

Миниатюрные СВЧ устройства с применением LTCC- технологии

Многослойная керамическая технология на основе керамики с низкой температурой обжига (Low Temperature Co-fired Ceramics – LTCC) успешно применяется для разработки миниатюрных пассивных СВЧ устройств, ориентированных на массовый выпуск. Приводятся примеры разработки фильтров и делителей-сумматоров мощности, в том числе многополосных и перестраиваемых.

Ключевые слова: керамика с низкой температурой обжига (Low Temperature Co-fired Ceramics – LTCC), полосно-пропускающий фильтр (ППФ), многополосные устройства, делитель-сумматор мощности, направленный ответвитель

Интерес к разработке СВЧ устройств с применением многослойной керамической технологии основан на возможности использовании керамики с низкой температурой обжига (Low Temperature Co-fired Ceramics – LTCC) – модификации толстопленочной технологии [1]. Основным свойством материала LTCC является возможность выполнять обжиг при температуре не выше 900° С, используя проводящие пасты, содержащие серебро, что обеспечивает малые потери устройств. Основные сведения о материалах, применяемых в LTCC устройствах, и этапах технологического процесса, а также о применениях этой технологии для разработки СВЧ-устройств приведены в обзоре [2-4].

Разработка устройств по многослойной технологии для нижней части СВЧ диапазона успешно реализуется при замене элементов с распределенными параметрами сосредоточенными эквивалентами с активным использованием вертикальной структуры с расположением элементов в разных слоях с использованием межслойных соединений с помощью металлизированных отверстий. На Рис. 1 приведена конфигурация и характеристики полосно-пропускающего фильтра 3-го порядка [5]. Использовалось 8 слоев керамики DuPont Green Tape™ 951 толщиной $d = 92$ мкм, ($\epsilon_r = 7,8$), размер фильтра $4,65 \times 4,3 \times 0,74$ мм³. Для уменьшения размеров применялась стековая структура конденсаторов и индуктивностей (Рис. 1б). На Рис. 1в приведены экспериментальные характеристики коэффициентов передачи и отражения для 4-х образцов фильтра.

Фильтр 4-го порядка на частоту 20 ГГц был синтезирован с использованием S-образных полосковых резонаторов (Рис. 2) [6]. Использовалась многослойная структура DuPont Green Tape™ 951 с толщиной диэлектрических слоев 205 мкм. Для улучшения характеристик в фильтре использованы дополнительные связи между входом и выходом, а также между 1-ым и 4-ым резонаторами, что привело к появлению нулей передачи и повышению крутизны фронтов АЧХ (40 дБ/ГГц). Экспериментальные характеристики приведены на Рис. 2б. Площадь фильтра 5×5 мм².

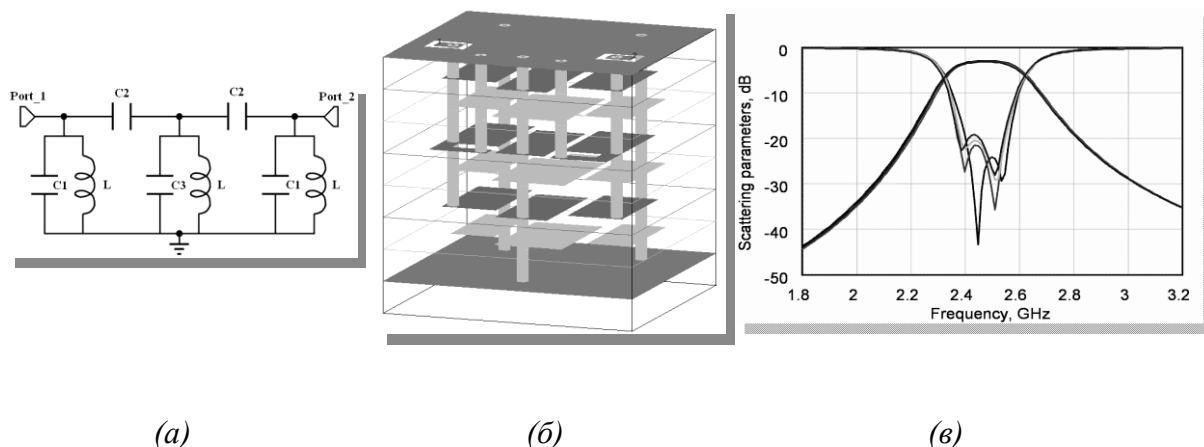


Рис. 1: (а) Эквивалентная схема ППФ (б) LTCC структура фильтра (в) Экспериментальные характеристики 4-х образцов ППФ

