

LTCC-система SK-47 от KEKO Equipment Ltd.

К. Макарович, PhD in material science¹, В. Мейлицев,
С. Чигиринский, к. ф. - м. н.²

УДК 666.651 | ВАК 05.27.06

Низкотемпературная совместно спекаемая керамика (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC) позволяет не только находить более эффективные конструкторские решения по сравнению с теми, которые могут быть реализованы с использованием традиционных материалов (FR4, поликор), но и в принципе менять подходы к проектированию многих типов электронных устройств. Неудивительно, что среди российских производителей электроники растет интерес к новациям на этом давно развитом за рубежом и активно развивающемся в России рынке.

Относительно недавно (с 2016 года) дополнительную мотивацию для роста рынка LTCC предложила словенская компания KEKO Equipment Ltd. (далее KEKO), разработавшая собственную систему LTCC-материалов под наименованием SK-47. В этой статье мы коротко расскажем о системе SK-47, а также о некоторых исследованиях, проводимых компанией KEKO с целью подтверждения и расширения технологических возможностей изделий микроэлектроники с применением данной системы.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Первый модуль на основе многослойной алюмооксидной керамики был разработан еще в 1950 году. Сегодня, когда появилась альтернатива, мы называем эту технологию HTCC – High Temperature Co-fired Ceramics, то есть высокотемпературная совместно спекаемая керамика. Специалистам хорошо известны как ее достоинства, так и недостатки. К последним относится прежде всего высокое сопротивление проводящих дорожек, для изготовления которых приходится использовать пасты на основе тугоплавких металлов: молибдена, вольфрама, молибден-марганцевого сплава. Иначе нельзя, поскольку типовая температура спекания HTCC составляет 1600 °C, и «классические» проводящие материалы с низким удельным сопротивлением – медь, серебро, золото – в таких условиях просто расплавляются (см. табл. 1).

Очевидно, что сравнительно высокое сопротивление проводящих дорожек в большей или меньшей степени неблагоприятно для любого электронного устройства; для некоторых же применений оно неприемлемо в принципе. С ростом быстродействия электроники, непрекращающейся ее миниатюризацией становилась все более актуальной задача: найти способ снизить температуру обжига керамических оснований, чтобы обеспечить возможность применения легкоплавких материалов с большой электропроводностью.

Задача была решена в начале 1980-х годов, когда впервые был создан композит из стекла и керамики с температурой

спекания порядка 850 °C, позволивший использовать в системах керамических материалов пасты на основе серебра и золота.

Так родилась технология LTCC. Преодолев главную проблему, свойственную высокотемпературной керамике, она дала разработчикам еще ряд перспективных возможностей. Так, при использовании проводящих материалов на основе серебра и палладия стало возможным проводить обжиг в обычной воздушной атмосфере – технологии HTCC для

Таблица 1. Точки плавления и удельное сопротивление металлов, используемых для создания токопроводящей структуры керамических оснований радиоэлектронных компонентов и устройств [1]

Материал	Точка плавления, °C	Удельное сопротивление, Ом · 10 ⁻³ · см
Серебро	960	1,6
Золото	1063	2,3
Медь	1083	1,7
Молибден	2610	5,8
Никель	1455	6,9
Палладий	1552	10,3
Платина	1769	10,6
Вольфрам	3410	5,5

¹ KEKO Equipment Ltd. (Словения), начальник научно-исследовательской группы, kostja@keko-equipment.com.

² ООО «АКМ», технический директор, sch@akmicrotech.ru.

этого требуется восстановительная среда (водород, формиргаз) – и при более низких температурах (850–900 °С для LTCC по сравнению с 1350–1600 °С для HTCC). Появилась возможность уйти от взрывоопасного газа, который нужно либо покупать, либо производить самим, а также значительно снизить энергозатраты при спекании. Более того, после спекания HTCC поверхностная металлизация должна быть никелирована и покрыта золотом, для чего необходимы гальванические линии под никелирование и золочение плюс соответствующие химикаты, площади под линии и отработка достаточно сложных процессов нанесения. В технологии LTCC финишные покрытия для улучшения паяемости необходимы только для малой части применений.

