

# LTCC – НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СОВМЕСТНО ОБЖИГАЕМАЯ КЕРАМИКА

Р.Кондратюк  
materials@ostec-group.ru

На протяжении ряда лет в различных отраслях промышленности используется технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC). Усовершенствование таких материалов, технологических процессов и методов их производства привело к снижению стоимости и улучшению характеристик электронных изделий, что обеспечило рост интереса к этой технологии со стороны производителей высокочастотной техники, оптоэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС). В результате ее широкого использования открываются новые возможности для производства электронных изделий в таких направлениях как телекоммуникации, медицина, автомобильная, военная и космическая техника.

Для производства многослойных печатных плат традиционно основными являлись органические материалы с низкой диэлектрической постоянной (FR-4,  $\epsilon_r = 3,5-4,5$ ) и керамика с высокими ее значениями ( $\epsilon_r = 10-12$ ). Увеличение рабочих частот электронных приборов требовало создания нового материала, который позволил бы легко изготавливать многослойные печатные платы и имел на высоких частотах схожие с керамикой характеристики. Такой материал и получил название "низкотемпературная совместно обжигаемая керамика" (Low Temperature Cofired Ceramic – LTCC).

Многослойные керамические платы первоначально изготавливались из оксида алюминия  $Al_2O_3$  (HTCC-технология). Материал обжигался при температурах  $\geq 1500^{\circ}C$ , поэтому слои металлизации выпол-

нялись только из тугоплавких металлов: вольфрама и молибдена, что вносило ряд ограничений в функциональные возможности приборов, в усовершенствование технологии и снижение стоимости производства. Дальнейшее развитие многослойная керамика получила с внедрением технологии LTCC, когда материал начали смешивать со специальными стеклами (рис.1).

Температура обжига керамики снизилась до  $850^{\circ}C$ , что

обеспечило существенное упрощение производственного процесса. В настоящее время к технологии LTCC относят керамику, обжигаемую при температурах ниже  $1000^{\circ}C$ .

Низкие потери и относительно невысокая стоимость производства – ключевые преимущества LTCC-технологии для ВЧ- и СВЧ-приборов. По стоимости LTCC-технология приближается к печатным платам на основе FR-4, а по диэлектрическим характеристи-

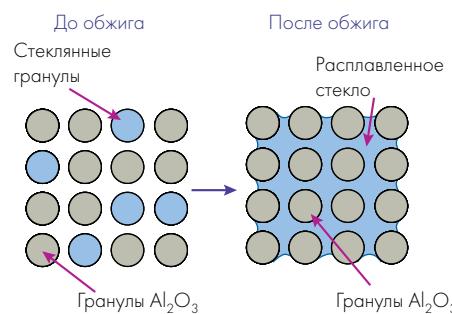


Рис.1. Структура низкотемпературной керамики

тикам сопоставима с алюмооксидной керамикой.

## Основные преимущества LTCC-технологии

Основные преимущества и особенности LTCC-технологии:

- Очень хорошие электрические характеристики и их стабильность до миллиметровых длин волн. В зависимости от используемых материалов диэлектрическая проницаемость такой керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь в ГГц-диапазоне от 0,001 до 0,006. Для металлизации используются металлы с низким удельным соотивлением (Ag, Au, Pt).

- Превосходная механическая стабильность и сохранение линейных размеров, что обеспечивается не только малым коэффициентом теплового расширения (5–7 мкм/м°C), но и эластичными свойствами материала в широком диапазоне температур. Плотная структура LTCC керамики не пропускает влагу, поэтому корпуса из нее могут быть использованы в высоковлажной атмосфере без дополнительной защиты. (В отличие от органических, большая часть которых сильно подвержена влиянию влаги, LTCC материалы сохраняют свои свойства во влажной среде.)

- Низкий КТР, близкий к такому коэффициенту большинства основных полупроводниковых материалов электроники (Si, GaAs, InP). Это позволяет монтировать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы.

- Хорошая теплопроводность, составляющая 2–4 Вт/мК, что гораздо выше, чем у печатных плат на основе органических материалов (0,1–0,5 Вт/мК). Теплопроводность LTCC также может быть повышена до 20 Вт/мК за счет создания с помощью металлизации тепловых стоков.

