

# МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МИКРОСХЕМЫ

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СОВМЕСТНО ОБЖИГАЕМАЯ КЕРАМИКА

Технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC), используемая для изготовления многослойных плат на керамической основе, благодаря относительно низкой температуре обжига (850–875°C) позволяет применять в качестве проводников металлы с низким удельным сопротивлением (серебро, золото или композиции серебра с палладием и платиной) вместо вольфрама или молибдена, которые используются в технологии высокотемпературной совместно обжигаемой керамики HTCC (High Temperature Co-fire Ceramic) с температурой обжига выше 1000°C. Этим и объясняется интерес разработчиков многослойных керамических интегральных схем к LTCC-технологии. ФГУП "Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи" (РНИИРС) с 2002 года занимается разработкой и изготовлением многослойных керамических плат LTCC на основе керамики Green Tape (марка керамики компании Du Pont). Таким образом, предприятием накоплен определенный опыт в этой области, которым специалисты готовы поделиться с читателями журнала в серии статей.

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ LTCC

Технология LTCC предусматривает изготовление многослойных плат на керамической основе из отдельных листов, на которых предварительно сформированы металлизированные межслойные и теплоотводящие отверстия, элементы полостей и окон и методом трафаретной печати нанесены проводниковые, диэлектрические и резистивные элементы. Одиночные листы собираются в пакет, который подвергается опрессовке при определенных значениях температуры и давления. Если допуск на линейные размеры не критичен, собранный пакет может быть предварительно разделен на отдельные платы. Пакет или отдельные платы обжигаются в одном цикле. При повышенных требованиях к линейным размерам пакет разделяется на платы после обжига. Технология LTCC позволяет изготавливать внутренние (скрытые) пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности) в объеме модуля [1]. Резисторы могут быть сформированы как во внутренних, так и на внешних слоях.

В РНИИРС для изготовления многослойных керамических плат на основе LTCC Green Tape используется следующая производственно-технологическая база:



Г.Егоров, С.Капкин, Л.Стельмахович,  
В.Трофименков, В.Хрипко  
egoroww@mail.ru

- пневматическая установка натяжения сеток Sefar-2 (компания Sefar Holding);
- установка экспонирования ТПФ Siri-Combi-Lite 1100 (компания VochoNOW);
- установка проявления ТПФ SIRI-Entwicklungsanlage 1100 (компания VochoNOW);
- сверлильно-фрезерный станок Protomat H100 (компания LPKF);
- сверлильно-фрезерный станок XL2-24 LINEAR (компания Schmolli);
- установка трафаретной печати P-200A (компания КЕКО);
- установка проявления фотопаст SC-4 (компания Hibridas);
- модифицированный по техническому заданию РНИИРС под технологии FR-4 и LTCC вакуумный пресс RLKV-63 (компания Lauffer);
- изготовленный по техническому заданию РНИИРС лабораторный программируемый вакуумный пресс ВР-1 (ООО "Политехник-Сервис" совместно с ООО ХНТЦ "ГидроИмпульс", г. Азов);
- изготовленная по техническому заданию РНИИРС программируемая камерная печь (ООО "МИУС", г.Тула);
- установка резки алмазными дисками УРПУ-150-1М (ООО "АБАИР", г. Н.Новгород);
- конвейерные печи: QA-41-40 (ВТУ) и ПЭК-8 (Машинный завод, г. Чайковский);
- рентгеноскопическая установка PCBA ANALYZER 160T (компания Phoenix);
- автоматический тестер А-3 (компания АТG).

Это оборудование на данном этапе производства позволяет реализовывать платы со следующими характеристиками:

Число проводящих слоев	..... не более 40
Максимальный размер заготовки	..... 127×127 мм (5×5")
Максимальный размер платы	..... 100×100 мм
Разрешение проводник/зазор	
трафаретная печать	..... 150/150 мкм
фоточувствительные пасты	..... 50/50 мкм
Диапазон номиналов резисторов	
внутренних слоев	..... 5 Ом .. 50 кОм ±30%
наружных слоев	..... 5 Ом .. 5 МОм ±2%
Минимальный диаметр переходного отверстия	..... 150 мкм