В целом можно отметить следующие минусы и плюсы LTCC в сравнении с HTCC (например, с ВК-94-1):

- минусы: более низкая теплопроводность – 2,9 Вт/м·К (СК-47) по сравнению с 13,4 Вт/м·К (ВК-94-1)*; меньшая диэлектрическая постоянная – $7,1 \pm 0,2$ при 10 ГГц у СК-47 и 10,3 у ВК-94-1; меньшая плотность – 2,9 г/см³ (СК-47) и 3,65 г/см³ (ВК-94-1);
- плюсы: помимо лучших характеристик паст, в LTCC значительно проще и короче процесс производства; требуются меньшие площади, меньшие энергозатраты, меньшее количество расходных материалов и, как итог, ниже себестоимость конечного продукта; в рамках технологии LTCC оказалось возможным сравнительно просто реализовать идею встроенных в объем подложки радиоэлементов, как минимум пассивных (резисторов, емкостей и индуктивностей).

В остальном LTCC и HTCC равноценны или близки по свойствам и возможностям.

СИСТЕМА SK-47

Компания КЕКО Equipment уже более 20 лет известна на мировом рынке как поставщик оборудования, практически полностью охватывающего технологический процесс изготовления многослойных керамических компонентов (LTCC, HTCC, MLCC, MLCI, PZT и т.д.) – от литья лент до неспеченного (до обжига) компонента; материалы же надо было приобретать у других производителей, таких как Ferro [3] и DuPont.

Более пяти лет назад руководство КЕКО пришло к выводу, что для укрепления положения компании надо не только совершенствовать свою продукцию, но и способствовать развитию рынка в целом; а для этого крайне необходимо в дополнение к линейке машин создать собственную систему LTCC-материалов – комплект из керамических листов и набора проводящих паст, наилучшим образом подходящих для той или иной операции из цикла создания



Рис. 1. Один из ведущих специалистов КЕКО Equipment, Костя Макарович, представляет LTCC-ленту шириной 425 мм и толщиной 100 мкм

LTCC-изделия. И такая система, названная СК-47, была впервые представлена на выставке productronica 2016.

Стандартная номенклатура керамического материала системы СК-47 представлена листами размером 6×6 и 8×8 дюймов (соответственно, 152,4×152,4 и 203,2×203,2 мм) толщиной 254, 165, 115 и 50 мкм. Но, в отличие от других компаний, продающих LTCC-материалы, у КЕКО можно заказать и другие габариты и толщины керамических карт (рис. 1).

Для реализации токопроводящей структуры компанией изготавливается ряд паст. Основные пасты представлены на рис. 2, их назначение приведено в табл. 2.

Кроме паст, приведенных в табл. 2, недавно выведена на рынок система паст (две пасты на основе серебра и две пасты на основе золота) для пайки коваровых элементов, созданная по той же концепции, что аналогичный материал компании DuPont. Дополнительно разработана резистивная паста для изготовления встроенных и поверхностных резисторов. Есть ряд паст, которые КЕКО на текущий момент разрабатывает по запросам клиентов.

Специалисты компании КЕКО не ставили себе целью разработать материалы, имеющие принципиальные отличия от аналогичных материалов других производителей. Напротив, совместимость по крайней мере с некоторыми из них следует отнести к достоинствам системы СК-47. Одним из доказательств такой совместимости может

* Этот недостаток можно обойти, отводя значительное количество тепла при помощи теплостоков – переходных отверстий, заполненных пастой на основе серебра [2].



Рис. 2. Основные пасты системы SK-47

служить положительный результат эксперимента по изготовлению датчика давления на керамике SK-47 с использованием резистивной пасты DuPont 951 (удельное сопротивление $10 \text{ КОМ} \cdot \text{м}$), проведенного КЕКО в сотрудничестве с Институтом имени Йозефа Штефана в г. Любляна (Словения) (рис. 3). Есть и другие примеры, например, изготовление элемента активной фазированной решетки на керамике SK-47 и пастах DuPont 951.

ИСПЫТАНИЯ ПАСТ СИСТЕМЫ SK-47

Помимо комплекса тестов, обязательных перед выводом продукта на рынок, компания проводила и проводит дополнительные испытания для максимально полного изучения свойств системы и выявления потенциала ее использования в разных условиях. Так, были организованы исследования для уточнения возможностей разварки проволокой на пасты различного назначения – в силу ряда причин вопросы об этом можно часто услышать от российских производителей. Испытания проводились

при ультразвуковой разварке методом «шарик-клин» на установке F&K Delvotec 5310 в Институте имени Йозефа Штефана.

