

Роман Кондратюк
materials@ostec-group.ru

LTCC система Ferro A6 для сборки и герметизации монолитных СВЧ микросхем

LTCC технология представляет собой высокотехнологичное, недорогое решение для сборки и герметизации монолитных СВЧ микросхем. LTCC материалы, используемые при создании СВЧ устройств должны соответствовать определённым требованиям, таким как низкие потери СВЧ, высокие допуски на линейные размеры, высокая прочность и конкурентоспособная цена. В статье рассмотрена система материалов Ferro A6 для LTCC технологии, показаны основные физические и электрические характеристики, а также проведено сравнение систем LTCC металлизации (золотая, серебряная, смешанная).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается заметный рост в области разработки и производства СВЧ техники в России. Основными тенденциями развития здесь остаются миниатюризация, увеличение эксплуатационной надёжности и увеличения функциональных возможностей СВЧ компонентов [1]. Это выдвигает новые требования к керамическим корпусам и поставщикам материалов для таких корпусов.

Низкотемпературная совместно спекаемая керамика (LTCC - Low Temperature Cofired Ceramics) является недорогим технологичным решением для сборки микросхем в керамических корпусах. LTCC системы обжигаются при температурах 800-900°C. Металлизация в таких системах может быть выполнена с помощью металлов с низким удельным электрическим сопротивлением, таких как серебро, медь и золото [2, 3].

Одновременно с увеличением функциональной сложности СВЧ устройств, растёт и количество пассивных компонентов. Технология совместного спекания нескольких слоёв позволяет встраивать компоненты в подложку, снижая тем самым количество дискретных пассивных компонентов. Встраиваемые пассив-

ные компоненты играют существенную роль в снижении размеров СВЧ устройств нового поколения.

Данная статья представляет собой обзор основных разработок Ferro для изделий СВЧ электроники, основные доступные LTCC материалы и их характеристики, а также направления развития сборки и герметизации электронных микросхем и полупроводниковых приборов для СВЧ техники.

LTCC СИСТЕМА FERRO A6

LTCC система – комплекс технологических материалов, включающий в себя керамические листы, проводящие, резистивные и диэлектрические пасты. Система Ferro A6 подразделяется на две группы: A6-M и A6-S.

A6-M является предпочтительной системой для микроволновых приборов, требующих высочайшего уровня надёжности. A6-M имеет диэлектрическую проницаемость 5,9 и очень низкие диэлектрические потери (<0,002 на 10 ГГц). Система A6-M используется для изготовления устройств, работающих на частотах до 110 ГГц в военной и космической отраслях промышленности.

Система A6-S, обладая аналогичными A6-M диэлектрическими характеристиками, позволя-

ет снизить стоимость за счёт использования серебряной и смешанной металлизации (золото + серебро). A6-S создана для СВЧ приборов, работающих на частотах от 2,45 до 100 ГГц. Типовые физические свойства материалов A6-M и A6-S приведены в таблице 1.

КЕРАМИЧЕСКАЯ ЛЕНТА FERRO A6

Низкотемпературная керамика обычно используется в качестве подложки или материала для создания корпусов микросхем. Для таких задач, как правило, требуется керамика с низкой диэлектрической проницаемостью. Диэлектрическая проницаемость керамики Ferro A6 составляет $5,9 \pm 0,2$.

Основой LTCC ленты Ferro A6 является кальциево-боросиликатное кристаллизующееся стекло. Типовой профиль обжига включает в себя сушку при 450°C и обжиг при температуре 850°C . Кристаллизация наступает после вязкого спекания, в результате чего образуется плотная керамика. Повторный обжиг керамики оказывает слабое влияние на последующую кристаллизацию. Поэтому керамика Ferro A6 может многократно выдерживать процесс термообработки.

