

ЛТСС – НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СОВМЕСТНО ОБЖИГАЕМАЯ КЕРАМИКА

Р.Кондратюк
materials@ostec-group.ru

На протяжении ряда лет в различных отраслях промышленности используется технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (ЛТСС). 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 – ЛТСС).

Многослойные керамические платы первоначально изготавливались из оксида алюминия Al_2O_3 (ЛТСС-технология). Материал обжигался при температурах $\geq 1500^\circ C$, поэтому слой 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 ЛТСС, 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 ЛТСС относят керамику, обжигаемую при температурах ниже $1000^\circ C$.

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

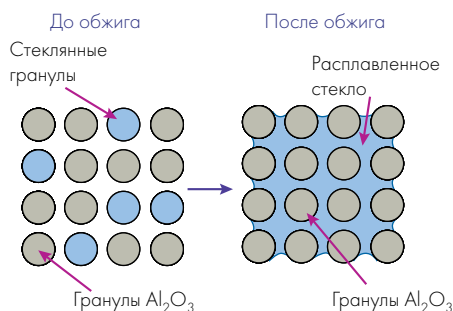


Рис.1. Структура низкотемпературной керамики



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 сопротивлением (Ag, Au, Pt).

- *Превосходная механическая стабильность и сохранение линейных размеров,* что обеспечивается не только малым коэффициентом теплового расширения (5–7 мкм/м°С), но и эластичными свойствами материала в широком диапазоне температур. Плотная структура LTCC керамики не пропускает влагу, поэтому корпуса из нее могут быть использованы в высоковлажностной 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

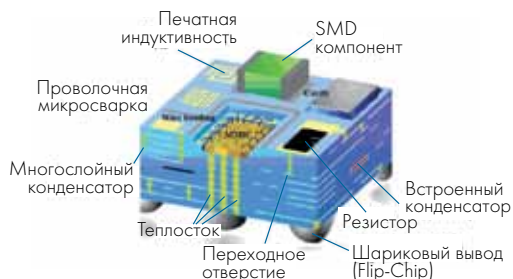


Рис.2. Многослойная плата из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики

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, телекоммуникационных 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 необходи-