Первая серия тестов проводилась с золотой проволокой диаметром 25 мкм типа Heraeus Au HD2. Кроме пасты AuB-1, специально разработанной для сварных соединений, испытывались пасты AuI-1 (золотосодержащая, для внутренней/внешней металлизации) и AgPdS-1 (серебросодержащая, для внешней металлизации под пайку). Параметры процесса: температура подогрева подложки 120°C , усилие прижатия 25 г, мощность ультразвука 125/255 условных единиц, длительность импульса 25 мс.

Результаты испытаний приведены на рис. 4. Как видно на микрофотографиях, на образце с металлизацией, выполненной пастой AuB-1, специально предназначенной для разварки, в большинстве случаев рвалась проволока, а сварные соединения выдерживали нагрузку. На образцах с металлизацией на основе паст AuI-1 и AgPdS-1 соединения разрушались, но в целом можно сделать вывод, что разварку на данных металлизациях делать можно. Что же касается серебросодержащей AgPdS-1, то ее сравнительно низкие и нестабильные результаты могут быть улучшены, если перед сваркой провести плазменную очистку поверхности. Включение этой операции в технологический процесс не представляется значимой проблемой: многие производители уже считают ее необходимой и ввели обязательную плазменную очистку перед пайкой кристаллов и разваркой в стандарт предприятия.

Таким образом, система SK-47 дает пользователю определенную свободу выбора: имея в виду показанные здесь

Таблица 2. Марки основных паст КЕКО и их назначение

Марка пасты		Назначение пасты
КЕКО AgI-1	На основе серебра	Внутренняя (внешняя) металлизация
КЕКО AgPdS-1		Внешняя металлизация, под пайку
КЕКО AgV-1		Заполнение переходных отверстий
КЕКО AuI-1	На основе золота	Внутренняя (внешняя) металлизация
КЕКО AuB-1		Внешняя металлизация, под разварку
КЕКО AuV-1		Заполнение переходных отверстий
КЕКО AuPtS-1		Внешняя металлизация, под пайку

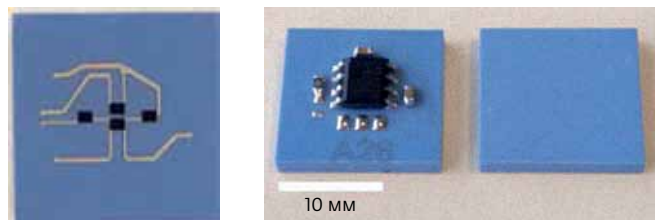


Рис. 3. Элемент датчика давления и сам датчик, в котором керамика системы КЕКО SK-47 работает совместно с резистивной пастой DuPont 951

