

УДК 67.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР С МАТАЛЛИЗАЦИОННЫМИ СЛОЯМИ ИЗ LTCC КЕРАМИКИ

Д.А. Вайман¹, И.Б. Красный¹, В.С. Данилов¹, С.А. Кумачева²

¹Новосибирский государственный технический университет

²Сибирский государственный университет путей сообщения

Статья посвящена исследованию технологических аспектов формирования объемных деталей с металлизационными слоями на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики – Low temperature co-fired ceramic (LTCC). Эта керамика обладает рядом преимуществ, по сравнению с высокотемпературной технологией HTCC (high temperature co-fired ceramic – высокотемпературная совместно обжигаемая керамика), для получения электронных изделий, в том числе работающих в СВЧ диапазоне. В работе представлены результаты библиографического анализа и практической реализации технологии формирования металлокерамической структуры из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики «А6М» фирмы «FERRO». На примере аналога корпуса светодиода NaikuTech рассмотрены принципиальные особенности выполнения многих технологических операций. Для практической реализации используется самая современная технологическая линия оборудования фирмы «КЕКО Equipment». Приведены оптимальные параметры выполнения тех или иных операций. Также представлены основные особенности перфорации керамических листов. Рассмотрены дефекты и основные сложности заполнения отверстий металлизацией методом трафаретной печати. Для достижения максимальной сохранности топологии стека при воздействии большого давления и оптимизации процесса ламинирования образцов используется специальный формообразующий силикон. Приводится анализ температурной кривой фирмы «FERRO» и ее оптимизация под условия спекания в лабораторной печи. Представленные результаты измерения плотности, фотографии микроструктуры керамики и металлизационного слоя позволяют выполнить оценку возможности технической реализации различных видов изделий на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики и выделить основные перспективы ее развития. К тому же обзор многих «скрытых» проблем, которые возникали в ходе отработки технологических режимов, позволит учесть их в будущем при реализации других изделий.

Ключевые слова: LTCC, HTCC, керамика, стекла, перфорация, металлизация, ламинирование, стек, обжиг, майлар.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45

Введение

LTCC – это совокупность диэлектрического материала и высокопроводящей металлизационной пасты, которые образуют трехмерную интегральную систему и спекаются одновременно за один технологический цикл. Данный материал используется в электронной промышленности для изготовления корпусов, многослойных структур и СВЧ устройств [1].

Несмотря на то что данный материал был получен в результате совместных работ ученых США и Японии более 30 лет назад, широкого распространения он не получил в силу того, что для производства электронных компонентов из него от производителя требуется значительное вложение средств в технологическое оборудование [2–4].

Но ситуация меняется, и в настоящий момент развитие электронной техники достигло того этапа, когда дальнейшая эволюция невозможна без применения инновационных материалов.

В то же время происходит постоянное улучшение физикомеханических свойств LTCC материалов и совершенствование технологии их производства. Это приводит к постепенному снижению стоимости и расширению областей использования.

Производители передовых электронных устройств, работающих в СВЧ диапазоне, проявляют большой интерес к данному классу керамики благодаря следующим его преимуществам и особенностям.

- Низкая температура спекания ($750...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), что существенно упрощает производственный процесс и позволяет использовать низкоомные металлизационные пасты на основе серебра, золота и т.д. (по сравнению с HTCC технологией) [1, 8].

- Механическая устойчивость и сохранение стабильных линейных размеров обеспечиваются малым коэффициентом теплового расширения, значение которого близко ко многим известным полупроводниковым материалам, что позволяет устанавливать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы.

- Низкие диэлектрические потери, стабильные в широком диапазоне частот. Для разных типов систем диэлектрическая проницаемость LTCC керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,001 до 0,006 в СВЧ диапазоне.

- Возможность создания трехмерных структур до 80 и более рабочих слоев. LTCC системы позволяют создавать полости, отверстия, использовать встроенные пассивные компоненты.

Благодаря перечисленным достоинствам LTCC технология успешно применяется производителями многослойных плат для ВЧ и СВЧ корпусов микросхем и электронных приборов. LTCC материалы имеют неоспоримый потенциал развития и совершенствования для того, чтобы составить серьезную конкуренцию многослойным платам из стеклотекстолита и высокотемпературной керамики [5].

1. Технология LTCC

Во многих литературных источниках [5, 6, 10] приводится следующая схема технологического процесса изготовления устройств на основе LTCC керамики (рис. 1). Процесс производства изделий из LTCC керамики начинается с создания керамической суспензии путем смешивания керамического порошка, специальных стекол, органических связующих, растворителей и модифицирующих добавок. Из суспензии впоследствии формируется керамическая лента. Далее лента нарезается на листы необходимого размера, в соответствии с имеющимся оборудованием, зачастую это $6\times 6'$ или $8\times 8'$. Керамические листы, как правило, имеют толщину от 50 до 250 мкм и являются базовым материалом для производства изделий. От качества таких листов зависят стабильность и повторяемость параметров процесса производства устройств. Также характеристики керамических листов определяют функциональные возможности готовых изделий. В зависимости от решаемой задачи исходная лента может быть разной и модифицирована добавками с различными электрическими и физическими свойствами. Стоит отметить, что основными производителями LTCC керамики являются компании «DuPont» (США) и «FERRO» (США). Они продают «сырые» керамические листы (в зарубежном варианте «Green Tape») различных толщин, размеров, с разными характеристиками [1]. Технология производства данных материалов держится в стро-

жайшем секрете, так как основная продукция на основе данной керамики направлена на военную промышленность. На сегодняшний день задача разработки отечественной LTCC керамики и ее изготовления является актуальной задачей для развития электроники в России [2].