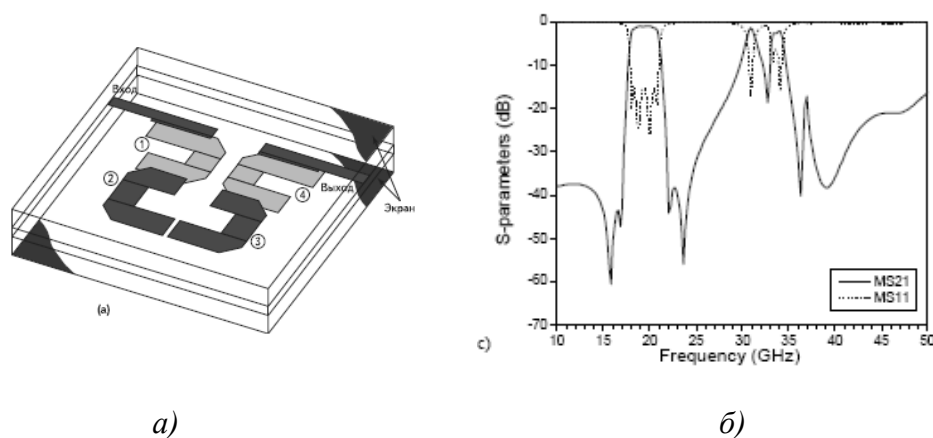


Рис. 2: (а) Топология фильтра миллиметрового диапазона
б) Экспериментальные АЧХ

Представляют интерес многополосные фильтры с произвольно заданными значениями центральных частот [7, 8]. Фильтры проектируются на резонаторах, выполненных на каскадно соединенных отрезках искусственных линий передачи в виде Т- или П-ячеек, содержащих L- и С-элементы (Рис. 3а). Топология двухполосного фильтра приведена на Рис. 3б. LTСС-структура содержит 8 слоев керамики Dupont Green Tape™ 951 ($d = 95 \text{ мкм}$), размер фильтра $24 \times 14 \times 0,76 \text{ мм}^3$.

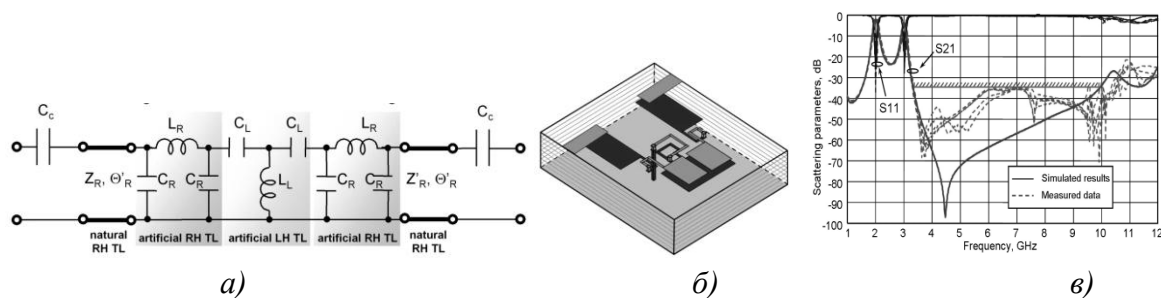


Рис. 3: (а) Эквивалентная схема двухмодового резонатора б) Топология двухполосного фильтра в) Расчетные и экспериментальные характеристики двухполосного фильтра (5 образцов)

Для уменьшения потерь в LTCC фильтрах предложено использовать объемные резонаторы, встроенные в многослойную структуру [9]. Боковые стенки прямоугольного резонатора формируются вертикальной решеткой металлизированных отверстий. Поперечные размеры резонатора значительно уменьшаются за счет диэлектрических свойств LTCC-керамики, в которой сформирован резонатор, а также путем использования дополнительной емкостной пластины, формирующий емкостно-нагруженный резонатор. Дополнительные возможности данной конфигурации обеспечиваются использованием структуры «вложенных» резонаторов, подобной структуре матрешки (Рис. 4а,б). Такие вложенные резонаторы являются многомодовыми. Разработан резонатор на собственные частоты 748 МГц и 1848 МГц. Резонатор выполнен на 16 слоях керамики DuPont Green Tape™ 951, размер резонатора 5.2 мм × 7.6 мм × 2.9 мм.