Благодаря низкой температуре обжига керамики Ferro A6, появляется возможность использования полного спектра металлизации на основе драгоценных металлов, в т.ч. материалов на основе серебра. Обжиг, как правило, осуществляется на воздухе и не требует специализированной атмосферы. Возможность использования серебра и обжига на воздухе существенно снижает стоимость и улучшает характеристики керамики Ferro A6. Серебро обладает наименьшим удельным электрическим сопротивлением, а использование окислительной атмосферы позволяет применять традиционную оксидную керамику с высокими значениями диэлектрической и магнитной проницаемости в качестве диэлектрика [4,5,6]

Диэлектрические характеристики материалов Ferro A6S были измерены с помощью различных тестовых методов (LCR, анализатора импеданса, анализатора электрических схем, СВЧ резонатор и т.д.) для покрытия полного спектра частот от 1 до 90 ГГц [7]. График зависимости диэлектрических характеристик системы Ferro A6 представлен на рис. 1.

Типовые диэлектрические характеристики показаны в таблице 2. Как видно, из приведённых данных, керамика Ferro A6 сохраняет стабильные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь во всём диапазоне частот от 1 ГГц до 90 ГГц.

LTCC ПРОВОДНИКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ FERRO A6

Проводники, совместимые с керамикой A6, являются важной частью LTCC системы Ferro. Компания Ferro предлагает полный спектр проводящих паст для создания электронных компонентов для СВЧ техники по толстоплёночной технологии. Пасты разделены на три группы: золотая металлизация, серебряная металлизация и смешанная металлизация (золото + серебро), таблица 3. Пасты для металлизации Ferro обладают типовыми свойствами, характерными для толстоплёночных паст, такими как высокое качество, разрешение печати и т.д. В совместно спекаемой системе проводники должны помимо всего прочего быть согласованы по коэффициентам усадки и коэффициентам теплового расширения с диэлектрическими лентами и иметь полную химическую совместимость. Проводящие пасты Ferro созданы с учётом полного соответствия с керамикой A6 и образуют единую, надёжную технологическую систему. На рис. 2 приведён пример металлизации переходных отверстий системы Ferro A6 диаметром 254 мкм, демонстрирующий высокое качество и отсутствие дефектов металлизации.

Низкие потери СВЧ являются важнейшей характеристикой LTCC систем. Потери в диэлектриках и проводниках вносят основной вклад в общие потери СВЧ. Проведённые исследования показали, что потери в проводниках становятся сравнимыми с потерями в диэлектриках на частотах свыше 1 ГГц. Например, потери в проводниках вносят 70% в суммарное значение на частоте 1 ГГц [9]. Основные усилия разработчиков материалов для LTCC систем в области снижения потерь СВЧ направлены на использование металлов с низким удельным электрическим сопротивлением и оптимизацию неорганических добавок.

Типовые результаты измерений потерь СВЧ в проводниках показаны на рис. 3

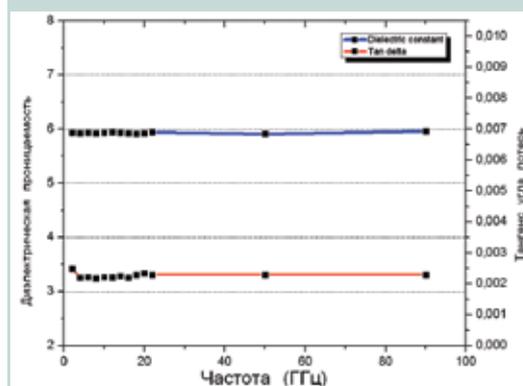


Рис. 1 Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь для материала Ferro A6 на частотах от 1 ГГц до 90 ГГц.



Рис. 2 Ag металлизация переходных отверстий в системе Ferro A6

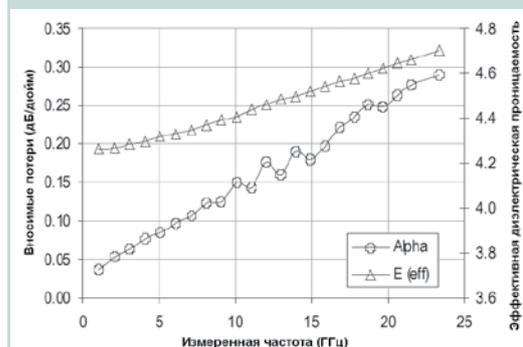


Рис. 3 Типовые электрические характеристики серебра. Измерения проведены для системы Ferro A6 с серебряной металлизацией