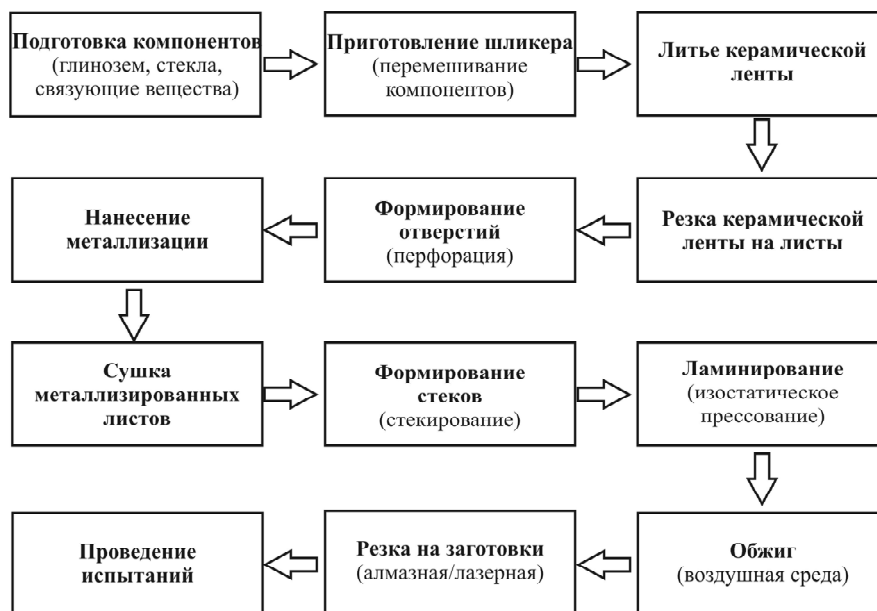


Рис. 1 – Блок-схема технологии изготовления объемных изделий на основе LTCC керамики

Fig. 1 – A block diagram of manufacturing techniques volumetric devices based on LTCC ceramics

Для детального знакомства с технологией формирования трехмерных структур с металлизационными слоями в качестве примера будет рассмотрен процесс освоения аналога малоомощного светодиодного корпуса поверхностного монтажа фирмы HaikuTech (рис. 2).

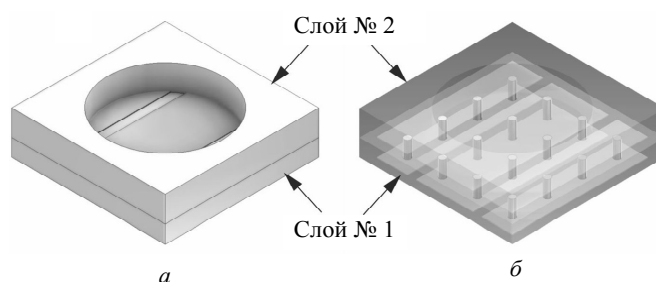


Рис. 2 – Аналог корпуса светодиода HaikuTech

Fig. 2 – The analogue of LED package Haiku Tech

Корпус состоит из двух основных слоев: слой № 1 – это основание, которое имеет металлизированные площадки сверху и снизу и переходные металлизированные отверстия для обеспечения электрического контакта и снижения теплового сопротивления корпуса (рис. 2, б); слой № 2 – это так называемый «колодец»,

который предназначен для того, чтобы в последующем кристалл светодиода залить люминофором (рис. 2, а).

В данной работе для создания корпуса светодиода используется LTCC керамика фирмы «FERRO», марка керамики «А6М», толщина листов 110 мкм. Также в комплекте с листами используются металлизационные пасты на основе серебра той же фирмы, для металлизации внешнего слоя: «CN33-498», для заполнения отверстий: «CN33-495», для металлизации отверстий: «CN33-493».

Чтобы сформировать полости или переходные отверстия, которые будут в последующем металлизироваться и образовывать контакт между слоями, проводят процесс пробивки отверстий в «сырых» листах керамики. Также данную операцию еще называют «перфорация» керамики, для ее выполнения листы керамики должны быть равномерными по толщине, гладкими и эластичными. Стоит отметить, что на операции литья керамической пленки керамический слой отливается на специальную несущую пленку, для этого используют «майлар» [5–7]. Данная пленка нужна для того, чтобы керамический слой легко поддавался обработке на следующих операциях.

На рис. 3 наглядно представлены основные виды дефектов перфорации: керамический лист хрупкий и крошится при пробивке отверстий пуансоном (рис. 3, а); керамический лист слишком мягкий и по краям отверстия образуются заусенцы (рис. 3, б); при изнашивании пуансона образуется замятие кромок на несущей пленке (рис. 3, в). Существует много работ, посвященных другим методам формирования отверстий и полостей, некоторые из них представлены в источниках [6–9].