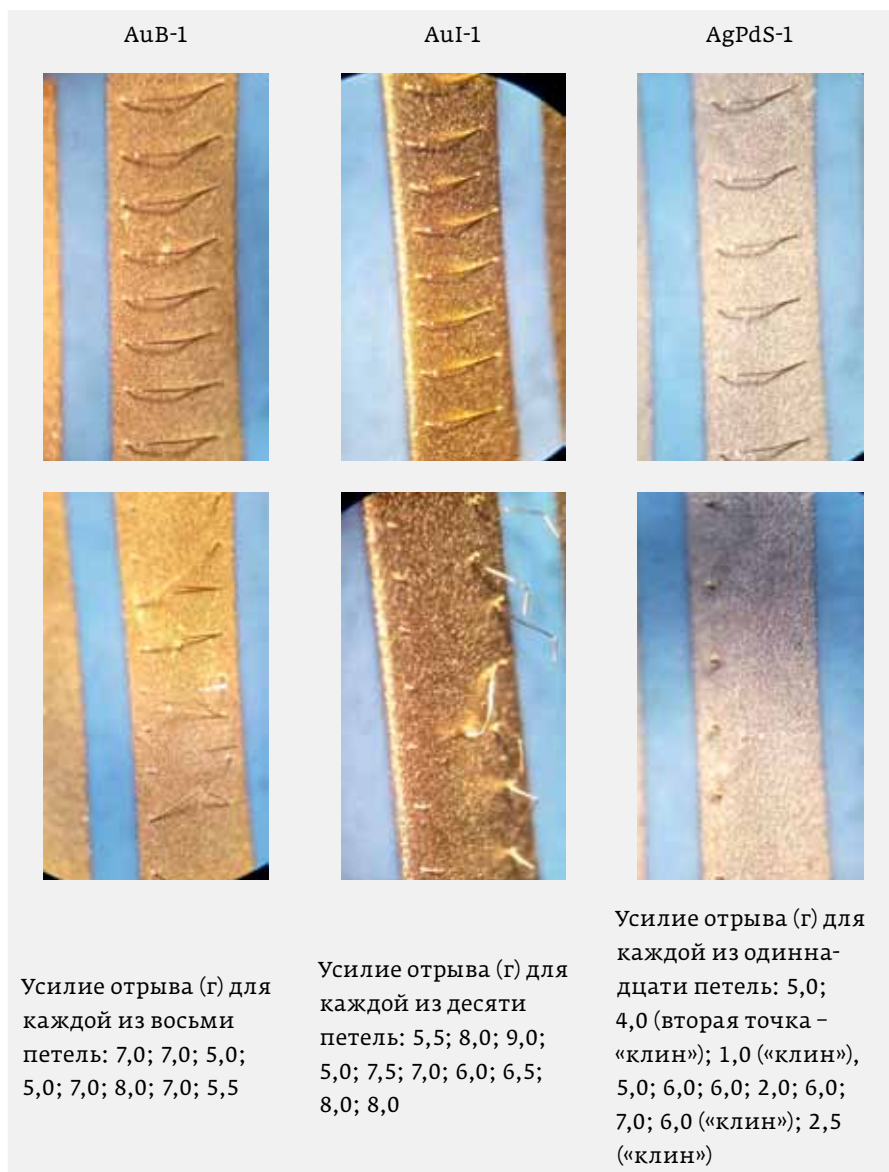


Рис. 4. Результаты тестирования разварки золотой проволоки диаметром 25 мкм на пасты системы SK-47

результаты тестирования, он может принять решение о сокращении номенклатуры приобретаемых материалов или их использовании в пределах одного продукта. При этом все же необходимо подчеркнуть, что наилучшие результаты по надежности можно получить, только применяя пасты в соответствии с их целевым назначением.

Интересно отметить тот факт, что аналогичные испытания, проведенные на производственной базе одного из профильных предприятий РФ с использованием полуавтоматической установки микросварки K&S 4524AD, дали почти в точности такие же результаты, как тестирование в Институте им. Йозефа Штефана.

В еще одной серии тестов производилась разварка на «сварочную» пасту AuB-1 проволоки того же

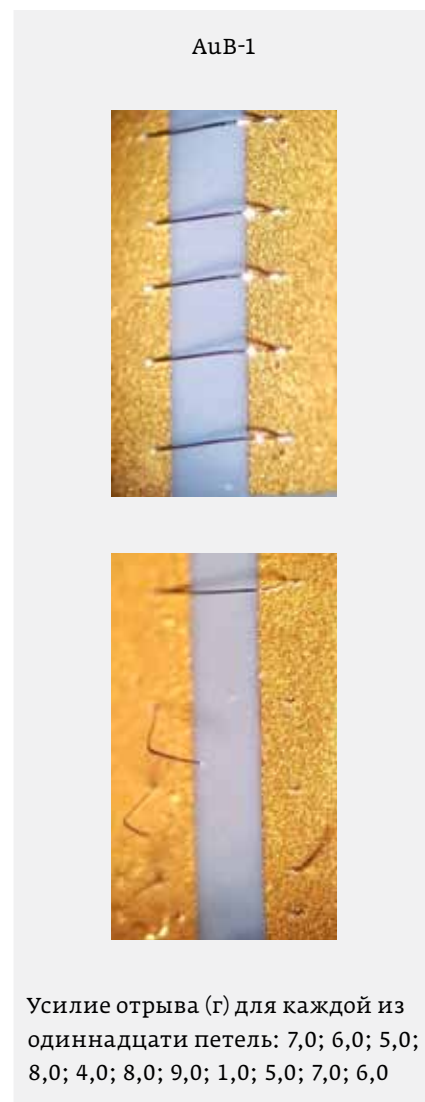


Рис. 5. Результаты тестирования разварки алюминиевой проволоки диаметром 25 мкм на золотосодержащую пасту AuB-1

диаметра – 25 мкм, но алюминиевой, типа Heraeus ALW-29S. Параметры процесса были теми же, что и в предыдущей серии тестов, за исключением температуры подогрева подложки, которая в данном случае составляла 60 °С. Подобно первой серии, эти испытания также дали положительный результат (рис. 5).