Для изготовления многослойных керамических интегральных схем на основе LTCC применяется керамика Green Tape™ 951 с  $\epsilon_r = 7,8$  и серебряная система паст фирмы Du Pont. Толщина "сырых" заготовок керамических листов 951 P1 равна 0,114 мкм, 951 P2 – 0,165 мкм и 951 PX – 0,254 мкм [2]. В пакете возможны комбинации листов всех трех толщин. В качестве материала внутренних проводящих слоев применяются серебряные пасты 6142D, 6148 и фоточувствительная



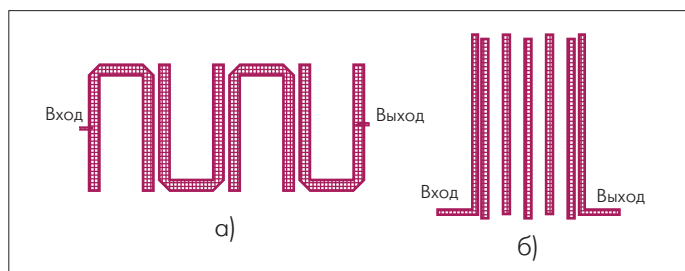
паста 6453, в качестве материала проводящих наружных слоев и слоев металлизации торцов – серебро-платиновая паста QS 171, прецизионных проводников – фотопасты 6778 и Q170P, получаемые по технологии Fodel компании Du Pont. Переходные отверстия заполняются серебряной пастой 6141. Для изготовления внутренних (скрытых) резисторов применяются пасты серии CF, наружных – серии QT-80.

### МНОГОСЛОЙНЫЕ УЗЛЫ И МОДУЛИ L-ДИАПАЗОНА НА ЭЛЕМЕНТАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ LTCC

Основное достоинство конструкции модулей на элементах с распределенными параметрами – сравнительно высокая добротность, главный недостаток – значительные габариты, обратно пропорциональные рабочей частоте. Технология LTCC, позволяющая формировать элементы малых размеров с достаточно высокой технологичностью, хорошо подходит для изготовления объемных СВЧ-структур. Рассмотрим результаты разработок и исследований многослойных СВЧ-узлов и модулей L-диапазона на элементах с распределенными параметрами, изготовленных по технологии LTCC.

#### Фильтры на симметричных линиях

Ужесточение требований к техническим характеристикам СВЧ-приемных устройств накладывает определенные условия на параметры таких элементов, как фильтры. Необходимо обеспечивать хорошее согласование входа и выхода фильтра в рабочем диапазоне частот при одновременном уменьшении его размеров и снижении затрат на изготовление и настройку. Этим требованиям отвечают фильтры на симметричных линиях, основные достоинства которых – большое значение коэффициента затухания за полосой пропускания, что объясняется отсутствием поверхностных волн и равенством фазовых скоростей четных и нечетных волн в связанных линиях; малые габариты и значительное снижение влияния корпуса на параметры фильтра, поскольку элементы фильтра экранированы.



**Рис. 1. Структура фильтров на элементах с распределенными параметрами, изготовленных по LTCC-технологии, на частоту 1500 МГц (а) и 1300 МГц (б)**

В ФГУП РНИИРС в результате проработки схемно-конструктивных решений были успешно реализованы фильтры на симметричных линиях (рис. 1а, б). Расчет и оптимизация характеристик фильтров производились с помощью подпрограммы EM-Sight, входящей в пакет программ Microwave Office. Фильтр, представленный на рис. 1а, рассчитан на частоту 1500 МГц, ширина его полосы по уровню 1 дБ – 30 МГц, минимальные потери – 4,5 дБ, КСВН в полосе пропускания – не более 1,5. Характерная особенность этой структуры – снижение влияния паразитных элементов благодаря отсутствию точек короткого замыкания на корпус, воздействующих на потери и на резонансные частоты.

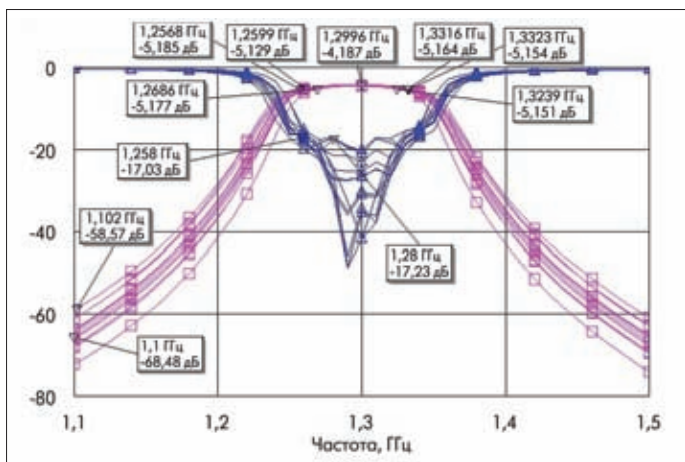
Расчетная половинная толщина диэлектрика была принята равной 0,864 мм. Подложка набиралась из четырех слоев керамики 951 РХ толщиной 254 мкм (216 мкм после обжига).