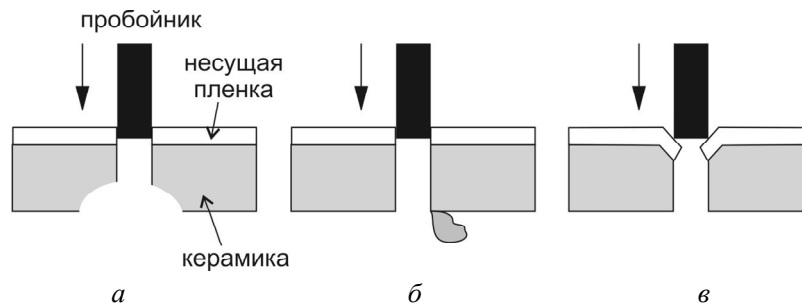


Рис. 3 – Основные виды дефектов керамической пленки при пробивке отверстий:

а – сколы и трещины; б – заусенцы, адгезия обрезков; в – вмятины на пленке

Fig. 3 – The main types of ceramic film defects when punching holes:

а – chipped and cracked; б – burrs, adhesion of scraps; в – dent on film

Практическая реализация данной операции проводилась на установке перфорации «КЕКО Equipment PAM-8S». Для изготовления корпуса светодиода учитывалась усадка по толщине примерно 16–17 %, произведена перфорация отверстий пяти листов LTCC керамики слоя № 1 и семи листов слоя № 2 [13–14]. Также выявлена следующая характерная особенность данной операции, которую необходимо учитывать, заключается она в том, что если нет пуансона необходимой формы и диаметра, то выбивать полости необходимо с помощью множества пробитий отверстий меньшего диаметра (рис. 4).

К тому же при выполнении данной операции необходимо учитывать геометрическую усадку, в зависимости от формы элемента и его размеров она может отличаться более чем на 2 % от средней усадки на изделии. В зависимости от формы полостей и их количества данная операция может занять много времени.

Рис. 4 – Отверстия диаметром 3 мм, выполненные пуансоном диаметром 0,2 мм

Fig. 4 – The holes 3 mm in diameter carried out of 0.2 mm diameter punch



Для нанесения металлизации на «сырые» листы керамики зачастую применяют метод толсто пленочной трафаретной печати, при этом для печати используется специальная сетка-трафарет с так называемой «маской», которая формирует защитный слой там, где это необходимо. Ракель, проходя с определенным усилием и скоростью по трафарету, проталкивает металлизационную пасту через отверстия маски трафарета так, что паста наносится на лист керамики (рис. 5). Тип металлизационной пасты, давление ракеля, зазор между трафаретом и листом керамики и т. д. являются ключевыми факторами, влияющими на качество и повторяемость операции [6].

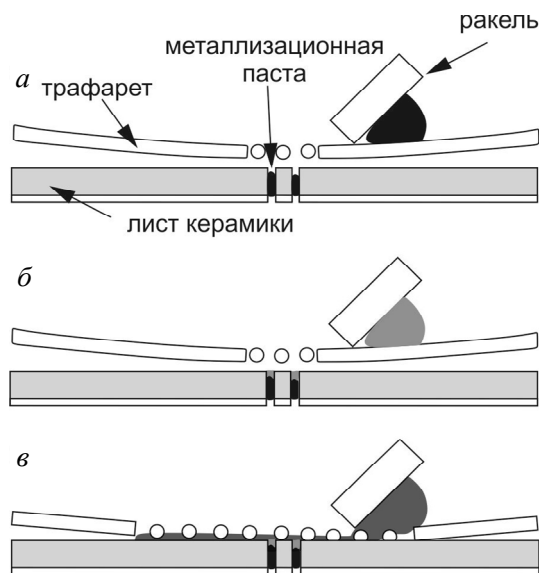


Рис. 5 – Основные этапы нанесения металлизационных паст:

a – металлизация отверстий пастой CN33-493; *b* – повторная металлизация отверстий пастой CN33-495; *в* – нанесение металлизационного слоя на поверхности керамики пастой CN33-498

Fig. 5 – The main stages of applying metallization pastes: *a* – hole metallization paste CN 33-493; *b* – re-plating holes paste CN33-495; *c* – applying metallization layers on the surface of the ceramic paste CN33-498

В работе были использованы металлизационные пасты фирмы «FERRO». Первым шагом произведена металлизация переходных отверстий пастой CN33-493 (рис. 5, *a*), она предназначена для заполнения сквозных отверстий. Так как данная

паста является достаточно вязкой, то она не полностью заполняет все отверстия и поэтому листы проходят повторную металлизацию отверстий с пастой CN33-495 (рис. 5, б). На третьем этапе наносятся металлизационные слои на поверхности листов керамики с помощью пасты CN33-498 (рис. 5, в). После каждого этапа нанесения металлизации листы керамики проходят воздушную сушку при температуре потока воздуха 90 °С. Металлизация поверхности и отверстий связана с подбором большого количества технологических параметров. Наиболее оптимальные режимы для нанесения металлизационных паст на установку «КЕКО Equipment P-200AVF», при которых получены хорошие результаты, представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры режимов металлизации
Parameters modes metallization

№	Характеристика	CN33-493	CN33-495	CN33-498
1	Зазор между трафаретом и листом керамики, мм	0,7	0,7	0,7
2	Давление на ракель, МПа	0,05	0,05	0,05
3	Скорость движения скребка, мм/с	40	40	40
4	Скорость движения ракеля, мм/с	40	60	60
5	Угол наклона ракеля (между керамическим листом и самим ракелем), град.	45	60	60
6	Количество проходов, шт.	4	2	2

Следующим этапом создания керамических корпусов светодиодов является операция формирования стеков, которая включает в себя процесс совмещения листов керамики между собой и сборку их в стопку. Для того чтобы точно совместить все слои между собой, еще на этапе формирования отверстий на каждом листе пробиваются специальные реперные метки, на рис. 6 они обведены окружностями.