- Возможность 3D интеграции. В такой керамике легко

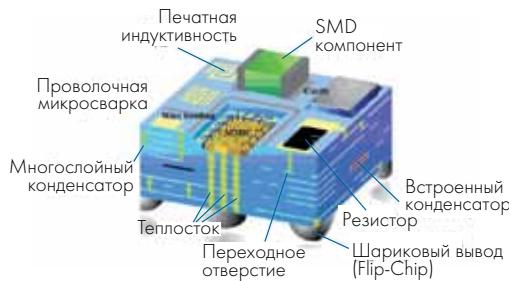


Рис.2. Многослойная плата из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики

создаются полости, отверстия, ограничители, встроенные пассивные компоненты (рис.2).

- Герметичность и возможность высокотемпературной пайки.

Кроме того, технология LTCC доказала свою надежность и экономическую эффективность при решении широкого спектра задач СВЧ-электроники.

Благодаря вышеперечисленным особенностям, LTCC-технология нашла широкое применение при создании многослойных плат для ВЧ электронных приборов, корпусов микросхем. Изделие стало альтернативой многослойным печатным платам из стеклотекстолита и высокотемпературной керамики. Микросхемы с корпусами на основе LTCC широко применяются в автомобильной и потребительской электронике, телекоммуникационной сфере, спутниковых системах и в военных изделиях.

Изначально LTCC-технология использовалась для круп-

носерийного производства СВЧ-устройств, однако благодаря своим диэлектрическим и механическим свойствам, а также надежности и стабильности, материал начали активно применять и при производстве различных сенсоров, МЭМС-устройств, трехмерных интегрированных структур, причем в современном производстве технология используется как при мелкосерийном изготовлении СВЧ-устройств, где требуется высочайшая надежность (военная, космическая техника), так и в массовом производстве.

## Технология производства LTCC

Изготовление изделий из LTCC-керамики (рис.3) начинается с создания суспензии при смешивании керамического порошка, органических связующих, растворителей и модифицирующих добавок. Из этой суспензии формируется керамическая лента, нарезаемая на листы необходимой

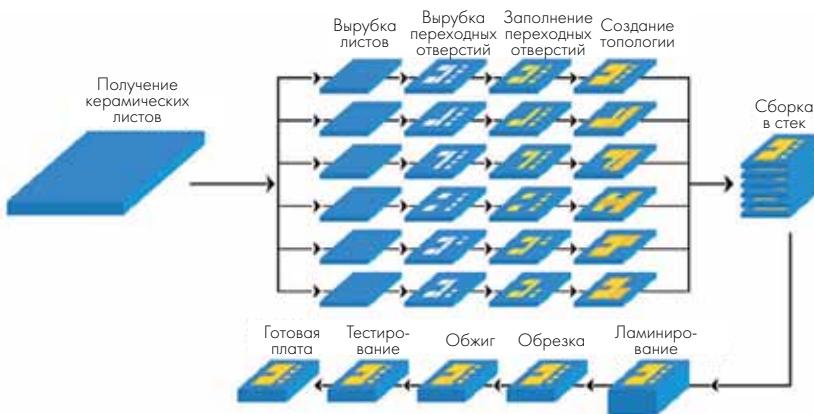


Рис.3. Процесс производства многослойных плат из низкотемпературной керамики

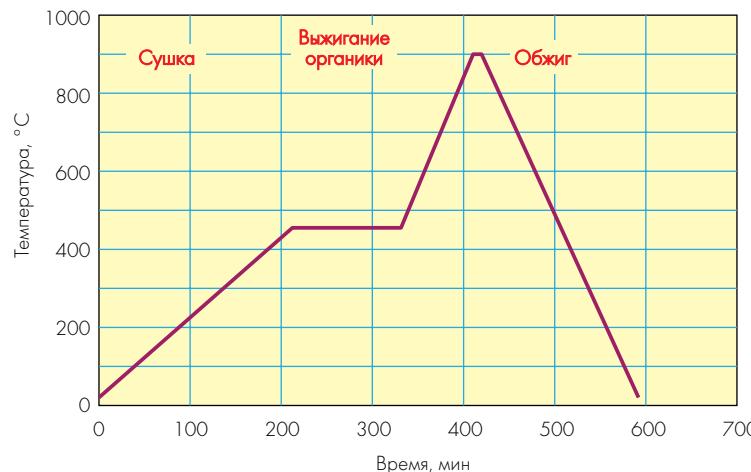


Рис.4. Температурный профиль для обжига низкотемпературной совместно обжигаемой керамики

мых размеров. Затем производится формирование переходных отверстий, их заполнение проводящей пастой и создание с помощью специальных проводящих и резистивных паст необходимой топологии. Листы совмещаются, ламинируются, разделяются на отдельные элементы и обжигаются. После обжига готовая керамика может разрезаться на отдельные изделия дисковой пилой или с помощью лазерной резки.

