора Tr1 — амплитуды  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{31}$  для следующих размеров трансформатора: ширина проводника  $w=200$  мкм, расстояние между витками  $s=100$  мкм, высота керамического слоя  $H=90$  мкм и внутренний размер (радиус)  $R=800$  мкм. Фазы  $S_{21}$  и  $S_{31}$ , характеризующие баланс выходов по

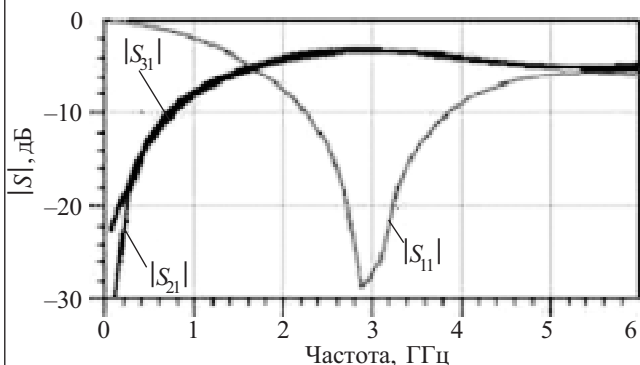


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика трансформатора Tr1

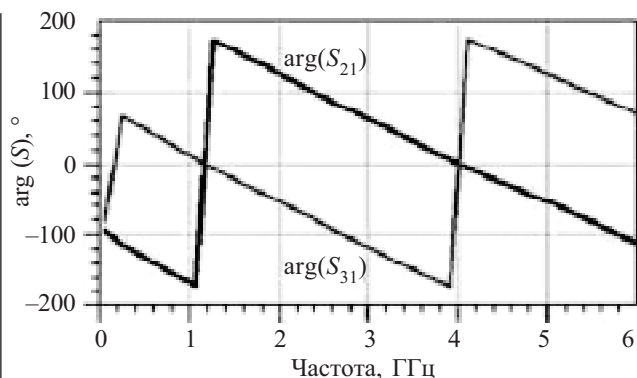


Рис. 4. Фазо-частотная характеристика трансформатора Tr1

фазе, показаны на рис. 4. Сопротивление нормирования портов выбрано равным 50 Ом.

Полоса пропускания этого трансформатора лежит в пределах 1,6—5,9 ГГц. Абсолютная ширина полосы пропускания составляет 4,3 ГГц, относительная — 1,147. Коэффициент индуктивной связи равен  $k=0,35$ . Площадь, занимаемая трансформатором, —  $2,8 \times 2,8$  мм<sup>2</sup>. Разбалансированность по фазе в полосе пропускания составляет не более  $2^\circ$ , по амплитуде — не более 0,5 дБ. Недостатком трансформатора Tr1 является относительно узкая полоса пропускания. Ее можно увеличить, настраивая обмотки трансформатора в резонанс при помощи конденсаторов. Однако используя такой подход, можно существенно увеличить площадь всего устройства, т. к. конденсаторы могут занимать площадь, сравнимую с площадью самого трансформатора. Поэтому для увеличения полосы пропускания удобнее увеличить количество витков в каждой из обмоток трансформатора.

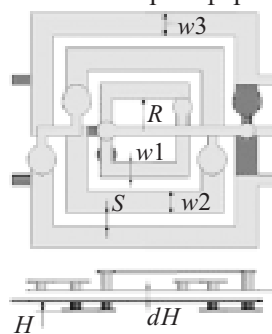


Рис. 5. Топология трансформатора Tr2 и его конструктивные параметры

На рис. 5 представлена топология трансформатора  $TN3M3L2W2U7$  (далее Tr2). Это аналог трансформатора Tr1, в котором добавлено по одному витку в каждую из обмоток для увеличения коэффициента индуктивной связи  $k$  и, следовательно, ширины полосы пропускания. На рис. 6 представлены его амплитудно-частотные характеристики.

При тех же параметрах конструкции трансформатор Tr2 обеспечивает полосу пропускания в пределах 0,55—3,9 ГГц. При значительном смещении полосы пропускания в сторону низких частот ее абсолютная ширина составляет 3,35 ГГц, относительная — 1,51. Коэффициент индуктивной связи увеличился до  $k=0,5$ . Площадь, занимаемая трансформатором, составляет  $2,2 \times 2,2$  мм<sup>2</sup>. Разбалансированность по фазе в полосе пропускания составляет не более  $2^\circ$ , по амплитуде — не более 0,5 дБ.