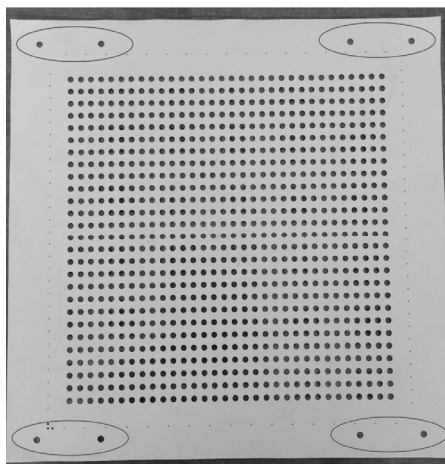


Рис. 6 – Реперные метки на листе керамики

Fig. 6 – Fiducially mark on the sheet ceramic

При отработке режима стекирования на установке укладки керамических листов в стопку «КЕКО Equipment SW-8V» основным дефектом было прилипание первого листа керамики к захватывающей головке стекера, что приводило к сме-

щению листов относительно друг друга. Для устранения этого дефекта время прессования было уменьшено с 10 до 1 секунды. Также температура стола и головки стекера была установлена на 25 °С. К тому же было выявлено, что если металлизированные листы недостаточно просохли, то они также могут прилипнуть к захватывающей головке в машине укладки керамических листов в стопку.

Далее собранный стек ламинируется (прессуется). В данном случае важно сохранить топологию стека неизменной, потому что велик риск искажения отверстий и полостей во время прессования [10–12].

Для прессования стека был подобран оптимальный режим ламинирования на установке «КЕКО Equipment ILS-66»: температура жидкости 55 °С; время нагрева стека 5 минут, прессование осуществлялось в течение 15 минут при давлении в 25 МПа. Для этого стек был покрыт специальным формообразующим силиконом Mold Max 40 (рис. 7), при данном режиме «рельеф» стека сохранился неизменным. В источнике [8] приводят следующие основные материалы: силиконовые вкладыши, майларовые вставки, органические вещества, которые выгорают при обжиге.



Рис. 7 – Стек, залитый силиконом

Fig. 7 – Stack, filled with silicone

После ламинирования стек был разрезан на заготовки с помощью установки резки «сырой» керамики КЕКО СМ-15. Если неправильно подобрана температура стола, то велик риск поломки лезвия на установке, а если температура лезвия слишком высокая, то большой шанс того, что керамика будет прилипать к лезвию и вызывать деформации в стеке. Поэтому было выявлено, что ЛТСС керамика становится «мягкой» при температуре стола 50 °С, а оптимальная температура ножа – 80 °С. Резка осуществлялась по специальным меткам, которые были нанесены на листы на этапе перфорации (рис. 8).

Спекание ЛТСС керамики производится за один этап в две стадии (рис. 9). Первая стадия – нагрев до 450 °С с выдержкой в течение двух часов, это необходимо для эффективного процесса удаления всех органических связующих, которые придавали «сырым» листам керамики форму и эластичность. На второй стадии происходит спекание керамики: нагрев до 850 °С с выдержкой 15 минут [1].

В отличие от спекания многих других керамик спекание LTCC керамики является очень коротким и менее энергоемким процессом, например, керамика ВК-96, которая используется в HTCC технологии, требует отдельно удаления связки и обжига, каждый из процессов длится не менее 12 часов.

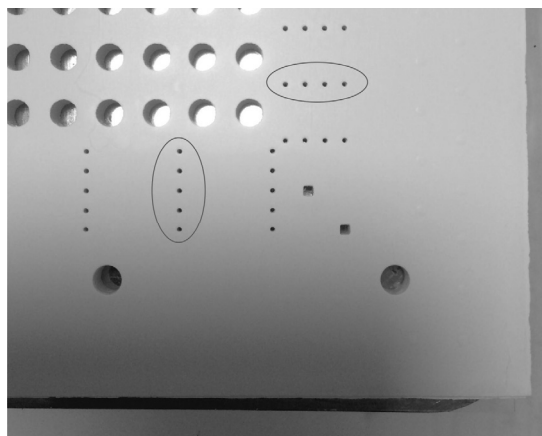


Рис. 8 – Пример отображения реперных меток для установки резки на заготовки CM-15