Термообработка керамики, как правило, состоит из изостатического ламинации при 60–70°C под давлением, выжигания органики в течение 2–2,5 ч при 450–500°C и последующего обжига в течение 10 мин при 850°C (рис.4). Невысокие температуры обжига позволяют использовать металлы с низким удельным сопротивлением (золото, серебро), что является одним из ключевых преимуществ LTCC-технологии, поскольку позволяет существенно снизить стоимость многослойной керамической структуры и улучшить ее характеристики. Использование серебра снижает электрическое сопротивление проводящих слоев, а окислительная атмосфера (воздух) дает возможность применять оксидную керамику с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости.

После обжига даже при воздействии высоких температур LTCC-керамика сохраняет свою структуру. Это позволяет использовать изделия из нее в широком диапазоне температур.

Керамика во время обжига становится более плотной и, как правило, дает усадку в размерах на 9–15% в плоскости листов (оси X, Y) и на 10–30% в направлении, перпендикулярном ей (оси Z), что необходимо учитывать при проектировании систем на основе LTCC и выборе проводящих/резистивных паст. Последние должны иметь коэффициент усадки, схожий со значениями этого параметра для керамических листов.

Основными материалами для производства LTCC-изделий являются керамические порошки, специальные добавки, готовые керамические листы, а также пасты для созда-



Рис.5. Керамические листы

ния проводников и встроенных пассивных компонентов. Все эти материалы объединяются в специальные системы, где каждый компонент используется с учетом необходимости химической и физической совместимости с другими элементами. Создание такой системы – сложный, требующий существенных затрат наукоемкий процесс. Как правило, каждая LTCC-система представляет собой уникальное решение, и заменить один компонент материалом другого производителя часто не представляется возможным.

## Керамические листы

Базовым материалом для производства изделий СВЧ-электроники служат керамические листы (рис.5), сформированные из керамической суспензии. От качества таких листов зависят стабильность и повторяемость параметров процесса производства устройств. Характеристики керамических листов определяют также функциональные возможности ВЧ-устройств.

Низкотемпературная керамика создается на основе

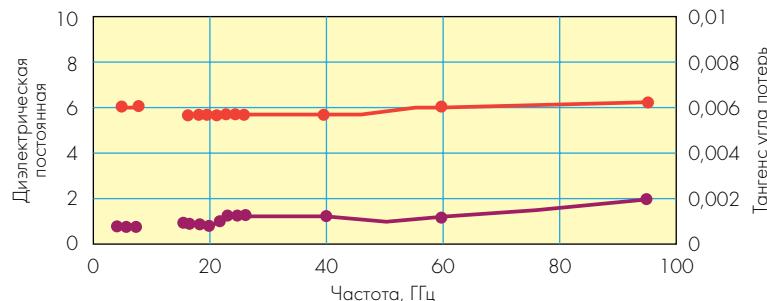


Рис.6. Характеристики низкотемпературной керамики на высоких частотах (Ferro A6-S)



кристаллизованного стекла или смеси стекла и керамики ( $Al_2O_3$ ,  $Si_2O_3$ ,  $PbO$  и т. д.). В зависимости от решаемой задачи исходная лента может быть модифицирована добавками с различными электрическими и физическими свойствами (пьезо- или ферроэлектрики и т. д.). Важно отметить также, что для согласования с алюмооксидной керамикой, кремнием или арсенидом галлия может быть подобран состав с соответствующим коэффициентом теплового расширения.

LTCC-керамика сохраняет свои характеристики в широком спектре частот и демонстрирует стабильность коэффициентов диэлектрической проницаемости  $k$  и диэлектрических потерь, поэтому хорошо подходит для применения в ВЧ-технике (рис.6).

Важно отметить, что LTCC продолжает совершенствоваться как в области повышения технологических параметров, так по физическим и электрическим характеристикам.

