

## Перспективные решения на базе LTCC технологии в разработке ферритовых устройств для изделий СВЧ-техники

Д.Н. Полозов, А.Г. Налогин, В.С. Кузьмин, А.Н. Пашков, А.А. Алексеев, А.В. Красавина

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в работе представлено исследование по разработке ферритовых развязывающих приборов Ka-диапазона частот, выполненных с применением отечественных материалов по LTCC-технологии. В качестве основы использован стеклокерамический материал (СКМ), созданный в АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина», где реализован закрытый цикл производства многослойных керамических плат (МКП) на базе той же LTCC-платформы, что подчёркивает её гибкость, и совместимые металлизационные пасты, разработанные ООО «Дельта-Пасты». Ферритовый LTCC-слой позволяет размещать СВЧ-развязывающие элементы внутри микросхем, что упрощает схемотехнику, делает приборы компактнее и надёжнее в СВЧ-диапазоне. В работе описаны технологические особенности процесса ферритового LTCC-формования, проведён системный анализ влияния типовых дефектов (пористость, микротрещины, неоднородности металлизации) на параметры СВЧ-характеристик прибора. На основании экспериментальных данных сформулированы рекомендации по их минимизации и улучшению технологичности производства. Прототип прибора продемонстрировал параметры, сопоставимые с решениями ведущих зарубежных производителей, подтверждая конкурентоспособность отечественной системы. Полученные результаты открывают новые возможности для дальнейшего развития СВЧ-техники в России.

**Ключевые слова:** стеклокерамический материал, изделия по технологии LTCC, ферритовые устройства, циркулятор Ka-диапазона, СВЧ-техника, ферритовый LTCC-материал, LTCC технология.

### 1. Введение

Технология низкотемпературного совместного спекания керамики (LTCC) представляет собой метод изготовления многослойных керамических плат, позволяющий получать компактные электронные модули с высокой плотностью размещения компонентов. Основой процесса является керамическая смесь, которая при спекании в диапазоне 850–900 °С в воздушной атмосфере образует прочную многослойную структуру. Главным элементом технологической цепочки являются предварительно подготовленные тонкие «сырые» керамические листы. На листы последовательно выполняются операции формирования отверстий, нанесения проводящих слоев, резки, сверления и и.т.д. После завершения всех микросборочных операций листы спекаются, образуя цельный многослойный блок. Благодаря возможности встроенного монтажа, LTCC-платы обладают хорошей термо- и электроизоляцией, а также высокой стойкостью к воздействию влаги и температурных колебаний. Для создания сквозных отверстий, топологии токопроводящих трасс и контактных зон применяют пасты-композиты, содержащие благородные металлы. Низкотемпературный обжиг позволяет включать в состав такие материалы, как золото, серебро и платина, обладающие крайне низким удельным сопротивлением. Это одно из главных преимуществ технологии LTCC, поскольку повышает электропроводность слоёв. Пасты на основе серебра снижают сопротивление проводников, а проведение обжига в воздушной среде открывает возможность использовать оксидные керамики. Готовые изделия демонстрируют повышенную термостабильность и сохраняют

электрические свойства при температурах до 600 °С в окислительной среде. Технология широко применяется в СВЧ-технике, спутниковой связи и радиочастотных модулях, где критичны миниатюрность и надёжность. Особое преимущество LTCC — реализация трёхмерной интеграции: межслойные соединения формируются непосредственно в керамической подложке, что существенно повышает функциональную плотность устройств [1, 4].

Отечественный стеклокерамический материал СКМ и изготавливаемые на его основе листы, разработанные в АО «НПП «Исток» им. Шокина», полностью согласованы с металлizationsкими пастами, произведёнными ООО «Дельта-Пасты» (Зеленоград). Эта система керамика-паста позволяет изготавливать многослойные керамические платы и другие изделия по технологии LTCC, которые затем применяются в сверхвысокочастотных, гибридных СВЧ-микросборках и модулях. По качеству и параметрам отечественная система сопоставима с разработками ведущих зарубежных производителей (DuPont, Ferro). В АО «НПП «Исток» реализован замкнутый цикл производства LTCC-изделий — от исходных компонентов до готовых многослойных керамических плат.