Fig. 8 – Example display reference marks for equipment cutting into blanks CM-15

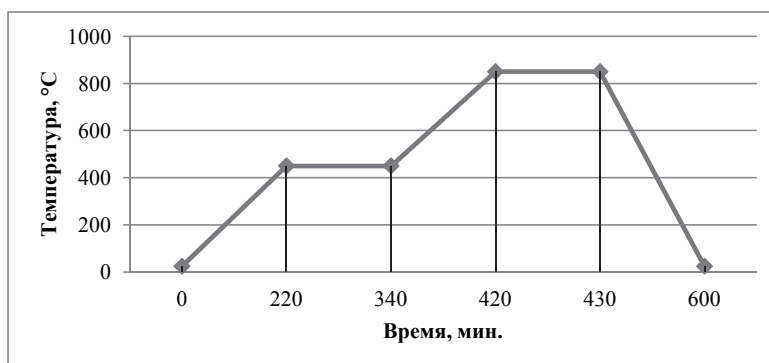


Рис. 9 – График обжига LTCC керамики

Fig. 9 – The graph firing LTCC ceramic

Первое спекание светодиодных корпусов было проведено в лабораторной печи «Nabertherm LHT 08/18». Корпуса были помещены в специальную керамическую лодочку, по рекомендованному компанией «FERRO» режиму с максимальной температурой 850 °C, общее время спекания 10 часов, температурный график представлен на рис. 9. В результате данного спекания на контактных площадках металлизация скаталась в шарики и стала расслаиваться, в отверстиях металлизация деформировалась, сами керамические корпуса дефектов (изгибов, трещин, сколов) не имели (рис. 10). После этого режим спекания был изменен, максимальная температура спекания была снижена до 780 °C при той же длительности процесса.

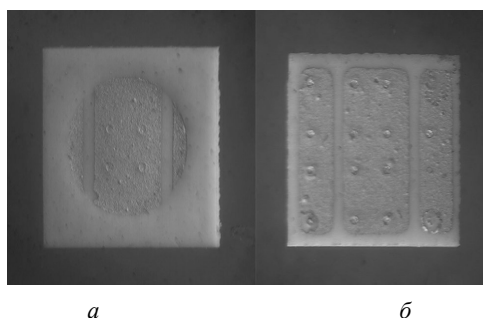


Рис. 10 – Изображение корпуса светодиода, спеченного при $T_{\max} = 850$ °C:

a – вид сверху; b – вид снизу

Fig. 10 – The image LED package sintered at $T_{\max} = 850$ °C:

a – top view; b – bottom view

2. Результаты

После процесса оптимизации температурной кривой спекания корпусов светодиодов были получены готовые образцы (рис. 11). Данные образцы обладают хорошей адгезией металлизационного слоя, дефекты керамики отсутствуют.

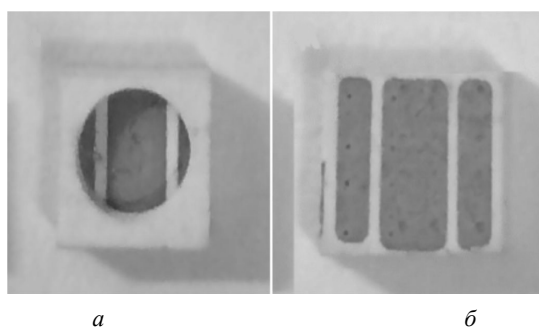


Рис. 11 – Изображение корпуса светодиода, спеченного при $T_{\max} = 780$ °C:

a – вид сверху; b – вид снизу

Fig. 11 – The image LED package sintered at $T_{\max} = 780$ °C:

a – top view; b – bottom view

Полученные образцы, спеченные при температуре 780 °C, были исследованы на установке рентгенофазового химического анализа, результаты представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Рентгенофазовый анализ химического состава керамики

X-ray analysis of the chemical composition of the ceramic

№	Компонент	Процентное соотношение по массе
1	Al_2O_3	53,2
2	BaO	24,73
3	SiO_2	18,21
4	CaO	2,36

Окончание табл. 1

№	Компонент	Процентное соотношение по массе
5	TiO ₂	0,841
6	Cs ₂ O	0,147
7	Na ₂ O	0,124
8	MgO	0,0736
9	Другие	0,3144
Всего		100 %

Таблица 3 / Table 3

Рентгенофазовый анализ химического состава металлизации
X-ray analysis of the chemical composition of the metallization

№	Компонент	Процентное соотношение по массе
1	Ag	76,74
2	K	4,66
3	Zn	4,2
4	Ru	3,6
5	Другие	14,4
Всего:		100 %

Стоит отметить, что керамика FERRO A6M состоит примерно на 53 % из оксида алюминия, остальная часть – стеклодобавки. Органические компоненты в данном случае не учитываются, так как они выгорают при температур 300–450 °С [5]. Что касается состава металлизационного слоя на поверхности светодиода (табл. 3), то более 76 % слоя состоит из серебра, а остальное это добавки для компенсации температурного коэффициента линейного расширения и высокой адгезии к керамике. Равномерность распределения толщины металлизационного слоя на поверхности керамики можно рассмотреть на фотографии поперечного аншлифа корпуса светодиода (рис. 12).