На основе таких многомодовых резонаторов возможна реализация многополосных фильтров. Характеристики двухполосного фильтра 3-го порядка приведены на Рис. 4 в.

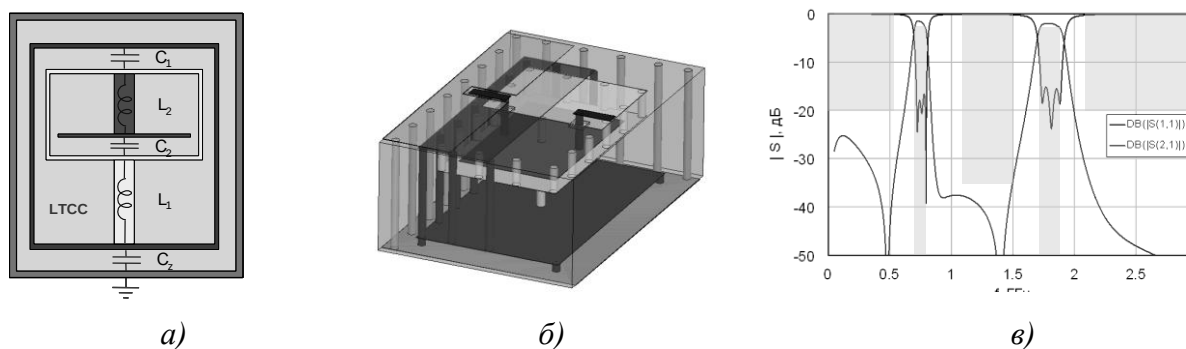


Рис. 4: а) Сематическое изображение двух «вложенных» резонаторов б) LTCC-конфигурация двух «вложенных» резонаторов в) АЧХ двухполосного фильтра 3-го порядка на двухмодовых «вложенных» резонаторах.

Возможности многослойной технологии в полной мере используются при разработке миниатюрных направленных ответвителей (НО) и делителей-сумматоров мощности на их основе. Многослойная структура квадратурного 3-дБ НО, выполненная в 8 слоях LTCC-керамики толщиной 95 мкм, приведена на Рис. 5 [10]. Размеры НО 1,8 мм × 1,9 мм × 0,66 мм.

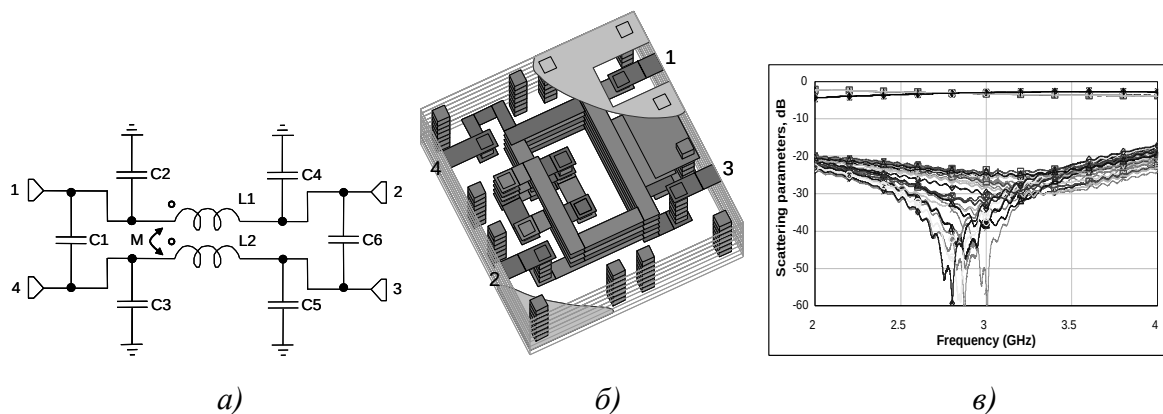


Рис. 5: а) Эквивалентная схема квадратурного НО на связанных линиях б) LTCC-структура 3-дБ НО в) Характеристики передачи и отражения для 10 образцов НО.

Миниатюрный синфазно-противофазный делитель мощности (гибридное кольцо) выполнен на отрезках искусственных линий передачи в 8 слоях керамики LTCC. Площадь устройства в 9 раз меньше такого же делителя, выполненного по традиционной планарной технологии на отрезках распределенной линии передачи [10]. НО имеет также более широкую рабочую полосу частот за счет использования $\pm\lambda/4$ отрезков линий в LC-эквиваленте.