Для оценки технологии в едином технологическом цикле была изготовлена пробная партия из шести фильтров. Все фильтры имели одинаковые электрические характеристики в пределах точности измерения. Отклонение центральной частоты фильтра от расчетной было равно 0,7% (1510 МГц вместо расчетной 1500 МГц), полоса пропускания по уровню 1 дБ – 27 МГц, КСВН в полосе пропускания – не более 1,3. Исследование полученных структур показало, что толщина подложки оказывает существенное влияние на ширину полосы пропускания, а отклонение длины резонаторов от номинального значения вызывает смещение центральной частоты от расчетной. Значение допуска на резку пакета после обжига в пределах до  $\pm 65$  мкм не приводит к искажению характеристик фильтра данной структуры. Влияние отклонения диэлектрической проницаемости подложки не исследовалось.

Согласно полученным данным, при точности изготовления топологических элементов фильтра такой структуры  $\pm 10$  мкм обеспечивает удовлетворительный результат: выход годных был близок к 90%.

Структура фильтра пятого порядка на частоту 1300 МГц и ширину полосы пропускания по уровню 1 дБ – 20, 40, 60, 100 и 200 МГц (рис. 1б) рассчитывалась для тех же подложек, что и предыдущая структура. Измерения параметров фильтров показали, что точность изготовления структуры ( $\pm 10$  мкм) практически не приводит к сдвигу центральной частоты, которая на всех полосах пропускания была равна 1299–1303 МГц. Согласно оценке, собственная добротность резонатора составила 150.

Для фильтров с полосами пропускания 100 и 200 МГц технологические погрешности изготовления линейных размеров структуры не привели к рассогласованию, и КСВН в полосе пропускания не превышал 1,4. Для фильтров с более узкой полосой пропускания изменение



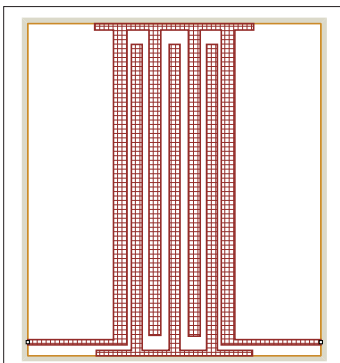
**Рис.2. АЧХ (красные линии) и КСВН (синие линии) фильтров при технологическом допуске на размеры топологии ±10 мкм**

размеров в пределах ±10 мкм приводило к ухудшению КСВН в полосе пропускания до 1,5. Технологический допуск на отклонение ширины полосы пропускания от расчетной составил 9% при разбросе толщины подложки в пределах 3%. Допуск на резку пакета после обжига более ±65 мкм вызывал искажение характеристик фильтра – в полосе пропускания из-за нарушения симметрии структуры появлялся характерный выброс по КСВН, превышающий 2.

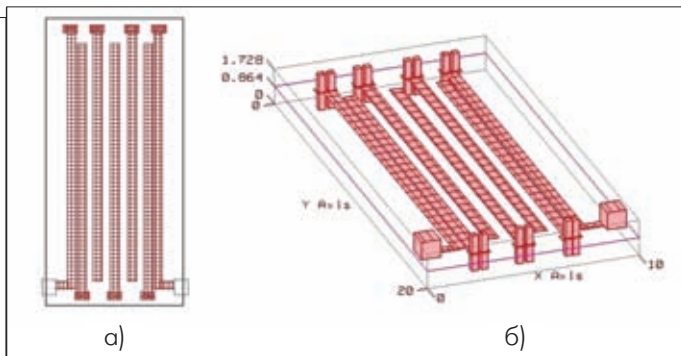
Результаты испытаний фильтров выявили возможность изменения толщины подложки в пределах ±5%, при этом КСВН фильтра не превысил 1,5, а изменение полосы пропускания находилось в пределах ±15%. На рис.2 показаны разброс АЧХ и КСВН фильтра на частоту 1300 МГц с шириной полосы пропускания 60 ±10 МГц по уровню 1 дБ при технологическом допуске ±10 мкм на зазоры и ширину полосковых линий. Из графика видно, что изменение ширины полосы пропускания находится в пределах 55–70 МГц.