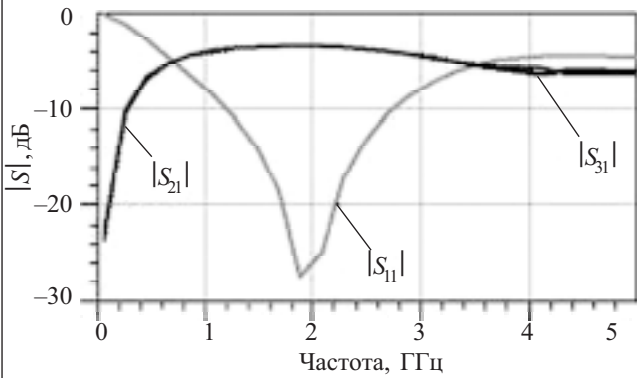


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика трансформатора Tr2

Для достижения коэффициента трансформации 1:4 нами был спроектирован трансформатор TN2M4L1W6U8 (далее Tr3). Его топология изображена на рис. 7. Он состоит из двух связанных винтовых катушек индуктивности прямоугольной формы, витки которых вертикально чередуются по слоям. В первичной обмотке располагаются два витка, во вторичной — четыре. На рис. 8 показаны амплитудно-частотные характеристики трансформатора Tr3 для следующих размеров: ширина проводника  $w=200$  мкм, высота керамического слоя  $H=90$  мкм, длина  $R_x=500$  мкм, ширина  $R_y=200$  мкм.

Данный трансформатор обладает полосой пропускания 1,5—2,4 ГГц. Абсолютная ширина полосы пропускания равна 0,9 ГГц, относительная — 0,49. Коэф-

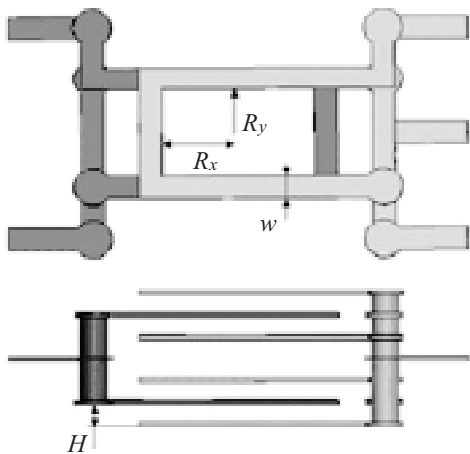


Рис. 7. Топология трансформатора Tr3

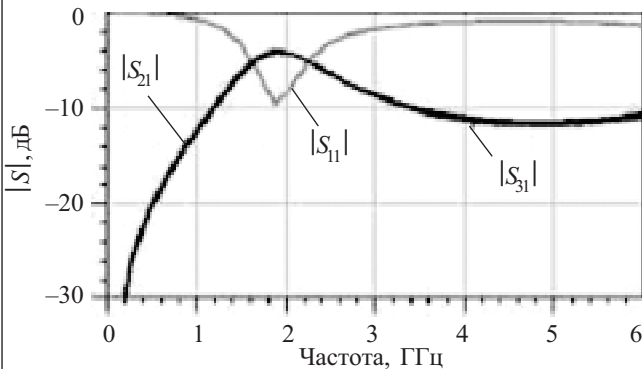


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика трансформатора Tr3

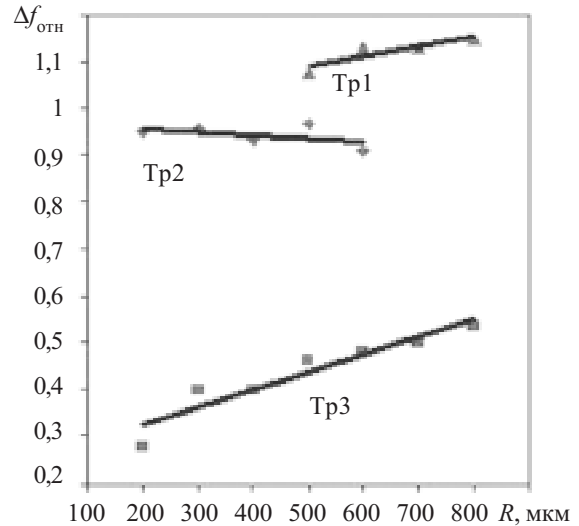


Рис. 9. Характеристики  $\Delta f_{\text{отн}}=f(R)$  для различной топологии трансформаторов

фициент индуктивной связи  $k=0,35$ . Площадь, занимаемая трансформатором Tr3, равна  $1,7 \times 0,8$  мм<sup>2</sup>. Малая площадь структуры была достигнута за счет использования вертикальной винтовой топологии обмоток. Достоинством трансформатора Tr3 являются небольшие размеры.