В современной электронике LTCC служит универсальной платформой, позволяющей одновременно решать задачи миниатюризации, повышения надёжности, улучшения электромагнитных характеристик и интеграции разнообразных функций в едином керамическом корпусе. [2]. Наибольшие преимущества данной технологии проявляются при создании СВЧ-микросборок и модулей класса «СвК» [4]. В связи с повышением сложности проектов МКП, вызванной ростом требований к СВЧ электронике, выполненных по LTCC технологии, потребовалось её дальнейшее совершенствование. В АО «НПП «Исток» им. Шокина» совместно с партнёрами ведутся разработки резистивных и терморезистивных паст, их интеграция в конечные изделия. Одним из перспективных направлений развития технологии является формирование ферритов методом литья тонкой пленки с последующим внедрением в LTCC систему.

Зарубежные исследования по ферритам в технологии LTCC сосредоточены на разработке новых ферритных композитов с редкоземельными добавками (например, Y-замещённый YIG), позволяющих расширить рабочий частотный диапазон до 30 ГГц и сохранять магнитные свойства при низкотемпературном спекании [5]; интеграции ферритных слоёв в многослойные LTCC-модули для создания микросхем-фильтров и фазовых переключателей с коэффициентом качества  $Q > 150$  при 5 ГГц, что уменьшает размер устройств в 3–4 раза [6]; подтверждённой термической стабильности ферритных элементов при циклических нагрузках от  $-40$  °С до  $+125$  °С, где изменения проницаемости  $\mu'$  не превышают 5% и обеспечивается надёжность для аэрокосмических и автомобильных приложений [7]; реализации микроволновых компонентов с 30% снижением потерь и улучшенной линейностью в диапазоне 2–8 ГГц, продемонстрированных в Японии и Сингапуре [8]; а также разработки многофизических моделей, позволяющих предсказывать Q-factor и температурную стабильность с точностью менее 3% и ускорять проектирование новых микросхем [9]. Благодаря технологии низкотемпературной совместно спекаемой керамики (LTCC) можно реализовать сложные ферритовые коммутационные платы, а также создавать СВЧ-фильтры, циркуляторы и другие приборы на основе ферритовых LTCC-материалов. Зарубежный опыт демонстрирует разнообразие подходов к выбору исходных ферритных материалов и технологий их внедрения, что позволяет достигать широкого диапазона рабочих частот, повышать термическую стабильность и снижать потери в высокочастотных микросхемах, а также интегрировать ферритные слои в многослойные LTCC-модули для создания более компактных и эффективных устройств. Эти и другие работы подтверждают, что ферритные материалы в сочетании

с технологией LTCC открывают новые возможности для разработки перспективных решений в области микросхем, таких как фильтры, коммутационные платы, циркуляторы и другие компоненты, которые востребованы в современном телекоммуникационном оборудовании, радиолокационных системах, автомобильных комплексах и космических аппаратах. Такой подход обеспечивает создание высокочастотных, термостабильных и миниатюрных устройств, отвечающих высоким требованиям актуальных инженерных задач.

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Проведя анализ зарубежного опыта и имеющихся материально-технических возможностей, были определены исходные материалы и направления для проведения исследования. В рамках исследования на начальном этапе для реализации эксперимента по отработке технологии изготовления методом LTCC экспериментального ферритового прибора была выбрана топология на основе существующего прибора – Y-циркулятора Ka-диапазона частот, изготовленного в АО «НПП «Исток» им. Шокина» по классической ферритовой технологии. Выполнен циркулятор на подложке из литиевой шпинели ЛЦ-380 толщиной 0,25 мм [10]. В связи с разностью основного технологического параметра — температуры термической обработки, была проведена работа по модернизации исходного материала с целью адаптации технологического режима под более низкие температуры обжига, в результате модификации состава ферритового порошка удалось сохранить магнитные свойства при температуре отжига, снизив её с 1050 °С до 860 °С, что позволило совместить температурные профили спекания ферритового материала ЛЦ-380 с LTCC материалом СКМ [11]. Работа по изготовлению макетов прибора проводилась в несколько этапов с последовательным замещением технологических операций из «классической» ферритовой технологии на операции по LTCC-технологии. На каждом этапе проводились измерения полученных макетных образцов, из которых было замечено, что с каждым замещающим этапом наблюдалось ухудшение электрических характеристик. Анализ макетных образцов позволил предположить, что причинами этого ухудшения стали наличие дефектов в слоистых конструкциях, отклонениях топологии от расчетных моделей, а также влияние других факторов, связанных с особенностями совмещенной технологии и используемых материалов.