Влияние точности изготовления фильтров проверялось на структуре седьмого порядка, подобной структуре фильтра пятого порядка, приведенной на рис. 1б. Результаты испытаний показали, что чувствительность фильтров седьмого порядка к качеству заземления резонаторов и точности выдержки расстояния между резонаторами и краями платы выше. Выход годных фильтров со структурой седьмого порядка составил ~70%.

Чтобы снизить влияние качества изготовления точек заземления резонаторов на характеристики фильтра, в структуру введены дополнительные полосы заземления (рис.3). Были изготовлены четыре типа таких фильтров, по 50 шт. каждого номинала: на частоту 1255 и 2755 МГц с шириной полосы пропускания 150 МГц по уровню 3 дБ с минимальными потерями в полосе 3,7 и 6,3 дБ, соответственно, и широкополосные с полосой пропускания от 2420 до 3100 МГц и от 1310 до 1870 МГц по уровню 3 дБ с минимальными потерями в полосе 1,5 дБ. Измерения параметров фильтров показали, что у свыше 92% фильтров КСВН ниже 1,8, а у более 80% КСВН ниже расчетного значения 1,6. Отклонение размеров структуры от нормы тем сильнее влияет на характеристики фильтров, чем выше частота. Следовательно, с ростом частоты снижается и выход годных фильтров.



**Рис.3. Структура фильтра с дополнительными полосами заземления**



**Рис.4. Топология фильтра на диапазон свыше 2 ГГц с заземлением резонаторов через металлизированные отверстия (а) и его трехмерное изображение (б)**

Чтобы исключить влияние точности резки на разброс параметров фильтров, рассчитанных на диапазон свыше 2 ГГц, предложена конструкция фильтра с заземлением через металлизированные отверстия (рис.4). Такая конструкция допускает резку общей заготовки на отдельные фильтры с большим допуском.

Параметры фильтров такой конструкции показали высокое соответствие расчетным значениям – выход годных их составил ~97%: в партии из 40 штук (один пакет) только у одного фильтра КСВН в полосе пропускания превысил 1,6.

Одно из достоинств фильтров на симметричных линиях – малые габариты и хорошая электромагнитная защищенность конструкции. Габариты фильтров в зависимости от частотного диапазона составляют 30x20x1,8 мм (см. рис.1а); 22x21x1,8 мм (см. рис.1б); 10x18x2 мм (см. рис.3). Таким образом, технология LTCC позволяет создавать малогабаритные монолитные фильтры на симметричных линиях, не требующие настройки. При этом при изготовлении фильтров с полосой пропускания менее 5% для обеспечения воспроизводимости параметров и максимального совпадения их с расчетными значениями требования к стабильности и точности технологии ужесточаются.

**Направленные ответвители**

В балансных усилителях, смесителях, мостовых устройствах управления фазой и амплитудой, многоканальных устройствах распределения мощности и т. п. широкое применение находят 3-дБ направленные ответвители (НО). Такие устройства L-диапазона обычно реализуются на основе связанных микрополосковых линий (МПЛ) с боковой связью. Это требует применения встречно-штыревой структуры (ответвители Ланге) или тандемного соединения двух НО со слабой связью. По-видимому, влияние технологических допусков на характеристики НО L-диапазона такой сложной структуры может быть снижено за счет реализации ответвителя на связанных фронтально отрезках линий передачи. Малая зависимость параметров от допусков может быть достигнута с помощью LTCC- технологии, обеспечивающей сравнительно высокую точность совмещения проводящих и диэлектрических керамических слоев.

Основы анализа и синтеза НО на связанных линиях изложены в большом числе работ, в частности в литературе [3,4]. Разработчиками ФГУП РНИИРС за основу был взят один из алгоритмов расчета и построения НО с лицевой связью, описанный в работе [5]. Для расчета электрических характеристик и геометрических размеров 3-дБ НО на связанных линиях с лицевой связью использовалась программа IE3D 10.2 компании Zeland Software, в основу которой положены модели электродинамического уровня строгости. Программа предназначена для электродинамического анализа различных МПЛ-структур, а также сложных многослойных структур. Она позволяет вводить в конструкцию металлизированные отверстия для перехо-

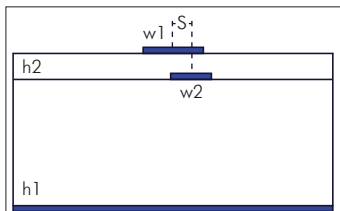


дов с одного СВЧ-слоя на другой, максимально приближая исследуемую модель к реальной конструкции. При задании пределов изменения параметров с помощью программы оптимизировались места соединения связанных и подводящих 50-Ом линий.