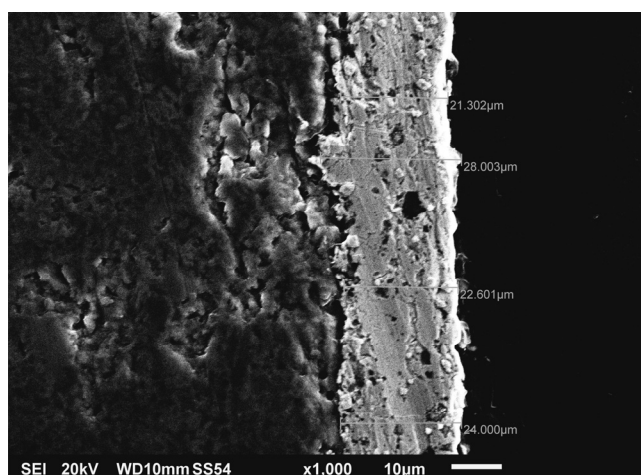


Рис. 12 – Фотография микроструктуры поперечного аншлифа корпуса светодиода, увеличение ×1000

Fig. 12 – Photo microstructure cross-polished sections of the LED package, an increase ×1000

У изготовленных светодиодных корпусов были измерены физические характеристики LTCC керамики.

- Плотность: $2,76 \text{ г/см}^3$.
- Коэффициент водопоглощения керамики: 0,0133.
- Коэффициент пористости: 0,05.

Если сравнивать данные показатели с характеристиками керамического материала ВК-96, то они ничуть не хуже нормированных значений (плотность не менее $3,75 \text{ г/см}^3$; коэффициент водопоглощения керамики не более 0,02; коэффициент пористости не более 0,07). Фотография микроструктуры поверхности LTCC керамики представлена на рис. 13 [13–15].

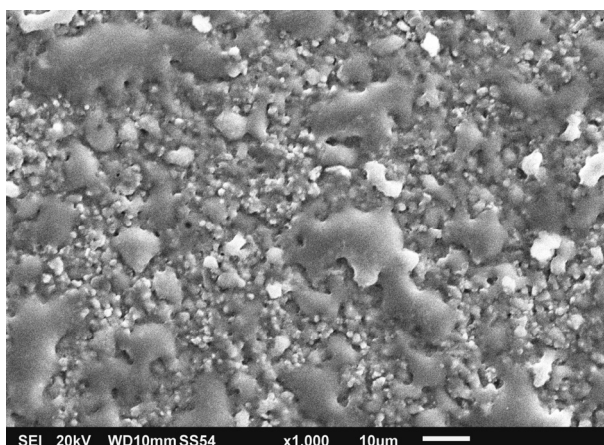


Рис. 13 – Фотография микроструктуры поверхности LTCC керамики спеченного корпуса светодиода, увеличение $\times 1000$

Fig. 13 – Photo surface microstructure of the sintered LTCC ceramic LED package, an increase $\times 1000$

В результате проведения многих технологических операций и сопоставления полученных данных можно сделать следующие выводы.

- В первую очередь, на операции формирования отверстий, листы керамики нужно располагать несущей пленкой вверх, со стороны пробойника (пуансона). Также стоит учитывать, что перфоратор ограничен в наборе пуансонов, многие отверстия и полости необходимо выполнять с помощью множества пробитий отверстий пуансоном меньшего диаметра, а это приводит к шероховатым краям отверстий в керамике, заусенцам и увеличению длительности процесса.

- Состав и вязкость металлизационных паст напрямую влияют на параметры технологического процесса. Многие параметры трафаретной печати зависят друг от друга, например, изменение давления ракеля на трафарет влияет на количество проходов. В данной работе мы увеличили количество проходов с одного до трех и в два раза уменьшили давление на рапель, чтобы не «растягивать» трафарет.

- Процесс ламинирования стека является очень сложным, так как необходимо сохранить исходную топологию стека. В изостатическом прессе давление осуществляется жидкостью и распределяется равномерно. В связи с этим нами было разработано решение использовать специальный формообразующий силикон, который заполняет все полости и застывает, а после проведения операции легко отделяется от керамики. Также, чтобы исключить попадание воды внутрь стека, его упаковывают в специальные полиэтиленовые пакеты в вакуумной установке.

- Температура спекания LTCC керамики ниже 1000 °С; так как мы использовали в своих экспериментах печь, предназначенную для спекания высокотемпературной керамики, то погрешность термопары в печи при невысоких температурах сыграла свою роль и пришлось корректировать рекомендуемый производителем керамики температурный режим.