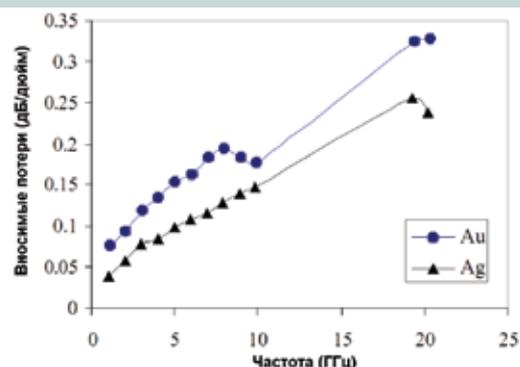


Рис. 4 Вносимые потери для золота и серебра

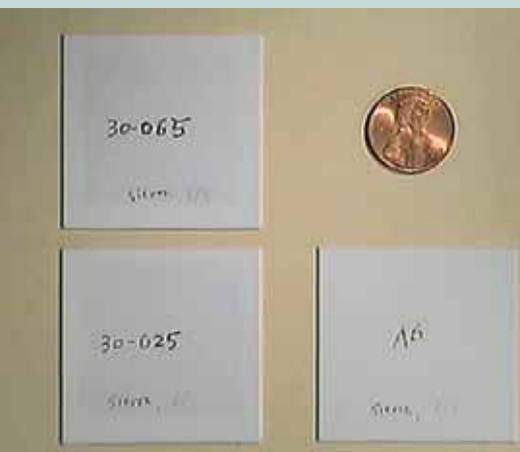


Рис. 5 Тестовые образцы для измерения коэффициентов усадки

Измерения проведены с помощью техники кольцевого (микрорезонансного) резонатора для керамики Ferro А6 с серебрянной металлизацией Ferro CN33-229 [9]. Данная методика может быть использована для частот до 20-25 ГГц. Усовершенствование метода до 40 ГГц продолжается.

Потери СВЧ в проводниках в основном ограничены удельным электрическим сопротивлением металла, однако другие факторы, такие как неорганические добавки, геометрия и шероховатость поверхности, также оказывают существенное влияние. График зависимости потерь СВЧ от частоты на рис. 4 показывает, что золотые проводники имеют большие потери, чем серебрянные. Это обусловлено относительно высоким удельным электрическим сопротивлением золота по сравнению с серебром (2,3 мОм·см для золота и 1,6 мОм·см для серебра). Очевидно, что для снижения стоимости и уменьшения потерь СВЧ металлизация на основе серебра является предпочтительной. Однако когда возникает необходимость проволоочной микросварки, и высокая надёжность является определяющим фактором, используется золотая металлизация. Системы смешанной металлизации совмещают в себе преимущества золотых и серебрянных проводников. В системах смешанной металлизации золото используется для формирования поверхности, а серебро – для внутренних проводников. Специальные материалы используются для формирования перехода между золотой и серебрянной металлизацией. Таким образом, смешанная металлизация обеспечивает высокую производительность и позволяет снизить стоимость.

Для увеличения прочности микросварного соединения компания Ferro разработала проводящую пасту 30-065 на основе золота. Новый механизм адгезии золотого слоя увеличивает прочность соединения примерно в два раза (таблица 4) без ухудшения соответствия коэффициентов усадки (рис. 5). Благодаря улучшенным неорганическим наполнителям в пасте 30-065, потери в проводниках также снизились.

LTCC РЕЗИСТОРЫ FERRO

Удельное сопротивление существующих толстоплёночных резисторов для

LTCC систем Ferro составляет от 10 до 10000 Ом/кв. Допуск на номинал резисторов составляет ±10% с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) ±200х10⁻⁶ 1/°С. Наиболее сложной задачей в разработке резистивных паст является химическая совместимость этих материалов с материалами А6.