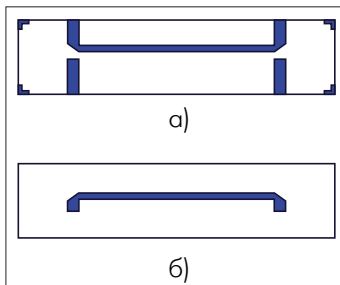
Расчеты производились для структуры, представленной на рис.5 и рассчитанной на диапазон частот 0,95–2,15 ГГц. Топология слоев рассчитанной структуры показана на рис.6. Размер описываемого ответвителя 10x26 мм. Реализован и ответвитель, свернутый в меандр и разместившийся на площади квадрата размером 10x10 мм.

На основе расчетов был изготовлен макет 3-дБ НО, результаты экспериментальных исследований которого приведены на рис.7–9. Исследование на установке PCBA ANALYZER 160T 3-дБ НО с лицевой связью, выполненного по технологии LTCC, показало некоторое отклонение проводников от параллели, оцениваемое в пределах 10 мкм (рис. 10).

Такое отклонение не выходит за рамки допустимых расчетных пределов точности изготовления. Контроль расположения внутренних проводников сложных многослойных структур, необходимый для анализа полученных результатов, внесения соответствующих корректировок топологии и уточнений в технологический маршрут и оснастку, проводился с помощью рентгеноскопического анализа.



**Рис.5. Структура слоев направленного ответвителя**



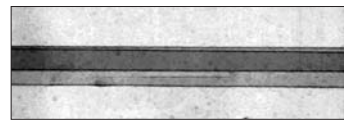
**Рис.6. Топология наружного (а) и внутреннего (б) слоев ответвителя**

Анализ структуры компактного широкополосного 3-дБ НО с лицевой связью, реализованного по технологии LTCC, показал ее хорошее соответствие теоретическим расчетам во всей рабочей полосе частот, превышающей октаву.

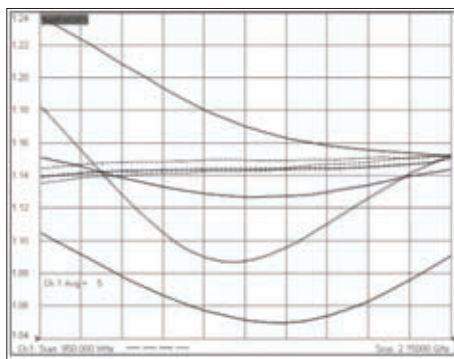
Современные методы контроля технологии изготовления многослойных СВЧ-плат расширяют схемотехнические возможности при разработке устройств и выборе технологии их изготовления. Полученные результаты могут быть полезны и при разработке других СВЧ-устройств на многослойных структурах.

### Корректоры АЧХ

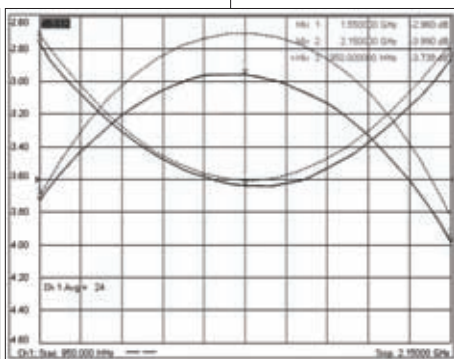
Качественные показатели СВЧ-аппаратуры в значительной степени зависят от того, насколько оптимально спроектированы амплитудные корректоры, выполняющие функцию выравнивания АЧХ трактов передачи информационного СВЧ-сигнала. За последние годы благодаря совершенствованию монокристаллических схем, позволяющих не только минимизировать габариты, но и создавать новые устройства, в области создания корректоров СВЧ-диапазона достигнуты значительные успехи. Особенно часто широкополосные корректоры АЧХ реализуются на основе схем отражательного типа, в которых коррекция выполняется путем изменения коэффициента отражения нагрузок, подключенных к выходам гибридного устройства. Схема отражающей цепочки представляет собой последовательное соединение резистора и короткозамкнутого шлейфа, а в качестве гибридного устройства обычно используют 3-дБ направленные ответвители, которые во многом определяют итоговые характеристики устройства. Сегодня существует несколько базовых структур 3-дБ