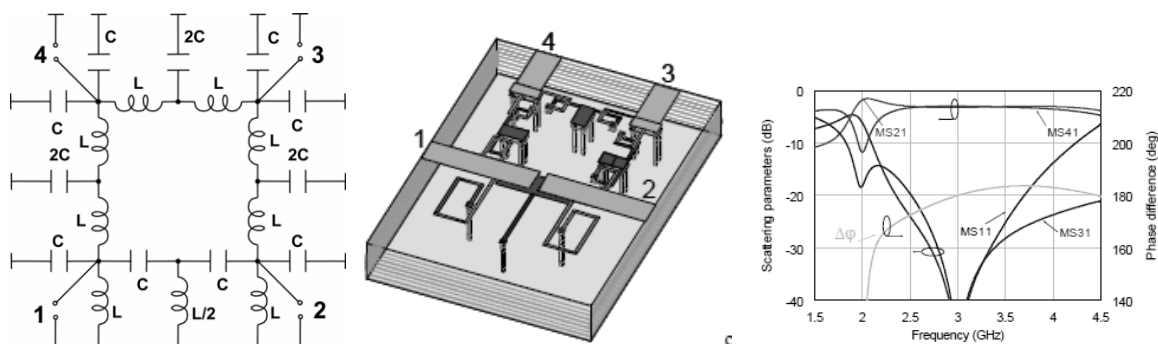


Рис. 6: а) Эквивалентная схема синфазно-противофазного делителя мощности (гибридного кольца) б) LTCC-структура гибридного кольца в) Характеристики устройства

Следует также упомянуть возможность разработки управляемых LTCC-устройств, в частности, перестраиваемых фильтров при замене пассивных конденсаторов в Т- и/или П-ячейках перестраиваемыми конденсаторами, в частности, варикапами [11].

Работа выполнялась в рамках проекта 6-й Рамочной Программы Европейского Союза “Metamorphose” сотрудничества с университетами г. Оулу (Финляндия) и г. Ильменау (Германия)

Библиографический список

1. Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology / Yoshihiko Imanaka, Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
2. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // Компоненты и Технологии. 2005. № 5. с. 190-196.

3. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига, Ч.2. Средства проектирования и реализация пассивных устройств / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // *Компоненты и Технологии*. 2005. № 6. с. 210-216.
4. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига, Ч.3. Активные устройства, антенны и многофункциональные СВЧ модули / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // *Компоненты и Технологии*. 2005. № 7. с. 208-213.
5. Design and Investigation of Miniaturized High-Performance LTCC Filters for Wireless Communications / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak et al // *Proc. of EuMC37*, Munich Germany, pp. 544 – 547, October 2007,
6. Bandpass Filters for Ka-Band Satellite Communication Applications Based on LTCC / D. Kholodnyak, Ya. Kolmakov, I. Vendik, J.F. Trabert, J. Mueller, K.-H. Druce, M. A. Hein // *Proc. of EuMC38*, Amsterdam, Netherland, pp. 211 – 214, October 2008.
7. Применение линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией для разработки планарных резонаторов и фильтров СВЧ с подавлением паразитных полос пропускания / И.Б. Вендик, И.В. Колмакова, П.В. Капитанова // *Изв. вузов России, Радиоэлектроника*. 2007. Вып. 6. с. 57-61.
8. Right- and Left-Handed Transmission Line Resonators and Filters for Dual Band Application / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller, M.A. Hein, I. Vendik // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2009. Vol.51 (3), pp. 629-633
9. LTCC Highly Loaded Cavities for the Design of Single- and Dual-Band Low-Loss Miniature Filters, V. Turgaliev, D. Kholodnyak, I. Vendik, D. Stöpel, S. Humbla, J. Müller, and M. A. Hein / *Proc. of EuMC40*, Paris, France, pp. 180-183, October 2010.
10. Broadband Small-Size LTCC Directional Couplers / P. Turalchuk, I. Munina, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, D. Stoepel, St. Humbla, J. Mueller, M. A. Hein, and I. Vendik // *Proc. of EuMC40*, Paris, France, pp. 1162-1165, October 2010.
11. Tunable Dual-Band Microwave Devices based on a Combination of Left/Right-Handed Transmission Lines / I. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, M. A. Hein, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller // *Proc. of EuMC38*, Amsterdam, Netherland, October 2008.