При производстве компонентов силовой электроники соединение входных/выходных цепей кристалла с контактными площадками подложки производится проволокой большого сечения. Такие испытания также были проведены – на серебросодержащие пасты КЕКО AgPdS-1 и КЕКО AgI-1 разваривалась алюминиевая проволока Heraeus AL-HP1 диаметром 380 мкм. Параметры процесса: температура подогрева подложки с пастой 60 °С, мощность

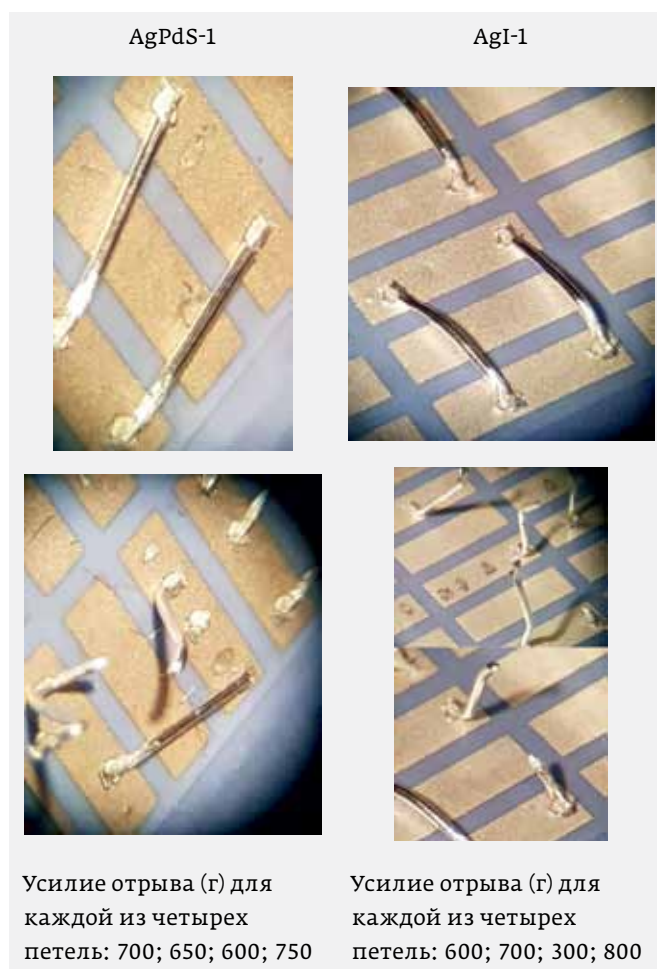


Рис. 6. Результаты тестирования разварки алюминиевой проволокой диаметром 380 мкм на серебросодержащие пасты системы SK-47

ультразвука 90/255 условных единиц, длительность импульса 200 мс. Результаты приведены на рис. 6.

В данном случае результаты можно оценить как неоднозначные. Среди серебросодержащих паст системы SK-47 нет такой, которая прямо предназначалась бы для сварных соединений. Тем не менее паста AgPdS-1 (внешняя металлизация под пайку) показала вполне приемлемые характеристики и в качестве материала под сварку. Этого нельзя сказать о пасте AgI-1 (внутренняя металлизация), однако специалисты компании ООО «АКМ», эксклюзивного представителя КЕКО на территории РФ, считают, что можно подобрать условия обработки и параметры сварочного процесса для получения качественной сварки проволокой большого диаметра и на эту пасту.

Работы по испытаниям материалов системы SK-47 продолжаются, и новые результаты по входящим в нее пастам можно ожидать уже в ближайшее время. При этом компания ведет исследования применимости своих материалов и в других направлениях.

ЖЕРТВЕННЫЙ МАТЕРИАЛ fAST

В состав системы SK-47 входит еще один материал. Его обозначение – fAST – представляет собой аббревиатуру полного названия: fine Aluminum oxide Separator Tape – высокочистая алюмооксидная разделительная лента. Данный материал называется жертвенным потому, что используется для улучшения результатов некоторых операций изготовления изделий из LTCC, но разрушается в ходе процесса и в конечном продукте не присутствует.