Заключение

В данной работе представлено исследование влияния технологических аспектов на формирование трехмерных структур с металлизационными слоями из LTCC керамики. По результатам видно, что существует много факторов и особенностей, влияющих на выполнение каждой операции, которые напрямую отражаются на качестве готовых изделий. Стоит отметить, что в данной статье рассмотрен процесс изготовления одного изделия – аналога маломощного корпуса светодиода фирмы NaïkuTech, но для другого типа изделий принципиально важными могут быть совершенно разные виды операций. В работе рассмотрены такие операции, как формирование отверстий, металлизация, сборка стеков, ламинирование, обжиг и др. К тому же результаты данной статьи свидетельствуют о высокой степени универсальности данной технологии, которая позволяет реализовать изделия из керамики практически любой сложности. Низкотемпературная совместная обжигаемая керамика является оптимальным материалом для разработки многих электронных устройств как низкочастотного, так и СВЧ диапазона, данная технология при массовом производстве является более экономически привлекательной, чем многие существующие аналогичные технологии [16–17].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кондратюк Р.** LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // *Наноиндустрия*. – 2011. – № 2. – С. 26–30.
2. Разработка отечественного керамического материала для изготовления изделий по технологии LTCC / Ю. Непочатов, С. Кумачева, Ю. Швецова, А. Дитц // *Современная электроника*. – 2014. – № 4. – С. 12–14.
3. **Потапов Ю.** Особенности технологии проектирования и производства LTCC-модулей // *Технологии в электронной промышленности*. – 2008. – № 3. – С. 59–64.
4. **Перцель Я., Яковлев А.** Преимущества использования технологии низкотемпературной керамики для реализации радиоэлектронных устройств // *Современная электроника*. – 2012. – № 8. – С. 16–17.
5. **Mistler R.E., Twiname E.R.** Tape casting: theory and practice. – Westerville, OH: American ceramic society, 2000. – 298 p.
6. **Imanaka Y.** Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. – New York: Springer, 2005. – 229 p.
7. **King A.G.** Ceramic technology and processing. – Norwich, NY: William Andrew Publ., 2002. – 512 p.
8. **Gongora-Rubio M.R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L.** Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST) // *Sensors and Actuators*. – 2001. – Vol. 89. – P. 222–241. – doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
9. The numerical simulation of a subtractive process for the fabrication of 3D low temperature co-fired ceramics packaging structures and devices: jet vapor etching / I. Ramos, L. García, E.W. Simoes, R. Furlan, J.J. Santiago-Aviles, M.T. Pereira // *Nanotech.* – 2002. – Vol. 1. – P. 446–449.
10. **Golonka L.J.** Technology and applications of low temperature cofired ceramic (LTCC) based sensors and microsystems // *Technical Science*. – 2006. – Vol. 54. – P. 221–231.
11. **Wenxia L., Lannutti J.J.** Curvature evolution in LTCC tapes and laminates // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. – 2005. – Vol. 28 (1). – P. 149–156. – doi: 10.1109/TCAPT.2004.838860.

12. Laminated ceramic microfluidic components for microreactor applications / P.M. Martin, D.W. Matson, W.D. Bennett, D.C. Stewart, C.C. Bonham // 4th International Conference on Microreactor Technology. – New York, 2000. – P. 410–415.
13. **Zhou J.** Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials // Journal of Advanced Ceramic. – 2012. – Vol. 1 (2). – P. 89–99. – doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
14. **Besendorfer G., Roosen A.** Particle shape and size effects on anisotropic shrinkage in tape-cast ceramic layers // The American Ceramic Society. – 2008. – Vol. 91 (8). – P. 2514–2520. – doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02510.
15. Properties of LTCC dielectric tape in high temperature and water environment / S. Toskov, A. Maric, N. Blaz, G. Miskovic, G. Radosavljevic // International Journal of Materials. – 2013. – Vol. 1 (4). – P. 332–336. – doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.72.
16. Dielectric properties of new glass-ceramics for LTCC applied to microwave or millimeter-wave frequencies / N. Mori, Y. Sugimoto, J. Harada, Y. Higuchi // Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – Vol. 26. – P. 1925–1928. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.09.023.
17. **El-Nawawy M., Allam A.M.M.A., Korzec D.** The design of a 0.35THz microstrip patch antenna on LTCC substrate // Electrical and Electronic Engineering. – 2011. – Vol. 1 (1). – P. 1–4. – doi: 10.5923/j.eee.20110101.01.

**RESEARCH INTO TECHNOLOGICAL ASPECTS
OF THE THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES FORMATION
WITH METALIZED LAYERS BASED ON THE LTCC CERAMIC**

Vayman D.A.¹, Krasny I.B.¹, Danilov V.S.¹, Kumacheva S.A.²

¹ *Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia*

² *Siberian transport University, Novosibirsk, Russia*

This paper is devoted to the study of various technological aspects of the formation of volumetric components with metalized layers on the basis of the low temperature co-fired ceramic (LTCC). This ceramic has a plurality of various benefits, as compared with the technology of HTCC (high temperature co-fired ceramic). The paper describes the technology of three-dimensional structure formation based on a review of papers addressing theoretical and practical realization of the low temperature co-fired ceramic A6M from the Ferro Company. The main principal features of per-forming operations are studied on the example of the analog HaikuTech LED package. The most up-to-date technological equipment from the KEKO Equipment Company is used for practical implementation. The optimal parameters of various operations are given. In addition, the paper presents the main features of ceramic sheet punching. Various defects and the main difficulties of filling holes with metallization by screen printing are considered. To achieve optimum integrity of the stack topology under the action of high pressure and to optimize the sample lamination process a special shaping silicone is used. Analysis of the temperature curve recommended by the Company Ferro and its optimization under sintering conditions in the laboratory furnace is presented. The results of measuring density, photographs of the microstructure ceramics and uniformity distribution of the metalized layer make it possible to evaluate the possibility of technical implementation of various products based on the low temperature co-fired ceramic and to identify the main prospects of its development. In addition, an overview of many "hidden" problems that arose during the development of processing methods will enable taking them into account in future implementation of other products based on low-temperature ceramics.