### Пасты

Важнейшая часть LTCC-систем – проводники, совместимые с низкотемпературной керамикой. Металлизация может проводиться с использованием золота, серебра или при их совместном применении (серебряные пасты используются для формирования внутренних проводников, золотые – для поверхностных). Проводящие пасты легко наносятся трафаретной печатью, что позволяет получать топологию с высоким разрешением. При совместном обжиге важными параметрами металлизации являются усадка и тепловое расширение материалов, которые должны быть сопоставимы с параметрами используемой керамики. Крупные производители, как правило, предлагают комплексные LTCC-системы, в которых керамические материалы и проводящие/резистивные пасты подобраны так, что имеют полную совместимость.

Особенность LTCC-систем – низкие СВЧ-потери. Исследования показали, что при частотах выше 1 ГГц потери, связанные с влиянием проводников, сравнимы с потерями в диэлектриках. Это важно учитывать при проектировании устройств и выборе материалов (керамика + проводящие пасты). Потери в проводниках связаны не только с внутренним удельным сопротивлением, но и с природой органической связки в пастах, геометрией и шероховатостью поверхности проводящих дорожек. В частности, проводники на основе золота имеют более высокие потери, чем на основе серебра, поскольку золото обладает большим удельным электрическим сопротивлением (2,3 Ом·см у золота против 1,6 Ом·см у серебра). Очевидно, что переход на проводящие материалы на основе серебра не только позволяет снизить потери, но и уменьшить стоимость системы в целом. Однако когда надежность и использование проволочной микросварки становятся основными критериями выбора технологии, проводники на основе золота предпочтительнее. Смешанные системы металлизации совмещают в себе достоинства золотых и серебряных проводников. Переход между двумя металлами достигается с помощью специальных паст. В результате смешанная металлизация позволяет создавать относительно недорогие устройства с высоким быстродействием.

Производители LTCC-материалов предлагают широкий спектр продукции для создания резисторов и конденсаторов, встроенных в многослойную керамическую плату. Резистивные пасты позволяют создавать встроенные резисторы с сопротивлением от 10 до 10000 Ом/кв. с допусками  $\pm 10\%$  и температурным коэффициентом сопротивления  $\pm 200 \cdot 10^{-6} C^{-1}$ . Доступны также парапараптические и сегнетоэлектрические материалы с диэлект-

рической проницаемостью от 5 до 2000, с минимально возможной толщиной нанесения 10 мкм, однако, как отмечают эксперты, не всегда удается обеспечить химическую совместимость материалов паст и керамики.

Развитие резистивных и диэлектрических материалов продолжается в направлении создания резисторов с высоким значением сопротивления, более высокими допусками и низким значением температурного коэффициента сопротивления. Производители материалов для LTCC-технологии стремятся также создать химически совместимые диэлектрики с высокими значениями диэлектрической постоянной.

### Материалы компании Ferro

Компания Ferro получила среди разработчиков и производителей СВЧ-электроники широкую известность благодаря высоким техническим характеристикам, надежности и качеству ее материалов.

LTCC системы компании Ferro более 20 лет присутствуют на рынке СВЧ – электроники и широко применяются ведущими производителями для создания компонентов радаров, антенн, фильтров, телекоммуникационных изделий. Постоянно проводимые компанией глубокие исследования в области материалов для электроники позволяют ей занимать лидирующие позиции на этом рынке.

LTCC-системы компании Ferro включают в себя полный спектр необходимых материалов. Среди них керамические порошки и ленты/листы, пасты для создания внутренних и внешних проводников, формирования металлизации переходных отверстий и изготовления встроенных резисторов. Керамические материалы и металлические пасты подобраны с учетом полной согласованности материалов по КТР и химической совместимости. Материалы Ferro для LTCC-

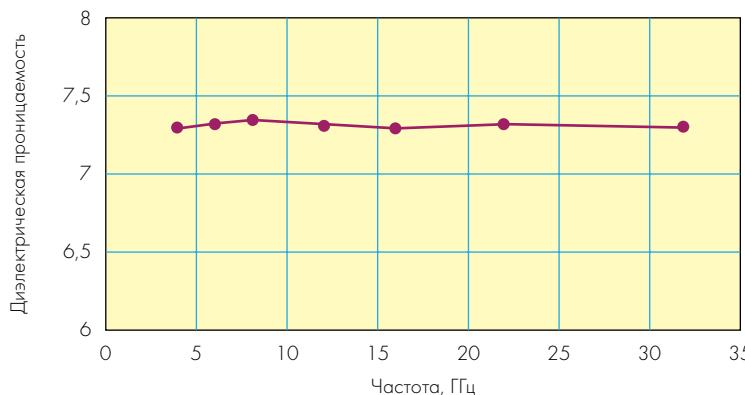


Рис.7. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (керамика Ferro L8)