Для сравнения качественных показателей различных топологий трансформаторов были построены зависимости относительной полосы пропускания от внутреннего размера трансформатора  $\Delta f_{\text{отн}}=f(R)$ . Эти характеристики показаны на рис. 9.

### Балун

Балун применяется при построении балансных смесителей, усилителей, умножителей, антенных согласующих устройств и многих других. Существует множество различных конфигураций балунов. Ранее были предложены балуны-трансформаторы [8], активные балуны, балуны на сосредоточенных элементах, в том числе с использованием фильтров, балуны Марчанда (Marchand baluns) на связанных линиях [9—11]. Каждый из приведенных вариантов построения балуна имеет свои преимущества и недостатки. Балуны-трансформаторы обеспечивают развязку по постоянному току, однако сбалансированы в узкой полосе ввиду наличия емкостной связи между первичной и вторичной обмотками. Активные балуны обладают широкой полосой пропускания, но вносят шум и потребляют мощность. Балуны на сосредоточенных элементах имеют небольшие размеры, однако являются узкополосными. Благодаря своей простоте и сравнительной широкополосности в интегральных схемах LTCC наиболее распространен балун Марчанда. Основной его недостаток — большие размеры.

Простейший интегральный балун Марчанда состоит из двух пар связанных микрополосковых линий четвертьволновой длины  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волны, на которой сигналы на выходе балуна идеально сбалансированы (рис. 10). Несбалансированный вход подключен к открытой линии полуволновой длины, которая связана с двумя заземленными четвертьвол-

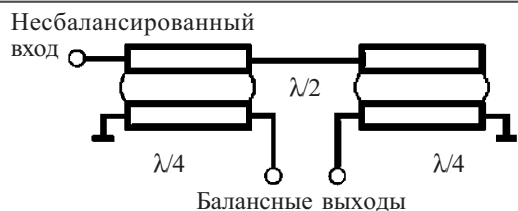


Рис. 10. Схема балуна Марчанда на связанных линиях новыми линиями. Свободные концы последних подключены к балансным выходам.

В чистом виде такую реализацию балуна удобно использовать в диапазоне миллиметровых волн, когда размеры элемента приблизительно равны длине волны. В приложениях сантиметрового диапазона, в которых требуется сравнительно узкая полоса и хорошая сбалансированность, могут использоваться связанные линии с длиной менее  $\lambda/4$ , однако для получения приемлемых характеристик балуна требуется применение конденсаторов, выполняющих функции подстройки, которые к тому же занимают значительную площадь.

Одним из путей решения проблемы размещения связанных линий является использование связанных линий в виде спиральных катушек. Такой подход позволяет уменьшить площадь, занимаемую балуном, а также увеличить коэффициент индуктивной связи  $k$  между связанными линиями. Анализ топологий связанных спиральных катушек, проведенный в [12], показал, что наилучшим для рассматриваемого случая является применение топологии связанных линий в виде вертикально расположенных соленоидов.

Связанные линии в виде вертикально расположенных соленоидов занимают малую площадь. Их коэффициент связи  $k$  достигает 0,6, вследствие чего полоса пропускания расширяется. Важным преимуществом связанных линий в виде вертикально расположенных соленоидов является уменьшение паразитной емкости между катушками и заземляющими пластинами.

На основе связанных линий в виде вертикально расположенных соленоидов нами был разработан балун Марчанда. Его внешний вид с указанием слоев и межслойных соединений показан на рис. 11. Структура была разработана для изготовления в технологии LTCC и оптимизирована для стандартного процесса с использованием керамики DuPont 951. Она состоит из восьми керамических слоев. Из соображений симметрии для сбалансированности структура была реализована с применением симметрич-