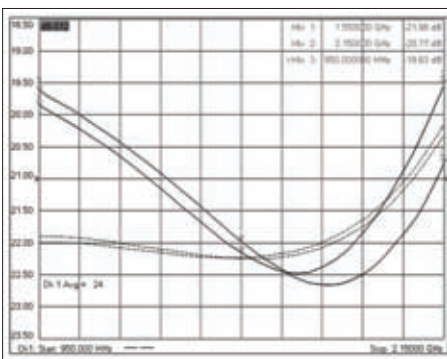
**Рис.10. Увеличенная фотография области связи ответвителя. Темная полоса соответствует области перекрытия двух проводников.**



**Рис.7. КСВН четырех портов ответвителя (пунктирные линии – расчетные данные, сплошные – данные измерений)**



**Рис.8. Переходное ослабление и рабочее затухание, дБ (пунктирные линии – расчетные данные, сплошные – данные измерений)**



**Рис.9. Развязка ответвителя, дБ (пунктирные линии – расчетные данные, сплошные – данные измерений)**

НО с лицевой связью, пригодных для применения в качестве гибридного устройства широкополосных корректоров АЧХ [6]. Наиболее просты в расчете – двухполосковые структуры. Однако трехполосковые ответвители, расчеты структуры которых сложнее, имеют некоторые преимущества перед двухполосковыми. Основное из них – устойчивость к технологическим погрешностям, возникающим при формировании полосков требуемой ширины и при необходимости совмещения слоев, благодаря пространственному распределению электромагнитной связи. С физической точки зрения трехполосковый НО можно рассматривать как двухполосковый ответвитель, в котором между полосками внешнего слоя имеется подстроечный зазор, регулирующий электромагнитную связь. Это дает проектировщикам дополнительную степень свободы при оптимизации топологии амплитудного корректора.

При расчете 3-дБ НО L-диапазона с помощью программы IE3D 10.2 компании Zeland Software получены приведенные на рис.11

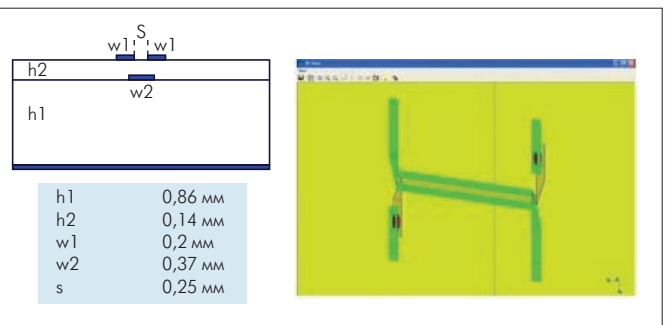


Рис.11. Структура слоев трехполоскового 3-дБ НО

геометрические размеры трехполоскового устройства, выполненного на керамической подложке с  $\epsilon_r = 7,8$ .

Неравномерность деления не превышала 1 дБ (рис.12), разность фаз –  $85 \pm 2^\circ$  (рис.13), развязка – не менее 21 дБ (рис.14) во всем