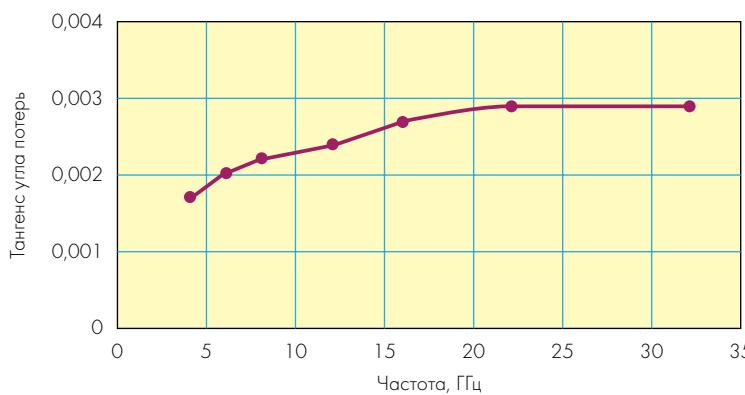


Рис.8. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты (керамика Ferro L8)

технологии представлены тремя основными системами:

- **Система А6-М** – основной компонент LTCC-керамики Ferro. Запатентованный стеклокерамический материал для ВЧ-приборов (до 110 ГГц) с низкими значениями вносимых потерь. Эта система создана для изделий с повышенными требованиями к надежности. Поставляется в виде керамической ленты. Металлизация на основе золота.

- **Система А6-С** – альтернатива А6-М для СВЧ-изделий. А6-С создана на основе запатентованного кальциевого боросиликатного стекла для недорогих СВЧ-устройств, работающих в диапазоне 2,45–100 ГГц. Система на основе смешанной металлизации (золото + серебро). Поставляется в виде керамической ленты или порошка.

- **Система L8** – бюджетная, альтернатива LTCC-системе А6. Стеклокерамический материал

для модулей, корпусов, подложек и сложных компонентов. До 30 ГГц обеспечивает стабильное значение коэффициента диэлектрической проницаемости и малые потери СВЧ (рис.7, 8). Используется при создании низкочастотных и среднечастотных приборов для телекоммуникации, радарных систем, авионики, спутниковой техники, решения других задач. Поставляется в виде керамической ленты или порошка. Совместима с золотой, серебряной и смешанными металлизациями, специально созданными для данной системы.

Основные преимущества металлических паст Ferro для различных типов керамики – отличные характеристики и полная технологическая совместимость с керамическими листами. Эти пасты отличаются высокой адгезией к керамическому основанию, соответствием КТР и коэффи-

циентов усадки параметрам керамических листов, низким удельным сопротивлением, стабильностью электрических характеристик. При их термообработке поры и пустоты не образуются. Металлизация для переходных отверстий позволяет создавать качественное соединение металлов разных уровней и не приводит к возникновению в керамике трещин. Поверхностная металлизация отличается высокой чистотой, что позволяет в зависимости от поставленной задачи проводить качественную пайку или сварку проволочных или ленточных выводов.

В целом важно отметить, что LTCC-технология получила широкое развитие благодаря ряду особенностей. Возможность создания 3D-структур, встроенных пассивных компонентов, высокопроводящих соединений, высокая механическая прочность и герметичность позволяют рассматривать ее как базовую при изготовлении сложных электронных систем, где требуется высокая производительность и надежность.

Основные направления развития LTCC-технологии включают совершенствование материалов и улучшение технологического процесса производства, что обеспечивает улучшение их электрических характеристик, простоту в использовании, совместимость с основными технологиями сборки полупроводниковых приборов (высокотемпературной пайкой, проволочной микросваркой и т. д.).

Важно отметить, что для интеграции пассивных компонентов и создания изделий оптоэлектроники состав материалов постоянно совершенствуется. С точки зрения технологического процесса усилия разработчиков направлены на повышение контроля усадки керамики, увеличение размеров листов, уменьшение топологических норм и более совершенное использование разнородных материалов. ■