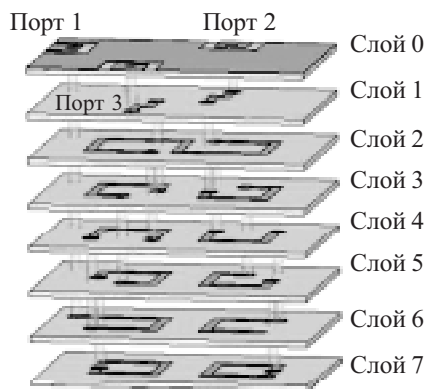


Рис. 11. Внешний вид балуна

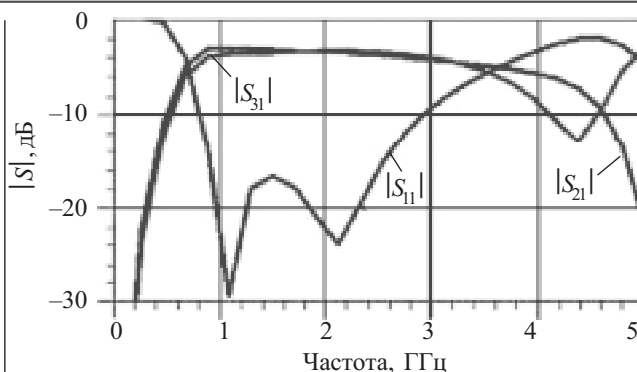


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика балуна

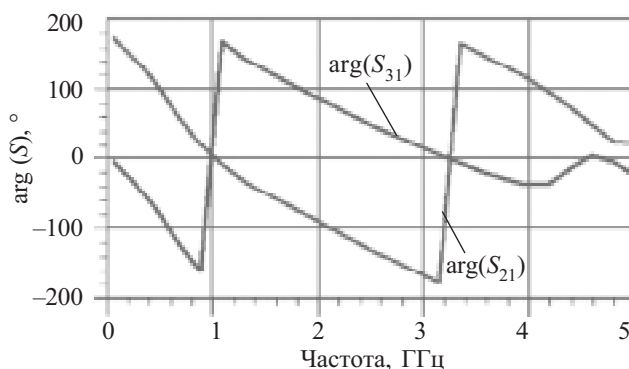


Рис. 13. Фазо-частотная характеристика балуна

ной полосковой линии. Внешние размеры полученной структуры составляют  $2,35 \times 4,3 \times 0,735$  мм.

Результаты машинного моделирования поведения балуна в частотной области при помощи САПР HFSS представлены на рис. 12 и 13. На рис. 12 изображена амплитудно-частотная характеристика балуна — зависимости амплитуд  $S$ -параметров  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{31}$  от частоты. Коэффициенты передачи  $S_{21}$  и  $S_{31}$  находятся в пределах от  $-6$  до  $-3,4$  дБ и показывают несбалансированность до  $0,8$  дБ в полосе от  $0,8$  до  $3,5$  ГГц. Таким образом, абсолютная ширина полосы пропускания равна  $2,7$  ГГц. Относительная ширина полосы пропускания составляет  $1,256$ . На рис. 13 изображена фазо-частотная характеристика балуна — зависимости фаз  $S_{21}$  и  $S_{31}$  от частоты. Фазы  $S_{21}$  и  $S_{31}$  в диапазоне от  $0,8$  до  $3,5$  ГГц зависят от частоты линейно. Несбалансированность по фазе в этом диапазоне составляет не более  $8^\circ$ .

### Тестирование трансформаторов в схеме кольцевого балансного смесителя

Дифференциальные трансформаторы и балун могут использоваться в схеме кольцевого балансного смесителя (рис. 14) для изоляции по постоянному

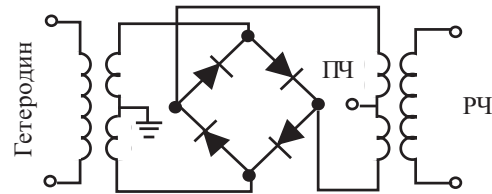


Рис. 14. Схема кольцевого балансного смесителя:

ПЧ — промежуточная частота; РЧ — радиочастота

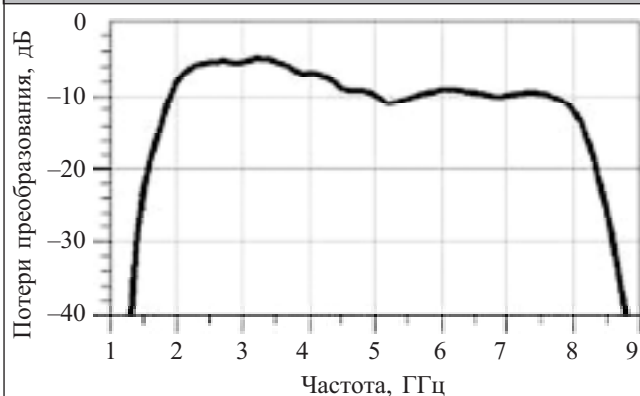


Рис. 15. Характеристика потерь преобразования смесителя с использованием Tr2

току и трансформации сопротивления. На рис. 15 представлена моделированная в САПР ADS частотная характеристика потерь преобразования балансного смесителя с использованием трансформатора Tr2 и балуна. Из рис. 15 можно видеть, что в полосе частот 2—4 ГГц потери преобразования смесителя составляют менее 8 дБ, а в полосе частот 1,8—8 ГГц — менее 11 дБ. Подобные характеристики получены для всех рассмотренных выше трансформаторов. Также исследовались другие характеристики смесителя: коэффициент шума, динамический диапазон, коэффициенты интермодуляции, межпортовые изоляции и др.