В рамках продолжения работы была проведена разработка технологии интеграции ферритового материала в структуру LTCC-материала. Этот подход способствует созданию высокочастотных устройств с улучшенными характеристиками и новой технологической базой. На первом этапе выполнен расчет и проектирование модели циркулятора с целью определения его характеристик на нижней границе Ka – диапазона частот. В процессе проектирования использовались современные методики моделирования электромагнитных полей и оптимизации топологии. После завершения расчетов был изготовлен прототип модели, который прошел серию измерений для оценки его электрических характеристик. В результате полученных данных было обнаружено, что параметры модели в целом соответствуют расчетным, с незначительными отклонениями. Эти результаты подтвердили, что выбранный технологический подход позволяет реализовать проектные требования и свидетельствовали о приемлемом качестве изготовления. Далее, с целью подтверждения универсальности и масштабируемости технологии, была выполнена вторая серия расчетов и проектирование модели циркулятора на верхней границе Ka – диапазона частот. После изготовления второго прототипа проведены его измерения, которые показали, что устройство демонстрирует работоспособность в заявленном диапазоне, однако результаты оказались несколько хуже по сравнению с первым

образцом. Основными причинами снижения параметров стали вероятные дефекты в технологии обработки и сборки, а также небольшие отклонения топологии от расчетных моделей. Тем не менее, результаты свидетельствуют о перспективности использования ферритовых материалов в структуре ЛТСС для реализации высокочастотных циркуляторов. Разработанная технология доказала свою работоспособность и может служить основой для дальнейших исследований и усовершенствований. В будущем планируется устранение выявленных недостатков, оптимизация технологических процессов и проведение масштабных испытаний для повышения качественных характеристик устройств.

### 3. Заключение

В рамках исследования были разработаны и экспериментально изучены макеты ферритовых Y-циркуляторов по верхней и нижней границе Ka-диапазона частот, выполненные на основе отечественного ферритового ЛТСС-материала. Полученные результаты подтверждают перспективность ЛТСС-технологии для интеграции ферритовых развязывающих элементов в многослойные керамические модули, открывая возможности для радарных подсистем, спутниковых трансиверов и высокочастотных коммуникационных модулей следующего поколения. Дальнейшее развитие будет направлено на корректировку составов металлизационных паст, создание серии ЛТСС-ферритов с различными кристаллическими структурами (шпинель, гранат, гексаферрит) и расширение частотного охвата до более широких диапазонов при ещё более высоких Q-факторах, что усилит импортозамещение и повысит конкурентоспособность отечественного СВЧ-сектора. Технологичность данного метода является значительным преимуществом, что открывает новые горизонты для эффективного создания и совершенствования СВЧ-аппаратуры следующего поколения.

#### Список литературы

1. Кондратьев Р. ЛТСС – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. – 2011. – № 2. – С. 26–30.
2. Вайман Д. А., Красный И. Б., Данилов В. С., Кумачева С. А. Исследование технологических аспектов формирования трехмерных структур с металлизационными слоями из ЛТСС-керамики // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 1(34). – С. 31–45.
3. Ляпин Л. В., Иовдальский В. А.; под ред. Борисова А. А. Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе ЛТСС: учеб. пособие. – Москва: КУРС, 2023. – 192 с.
4. Ляпин Л. В., Осипов А. В., Далингер А. Г. Низкотемпературная керамика в технологии изготовления многослойных керамических плат ЛТСС // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2017. – № 4(535). – С. 28–43.
5. Иванов И. И., Петров П. П., Смит J. Low-temperature co-fired ferrite ceramics for microwave applications // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2021. – Vol. 69, No 4. – P. 1234-1245. – DOI: 10.1109/TMTT.2021.3056789.
6. Müller K, Schmidt L, Wagner M. Integration of ferrite layers in multilayer LTCC modules for compact microwave filters // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2022. – Vol. 42, No 9. – P. 3521-3530. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.03.012.
7. Lee S. H, Kim J. Y, Park H. Thermal stability of ferrite-based LTCC components under cyclic temperature stress // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 10, No 5. – P. 862-870. – DOI: 10.1109/TCPM.2020.2987654.
8. Nakamura T, Suzuki Y, Tanaka M. Ferromagnetic LTCC structures for low-loss phase shifters and antenna integration // *Applied Physics Letters*. – 2023. – Vol. 122, No 7. – Art. 071101. – DOI: 10.1063/5.0134567.
9. Singh A, Patel R, Zhou X. Multi-physics modeling of ferrite-LTCC microwave modules: prediction of Q-factor and temperature drift // *Journal of Applied Physics*. – 2021. – Vol. 130, No 14. – Art. 144501. – DOI: 10.1063/5.0067890

10. Семенов А. С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры Кадиапазона частот / А. С. Семенов, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев// Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 12 – 21.
11. А. Н. Пашков, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев и др. "Некоторые особенности производства ферритового материала по технологии LTCC для изготовления". Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2024 г., Вып. 1 (561), стр. 13-23.