Материал представляет собой гранулы микронных размеров, объединенные тем же связующим, которое используется для керамики системы SK-47 (рис. 7). В исходном (не спеченном) состоянии по механическим свойствам материал представляет собой такую же «сырую» керамику, как и LTCC. Однако при температурах, характерных для обжига LTCC, процессы в двух материалах протекают по-разному. В керамике пространство между гранулами Al_2O_3 занимает стекло и происходит спекание, а с ним – уплотнение и усадка. Для спекания же материала fAST этой температуры недостаточно, поэтому в нем только выгорает органика, и материал превращается в порошковую пленку. В данном состоянии пленка не имеет усадки, но имеет адгезию к керамике и фактически не позволяет LTCC-заготовке усаживаться по осям X и Y (по оси Z усадка происходит обычным образом). После спекания порошковая пленка легко разрушается и смывается в ходе пятиминутной отмывки в ультразвуковой ванне.

Стандартные применения fAST: прокладка между LTCC-компонентом и подложкой для обжига (огнеприпасом) для снижения загрязнения последнего продуктами выгорания, а также для защиты металлизации со стороны прилегания компонента к огнеприпасу (рис. 8а); прокладка между LTCC-компонентами для повышения коэффициента загрузки печи спекания (рис. 8б).

Самым интересным вариантом применения fAST является обжиг с так называемой нулевой усадкой (рис. 8в),

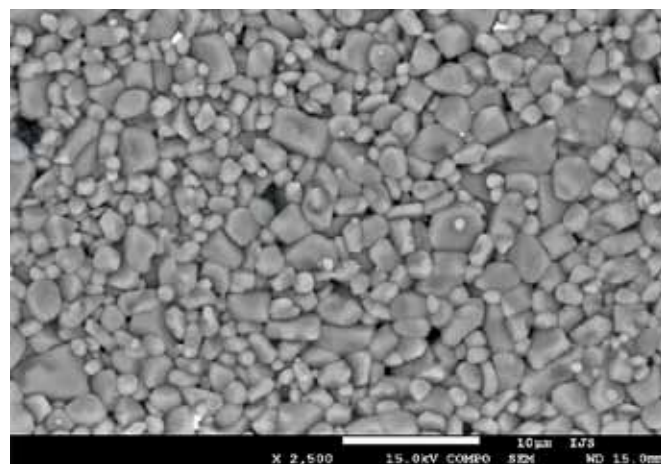


Рис. 7. Микрофотография материала fAST

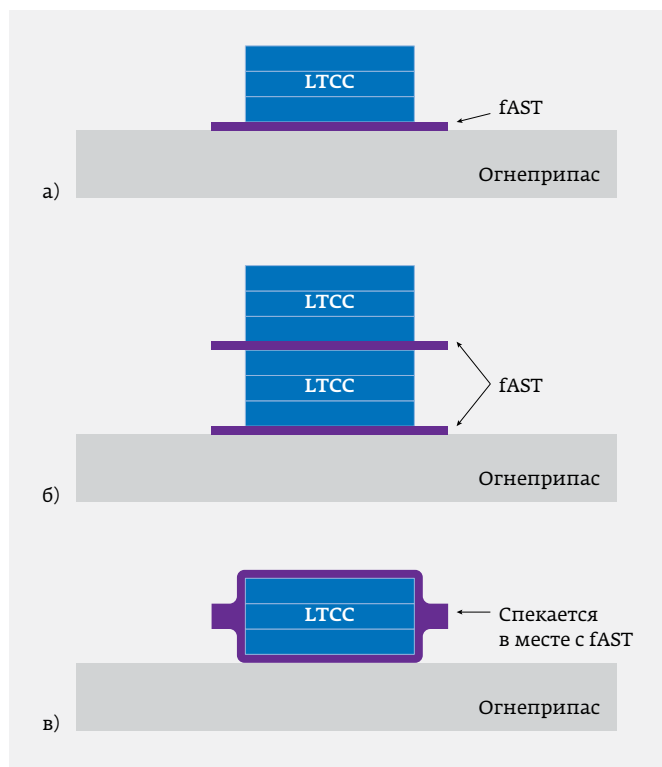


Рис. 8. Варианты применения материала fAST при обжиге LTCC-изделий: а – подкладка под модуль при обжиге; б – прокладки между модулями при их многослойной укладке для оптимизации использования рабочего объема печи; в – метод «нулевой» усадки с применением материала fAST

когда усадка по осям X и Y составляет всего 1–2%. Метод заключается в добавлении к групповой LTCC-заготовке (стек) одного или нескольких слоев материала fAST (в зависимости от толщины заготовки) с верхней и нижней стороны. Далее производится стандартное совместное изостатическое ламинирование, разделение на элементы и спекание. Так как материал fAST фактически представляет собой чистый алюмооксид, то при температурах спекания LTCC он не усаживается сам, и, имея некоторую адгезию к LTCC, не позволяет усаживаться и ей. В итоге заготовка LTCC получает основную усадку по оси Z и «нулевую» по осям X и Y.