### Заключение

Таким образом, предложены конструкции монолитных трансформаторов, предназначенных для изготовления в технологии многослойной керамики LTCC. Они позволяют осуществлять трансформацию сопротивления с коэффициентами 1:1 и 1:4 с одновременной изоляцией цепей первичной и вторичной обмоток по постоянному току. Показана возможность создания конструкций трансформаторов с различной шириной полосы рабочих частот. Конструктор имеет возможность варьировать параметры трансформатора для достижения разумного компромисса между шириной полосы пропускания и геометрическими размерами проектируемого устройства.

Также предложена конструкция балуна, сконструированного на основе балуна Марчанда с применением топологии связанных линий в виде вертикально расположенных соленоидов. Он обладает широкой полосой пропускания, малыми размерами и обеспечивает дисбаланс выходов по амплитуде до 0,8 дБ и по фазе до 8° в рабочей полосе частот. Кроме этого, балун выполняет функции трансформатора — разделение цепей по постоянному току и трансформацию сопротивлений.

Применение трансформаторов в схеме кольцевого балансного смесителя позволило по ряду параметров, например, по широкополосности, превзойти существующие аналоги.

Рассмотренные трансформаторы и балун могут широко использоваться в смесителях, усилителях и прочих устройствах беспроводной связи, проектируемых в технологии LTCC.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kehrer D., Wohlmuth H.-D., Kienmayer C., Scholz A. L. A 1 V monolithic transformer-coupled 30-Gb/s 2:1 multiplexer in 120 nm CMOS // IEEE MTT-S Int. Microwave Simp. Dig.— Philadelphia, USA.— 2003.— P. 2261—2264.
2. Bakalski W., Simbürger W., Thüringer R. et al. A fully integrated 4.8-6 GHz power amplifier with on-chip output balun in 38 GHz- $\text{fT}$  Si-bipolar // Ibid.— 2003.— P. 695—698.
3. Wu P.-S., Tseng C.-H., Huang T.-W., Wang H. A singly balanced millimeter-wave mixer using a compact transformer // Proc. Asia Pacific Microwave Conf.— Seoul, Korea.— 2003.
4. Шелковников Б. Н., Бондарь Д. Б., Глубоков А. А. Моделирование монолитных планарных трансформаторов на подложке из GaAs // Мат-лы 14-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».— Севастополь, Украина.— 2004.— С. 16—19.
5. Kehrer D., Simbürger W., Wohlmuth H.-D., Scholz A. L. Design of monolithic lumped transformers in silicon-based technologies up to 20 GHz // IEEE Custom Integrated Circuits Conference CICC 2001.— San Diego.— 2001.— P. 401—404.
6. Baek D., Song T., Ko S. et al. Analysis on resonator coupling and its application to CMOS quadrature VCO at 8 GHz // IEEE MTT-S Int. Microwave Simp. Dig.— Philadelphia, USA.— 2003.— P. 85—88.
7. Eisenstadt W. R. Mixed-mode S-parameter theory // IEEE MTT-S Conf., Workshop Proc.— Philadelphia, USA.— 2003.
8. Глубоков А. А., Бондарь Д. Б., Шелковников Б. Н. Симметричные пассивные элементы для интегральных схем в технологии LTCC // Мат-лы 14-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».— Севастополь, Украина.— 2004.— С. 429—432.
9. Gavela I., Falagán M. A., Flühr H. A small size LTCC balun for wireless applications // 34th EuMC, Conf. Proc.— Amsterdam, The Netherlands.— 2004.— P. 373—376.
10. Bushyager N., Staiculescu D., Obatoyinbo A. et al. Optimization of 3D multilayer RF components using the design of experiments (DOE) technique // IEEE MTT-S Int. Microwave Simp. Dig.— Fort Worth, USA.— 2004.— P. 1859—1862.
11. Wu P.-S., Tseng C.-H., Lei M.-F. et al. Three-dimensional X-band new transformer balun configuration using the multilayer ceramic technologies // 34th EuMC, Conf. Proc.— Amsterdam, The Netherlands.— 2004.— P. 385—388.
12. Glubokov O. A., Shelkovnikov B. N. Broad band balun in LTCC technology using vertical solenoid coupled transmission lines // 7th International Conference on telecommunications in Modern Satellite. Cable and Broadcasting Services TELSIS.— Nis, Serbia and Montenegro.— 2005.— P. 452—455.