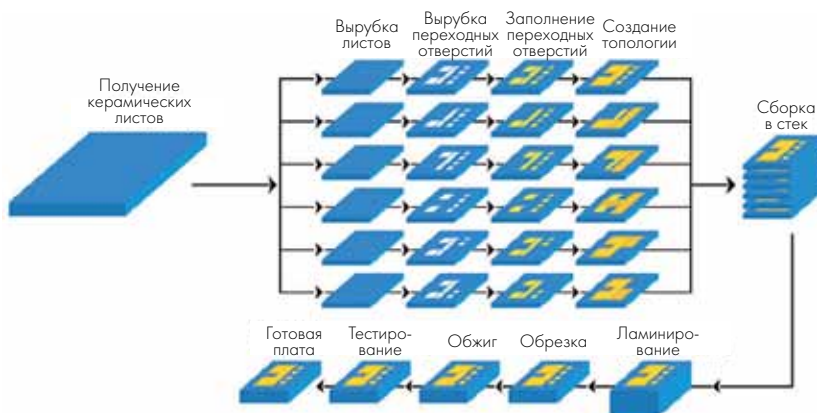


Рис.3. Процесс производства многослойных плат из низкотемпературной керамики

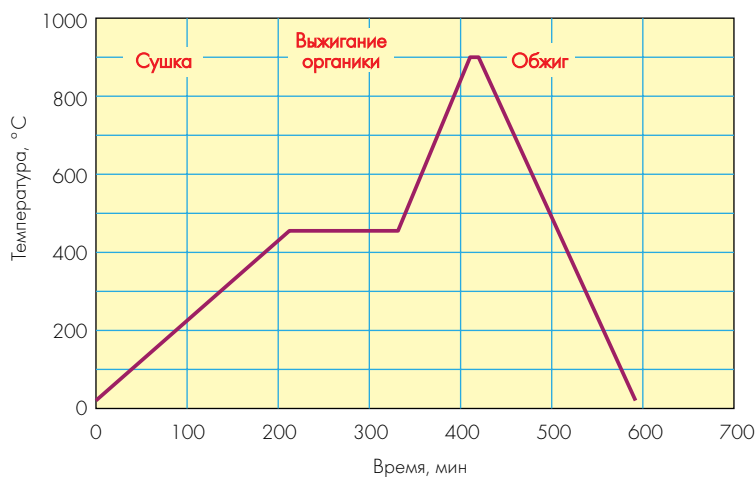


Рис.4. Температурный профиль для обжига низкотемпературной совместно обжигаемой керамики

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 ламинирования 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 (ось X, Y) и на 10–30% в направлении, перпендикулярном ей (ось 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 на убоемый 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

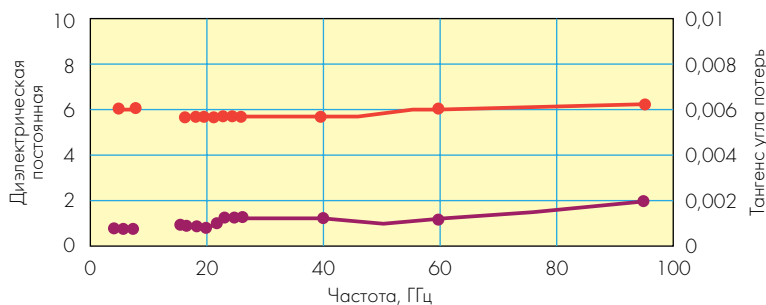


Рис.6. Характеристики низкотемпературной керамики на высоких частотах (Ferro A6-S)



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 проволоочной 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 $\pm 200 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$. Доступны также параэлектрические 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 присутствует 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-

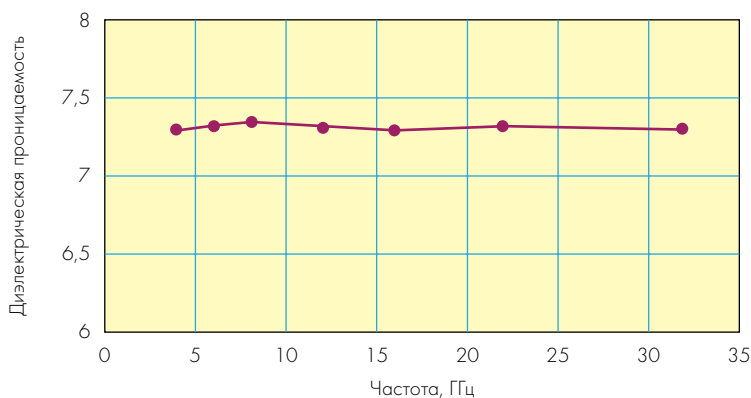


Рис.7. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (керамика Ferro L8)

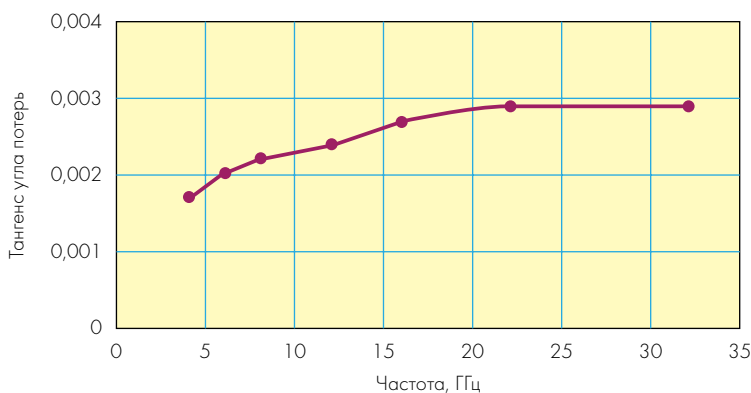


Рис.8. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты (керамика Ferro L8)

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-S – альтернатива А6-М для СВЧ-изделий. А6-S создана на основе запатентованного кальциевого бор-силикатного 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. ■