Keywords: LTCC, HTCC, ceramics, glass, punching, metallization lamination, stack, firing, mylar.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45

REFERENCES

1. Kondratyuk R. LTCC – nizkotemperaturnaya sovmestno obzhigaemaya keramika [LTCC – low temperature co-fired ceramic]. *Nanoindustriya – Nanoindustry*, 2011, no. 2, pp. 26–30.
2. Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu., Ditts A. Razrabotka otechestvennogo keramicheskogo materiala dlya izgotovleniya izdelii po tekhnologii LTCC [The development of the domestic ceramic material for the manufacture of devices on LTCC technology]. *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 4, pp. 12–14.
3. Potapov Yu. Osobennosti tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva LTCC-modulei [Features of technology design and manufacturing LTCC-modules]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti – Technologies in Electronic Industry*, 2008, no. 3, pp. 59–64.
4. Pertsel' Ya., Yakovlev A. Preimushchestva ispol'zovaniya tekhnologii nizkotemperaturnoi keramiki dlya realizatsii radioelektronnykh ustroystv [The advantages of using low-temperature ceramic technology for the implementation of electronic devices]. *Sovremennaya elektronika*, 2012, no. 8, pp. 16–17.
5. Mistler R.E., Twinn E.R. *Tape casting: theory and practice*. Westerville, OH, American ceramic society, 2000. 298 p.
6. Imanaka Y. *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*. New York, Springer, 2005. 229 p.
7. King A.G. *Ceramic technology and processing*. Norwich, NY, William Andrew Publ., 2002. 512 p.
8. Gongora-Rubio M.R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L. Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST). *Sensors and Actuators*, 2001, vol. 89, pp. 222–241. doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
9. Ramos I., García L., Simoes E.W., Furlan R., Santiago-Aviles J.J., Pereira M.T. The numerical simulation of a subtractive process for the fabrication of 3D low temperature co-fired ceramics packaging structures and devices: jet vapor etching. *Nanotech*, 2002, vol. 1, pp. 446–449.
10. Golonka L.J. Technology and applications of low temperature cofired ceramic (LTCC) based sensors and microsystems. *Technical Science*, 2006, vol. 54, pp. 221–231.
11. Wenxia L., Lannutti J.J. Curvature evolution in LTCC tapes and laminates. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2005, vol. 28 (1), pp. 149–156. doi: 10.1109/TCAPT.2004.838860.
12. Martin P.M., Matson D.W., Bennett W.D., Stewart D.C., Bonham C.C. Laminated ceramic microfluidic components for microreactor applications. *4th International Conference on Microreactor Technology*, New York, 2000, pp. 410–415.
13. Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials. *Journal of Advanced Ceramic*, 2012, vol. 1 (2), pp. 89–99. doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
14. Besendorfer G., Roosen A. Particle shape and size effects on anisotropic shrinkage in tape-cast ceramic layers. *The American Ceramic Society*, 2008, vol. 91 (8), pp. 2514–2520. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02510.
15. Toskov S., Maric A., Blaz N., Miskovic G., Radosavljevic G. Properties of LTCC dielectric tape in high temperature and water environment. *International Journal of Materials*, 2013, vol. 1 (4), pp. 332–336. doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.72.
16. Mori N., Sugimoto Y., Harada J., Higuchi Y. Dielectric properties of new glass-ceramics for LTCC applied to microwave or millimeter-wave frequencies. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, vol. 26, pp. 1925–1928. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.09.023.
17. El-Nawawy M., Allam A.M.M.A., Korzec D. The design of a 0.35THz microstrip patch antenna on LTCC substrate. *Electrical and Electronic Engineering*, 2011, vol. 1 (1), pp. 1–4. doi: 10.5923/j.eee.20110101.01.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вайман Дмитрий Александрович – аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка трехмерных структур на основе LTCC керамики для электронных устройств. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: dima-lnsk@mail.ru).

Vayman Dmitry Alexandrovich – graduate student at the Department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the development of three-dimensional structures based on LTCC ceramics for electronic devices. He is author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-lnsk@mail.ru).



Красный Иван Борисович – аспирант кафедры электронных приборов, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: формирование проводящих слоев на керамике. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kr.ivan.work@gmail.com).

Krasny Ivan Borisovich – graduate student at the Department of electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the forming conductive layers on ceramic. He is author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kr.ivan.work@gmail.com).



Данилов Вячеслав Семенович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: приборы СВЧ, оптического диапазона. Опубликовано свыше 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: danilov_vc@ngs.ru).

Danilov Vyacheslav Semenovich – Candidate of Science (Eng.), associate professor at the Department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high frequency devices, an optical range. He has over 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-lnsk@mail.ru).



Кумачева Светлана Аликовна – аспирант кафедры физики Сибирского государственного университета путей сообщения. Область научных интересов: разработка керамических материалов для СВЧ устройств. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. E-mail: kumachevasveta@rambler.ru).

Kumacheva Svetlana Alikovna – graduate student at the Department of Physics in Siberian Transport University. His research interests are currently focused on the development of ceramic materials for microwave devices. He is author of 5 scientific papers. (Address: 191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: kumachevasveta@rambler.ru).

Статья поступила 17 апреля 2016 г.

Received April 17, 2016

To Reference:

Vayman D.A., Krasny I.B., Danilov V.S., Kumacheva S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh aspektov formirovaniya trekhmernykh struktur s matallizatsionnymi sloyami iz LTCC keramiki [Research into technological aspects of the three-dimensional structures formation with metallized layers based on the LTCC ceramic]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 31–45. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45