Один из наиболее наглядных результатов использования данного метода приведен на рис. 9, где изображены три одинаково сделанных стекла (одинаковое количество слоев, одинаковые режимы сборки, одинаковое поле перфорации для оценки усадки), но к одному стеклу припрессованы сверху и снизу листы fAST толщиной 100 мкм.

Как видно из рис. 9, «сырой» стек и стек после обжига с припрессованным материалом fAST практически не отличаются по осям X и Y, в то время как стек, спеченный без fAST, имеет стандартную усадку порядка 13%.

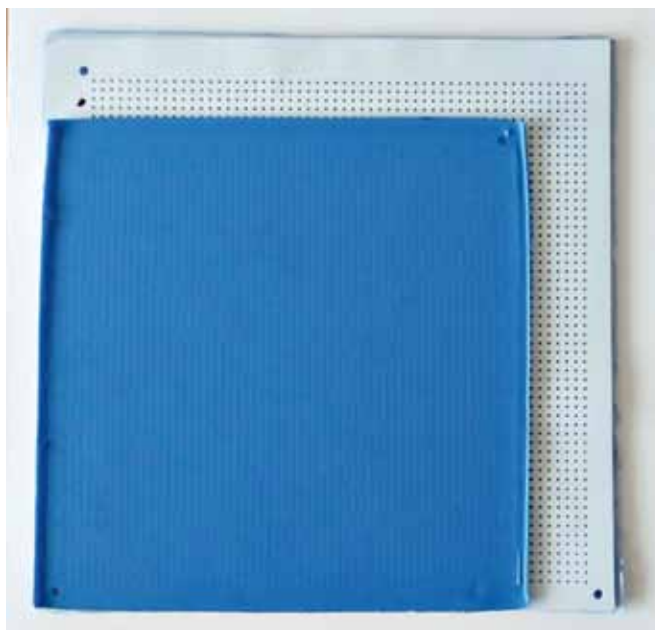


Рис. 9. «Нулевая» усадка LTCC-стека при обжиге с использованием жертвенного материала fAST: сверху (синий) – стек, спеченный обычным образом – без fAST; под ним (белый, перфорированный) – стек после обжига совместно с двумя слоями (сверху и снизу) 100-мкм ленты материала fAST; нижний (синий, его почти не видно из-под белого перфорированного) – стек до спекания без fAST

Стоит отметить, что таким же образом fAST может быть использован с пьезокерамическими материалами, такими как PZT, PMN или PLZT.

При температурах порядка 1600 °C, характерных для обжига высокотемпературной керамики, гранулы порошка спекаются, и fAST может быть использован для создания многослойных HTCC-структур различной толщины (рис. 10).

LTCC + HTCC

В ряде приборов отечественного производства используются стандартные металлокерамические корпуса на основе HTCC, которые массово выпускаются в нашей стране еще с советских времен. С распространением LTCC в такие корпуса стали устанавливать модули, изготовленные из керамики этого

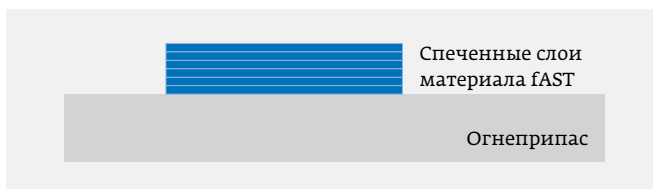


Рис. 10. Создание многослойной HTCC-структуры из карт материала fAST

класса, используя традиционный метод припайки, достаточно сложный и трудоемкий. Сложность метода обусловлена тем, что он требует наличия сплошной металлизации на соединяемых поверхностях, а сама пайка осуществляется в специализированных печах с применением дорогостоящих преформ. Более того, при неправильно проведенном процессе в области пайки могут образовываться пустоты, что снижает теплоотвод, критически важный для теплонагруженных блоков.