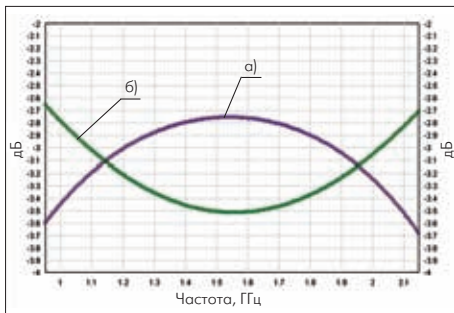


Рис.12. Переходное ослабление (а) и рабочее затухание (б) 3-дБ НО

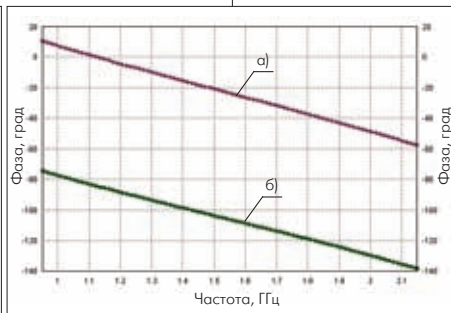


Рис.13. Фаза переходного ослабления (а) и рабочего затухания (б) 3-дБ НО

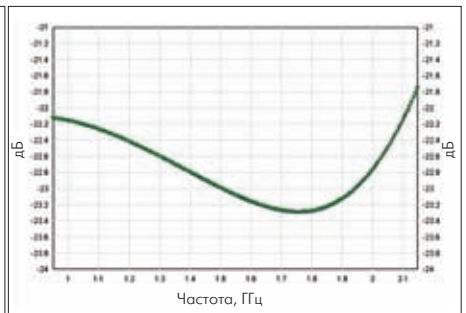
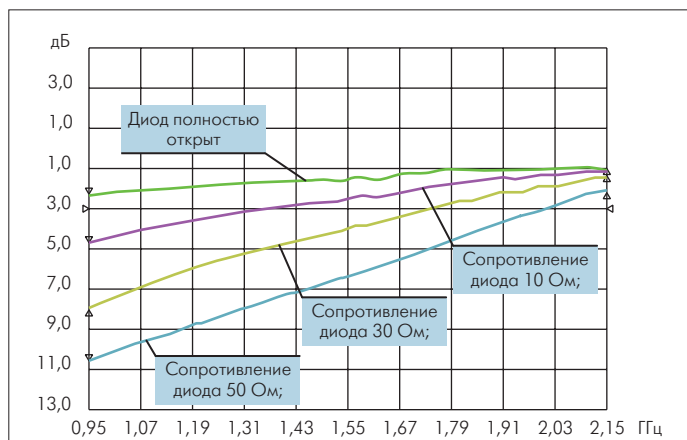


Рис.14. Направленность 3-дБ НО



**Рис. 15. Частотные характеристики коэффициента передачи макета управляемого корректора АЧХ для четырех состояний р-і-п-диода:**

диапазоне частот 0,95–2,15 ГГц. При этом КСВН четырех портов 3-дБ НО не превышал 1,16.

По технологии LTCC на основе трехполоскового 3-дБ НО трехслойной структуры и отражающих цепочек на р-і-п-диодах с короткозамкнутыми четвертьволновыми шлейфами был изготовлен макет электронно-управляемого корректора для рабочего диапазона частот 0,95–2,15 ГГц [7]. В результате измерений частотных характеристик коэффициента передачи макета для разных значений сопротивления диода получено, что диапазон регулировки наклона составляет 8 дБ (нижняя кривая соответствует максимальному наклону при сопротивлении диода 50 Ом) (рис. 15). КСВН двух портов корректора для различных состояний диода не превышал 1,35.

Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность реализации по технологии LTCC управляемого корректора

наклона АЧХ L-диапазона с регулировкой наклона до 8 дБ, хорошим КСВН и малыми начальными потерями в диапазоне рабочих частот, превышающим октаву (0,95–2,15 ГГц).

В следующей статье вниманию читателей будут представлены результаты разработки и изготовления по технологии LTCC модулей усилителей с 3-дБ НО, корректорами АЧХ и управляемых устройств селекции L-диапазона, выполненных на элементах с распределенными параметрами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. K.H.Drue, H.Thust, J. Muller . RF Models of passive LTCC components in the lower GHz range. – Applied Microwave & Wireless. April 1998.
2. DuPont Microcircuit Materials, Low Temperature Cofire Dielectric Tape 951 Green Tape .– Product Selector Guide, Rev. 10/04.
3. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Советское радио, 1976. – 216 с.
4. Матей Д.Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1972.– 493 с.
5. Andrzej Sawicki, Krzysztof Sachse. Novel Coupled-Line Conductor-Backed Coplanar and Microstrip Directional Couplers for PCB and LTCC Applications.– IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 51, №. 6, Dec. 2003, p. 1743–1751.
6. Andrzej Sawicki, Krzysztof Sachse. Quase-Ideal Multilayer Two- and Three-Strip Directional Couplers for Monolithic and Hybrid MIC's.– IEEE Transactions on microwave theory and techniques. vol.47, №.9, Sept. 1999, p. 1873–1888.
7. Пат. 2238605 РФ. Управляемый микрополосковый корректор наклона амплитудно-частотной характеристики/Вахтин Ю. В., Капкин С. П., Прищенко А. М., Токарева Н. В.– Открытия. Изобретения. 2004.