Усилия компаний производителей резистивных паст направлены на создание резисторов с высоким электрическим сопротивлением, более низким значением ТКС и более жёсткими допусками на номинальное значение сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

LTCC системы Ferro предлагают технологичные и экономичные решения для создания корпусов электронных СВЧ микросхем и полупроводниковых приборов. LTCC системы Ferro А6 включают в себя набор керамики и проводящих, диэлектрических и резистивных паст, созданных с учётом полной химической совместимости, а также соответствия физических характеристик. Низкие потери СВЧ и стабильность коэффициента диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот являются характерной особенностью Ferro А6. Это позволяет рассматривать данную LTCC систему как основу для создания устройств, работающих на частотах до 110 ГГц и требующих высочайшего уровня надёжности.

ССЫЛКИ

- [1] Ребров С.И., Приоритетные направления развития электронной СВЧ-техники, Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-Техника, вып. 1(500), 2009
- [2] Чигиринский С.А., Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC), Степень Интеграции, информационный бюллетень
- [3] Кондратьев Р.И., Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (LTCC). Преимущества. Технология. материалы., Степень Интеграции, информационный бюллетень №5, апрель 2011
- [4] S. Turvey, LTCC Materials at the Leading Edge, Electronic Packaging & Production, Supplement, November 1994, p. 6.
- [5] J. Alexander, S.H. Muralidhar, G.J.Roberts, T.J. Vlach, A low Temperature Co-firing Tape System Based on a Crystallization Glass, ISHM 91 Proceedings.
- [6] S.H. Muralidhar, A.S. Shaikh, G.J.Roberts, D.L. Hankey, D.J. Leandri, T.J. Vlach, Low Dielectric Low Temperature Fired Glass Ceramics, US patent, 5,164,342, 1992.
- [7] Ferro А6S, Technical Data Sheet, Ferro Electronic Materials, Rev. 01/11
- [8] M. Xu, Microstrip Losses at Microwave Frequencies, thesis, 1994, Center for Dielectric Studies, Pennsylvania State University.
- [9] S. Vasudevan and A. Shaikh, Wide Band Electrical Characterization of low Temperature Cofired Ceramic Tape, ISHM 95 Proceedings.

Таблица 1 Физические характеристики керамики А6

	А6-М	А6-С
Толщина, мм	125; 254	125; 254
Усадка (x,y, %)	15,4	15,7
Усадка (z, %)	24	26
Модуль изгиба, МПа	>160	170
Герметичность	Да	Да

Таблица 2 Диэлектрические характеристики керамики А6

	А6-М	А6-С
Диэлектрическая проницаемость (1-100 МГц)	5,9 ± 0,2	5,9 ± 0,2
Диэлектрические потери (1-100 МГц)	<0,2%	<0,2%
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	> 10 ¹²	> 10 ¹²
Напряжение пробоя, В/125мм	5000	-
Коэффициент затухания (10ГГц), дБ/дюйм	-	0,18

Таблица 3 Системы металлизации для системы А6

	Совместный обжиг								Постобжиг			
	Поверхность	Внутр. слои	Перех. отверстия	Под пайку	Под микро-сварку (Au)	Переходная с Ag на Au	Резистивная	Диэлектрик	Поверхность	Высокотемпературная пайка	Под микро-сварку (Al)	Под пайку
Золотая металлизация (А6М)	30-025	30-025	30-078	36-020	30-080 30-065	-	87 серия	DL10-088	31-014 31-017	33-065 + 30-079	30-068	-
Смешанная металлизация (А6М, А6С)	33-391	33-398	33-407	36-020 33-391	30-025 30-080	39-005	87 серия	DL10-088	3309	33-065 + 30-079 или 30-025 + 4007	30-068	3309
Серебрянная металлизация (А6С)	-	33-398	33-407	-	33-391	-	87 серия	DL10-088	3309	33-065 + 30-079		3350

Таблица 4 Характеристики проводящих слоёв Ferro для микросварки

	30-065	30-025
Прочность соединения, грамм	> 35	>20
Удельное сопротивление, мОм/нв	< 2	< 3