Понимание этой проблемы привело к идее совмещения двух классов керамики в одной конструкции – прямого соединения LTCC и HTCC. Дополнительно к упрощению монтажа LTCC-компонентов в HTCC-корпуса от такого совмещения можно ожидать появления принципиально новых вариантов построения керамических микроэлектронных устройств, использующих сочетание различающихся диэлектрических и механических свойств этих материалов.

Эксперимент был проведен по следующей схеме. На спеченную пластину из высокотемпературной керамики было нанесено адгезивное покрытие, на котором закрепили «сырую» (неспеченную) LTCC-керамику. Далее было произведено прессование в изостатическом режиме с последующим спеканием при температуре, свойственной для LTCC. Уже во втором опыте был получен положительный результат.

Таким образом, подтверждена возможность сравнительно простого монтажа функциональных LTCC-компонентов/модулей в стандартные HTCC-корпуса или на HTCC-подложки, исключающего из технологии процесс припайки. Кроме того, эксперимент дал еще один немаловажный результат: выяснилось, что при обжиге на HTCC-основании низкотемпературная керамика дает почти нулевую усадку по осям X и Y – в пределах 1%. Этот эффект может представлять собой самостоятельную ценность, поскольку радикальное уменьшение усадки упрощает процесс попадания в допуски при изготовлении LTCC-модулей (особенно важно для СВЧ-применений), а также исключает или значительно сокращает количество итераций при отработке технологии их изготовления, экономя время и расходы, в частности – на изготовление сетко-трафаретов.

В настоящее время в компании проводится тестирование спекания LTCC-заготовок и металлизированных HTCC-пластин в стандартных печах для обжига HTCC с целью исключения окисления металлизации HTCC.

Отработка совмещения LTCC и HTCC в одной конструкции требует еще большого количества тестов, в ходе которых, возможно, будут выявлены некоторые ограничения по технологическим режимам и границам применимости изделий, изготовленных с использованием этой идеи. При всем этом она может представлять интерес для профессионалов, которые, возможно, захотят попробовать ее в иных применениях, помимо тех, которые стали стимулом для организаторов исследования.

ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМЫ SK-47

Специалисты компании КЕКО продолжают исследования различных аспектов применения системы SK-47, занимаются отработкой оптимальных температурных профилей для конкретных ситуаций, практическая значимость которых известна им как из собственного опыта, так и из информации, получаемой в ходе повседневного общения с потребителями продукции компании. Ведутся также поисковые работы по ряду перспективных направлений.

Одним из таких направлений является разработка технологии проводящих паст на основе меди. Преимущества, которые могут быть получены в случае успеха этой работы, очевидны. Прежде всего это снижение стоимости конечного изделия – при том, что проводимость меди почти так же высока, как проводимость серебра, и почти на 35% превосходит проводимость золота.

Но для российской действительности, может быть, не менее серьезную роль играет еще один фактор. Всем известны затруднения, возникающие у предприятий в связи с формированием отчетности по драгоценным металлам. Медь же может приобретаться без каких-либо разрешительных документов, отчетность по ее использованию не требуется. Это особенно актуально для развития технологии LTCC на базе вузов.

Важно отметить, что цель усилий КЕКО Equipment отличается от того, что предлагают сегодня другие компании, занимающиеся низкотемпературной керамикой. Некоторые из них, например, известная японская фирма Kyocera, уже освоили проводящие пасты на основе меди; но они предлагают их только в составе готовых изделий, производство которых должно быть им заказано. КЕКО же намерена развивать это направление как самостоятельную общедоступную технологию, для которой она будет поставлять оборудование, материалы и техническую документацию. В компании считают, что в таком варианте рыночного предложения технология медной металлизации низкотемпературной керамики может стать весьма востребованным продуктом, особенно со стороны предприятий отечественной микроэлектронной отрасли. Первые результаты уже получены, на очереди – этап подтверждения их качества и стабильности в большом числе испытаний, на больших выборках разнотипных образцов LTCC-изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Imanaka Y.** Multilayered Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) Technology // Springer Science + Business Media, Inc. P. 21. 2005.
2. **Черных В., Чигиринский С.** Возможности LTCC-технологии для уменьшения теплового сопротивления мощных высоконадежных КИМП // Силовая электроника. 2012. № 5. С. 12–16.
3. **Чигиринский С., Мейлицев В.** Методы контроля материалов низкотемпературной керамики. Технологии компании Ferro // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 7. С. 166–172.