

УДК 67.02

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЛТСС-КЕРАМИКИ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА© 2019 г. Д. А. Вайман¹, *, В. С. Данилов¹¹Новосибирский государственный технический университет,
Российская Федерация, 630073 Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

*E-mail: dima-insk@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2018 г.

После доработки 03.02.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2019 г.

Представлены результаты теоретических исследований и экспериментальных работ по разработке технологии изготовления ЛТСС-керамики для создания приборов СВЧ-диапазона, а также результаты расчета и приготовления двух керамических шликеров с разными типами стекол для изготовления “сырых” керамических ЛТСС-листов. Подтверждено экспериментально, что разработанный состав технологической связки по свойствам идентичен керамике “Ferro А6М”. Показано, что такие стеклообразующие компоненты, как ВаО, РbО, позволяют добиться увеличения диэлектрической проницаемости и снижения тангенса угла диэлектрических потерь всего материала в целом. Проведено сравнение основных характеристик полученного материала и ЛТСС-керамики “Ferro А6М”.

DOI: 10.1134/S0033849419070143

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задач по миниатюризации устройств радиоэлектронной аппаратуры используют ЛТСС-керамику (Low temperature sintered ceramic – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика). Высокий интерес разработчиков и производителей СВЧ-приборов к данному материалу вызван многими его преимуществами по сравнению с традиционными решениями.

Существующий способ – нанесение проводников на полированные керамические подложки и установка навесных компонентов – уже не в состоянии обеспечить современные требования миниатюризации и интеграции устройств. К тому же во многих случаях приходится применять дополнительные соединения и перемычки, что негативно сказывается, не только на свойствах СВЧ-устройств, но и на технологичности их изготовления. Другой традиционный способ – технология НТСС-керамики (High temperature sintered ceramic – высокотемпературная совместно обжигаемая керамика), позволяющий создавать многослойные структуры с проводящими слоями и переходными металлизационными отверстиями. Но из-за высокой температуры спекания (1500...1850°С) данная технология ограничена в выборе материала проводящих слоев. Как правило, в качестве основного компонента проводников используют молибден и вольфрам с высоким удельным сопротивлением, что неблаго-

приятно влияет на характеристики готовых СВЧ-устройств. Также высокие требования к среде обжига и большая, более 18...22%, геометрическая усадка накладывают серьезные технологические ограничения.

ЛТСС-керамика обладает следующими преимуществами [1–5]. Низкая температура спекания (750...1000°С) позволяет использовать для создания проводников низкоомные металлизационные пасты на основе серебра, золота и т.д. (по сравнению с НТСС-технологией).

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

2. Геометрическая усадка керамики, в большинстве систем материалов ЛТСС представлен на рынке, в процессе спекания не превышает 10–15%, что позволяет значительно увеличить точность изготовления устройств.

3. 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 керамической платы.

4. Низкие диэлектрические потери, стабильные в широком диапазоне частот. Для разных типов систем диэлектрическая проницаемость (ϵ)



Рис. 1. Технология изготовления интегральных структур на основе ЛТСС-керамики.

ЛТСС-керамики варьируется от 6 до 12, а тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) от 0.006 до 0.0001 в СВЧ-диапазоне.

5. В отличие от НТСС-керамики не требуется создания специальных сред для обжига при использовании металлизационных паст на основе серебра, золота, а технологический цикл короче и менее энергоемкий, что делает технологию ЛТСС-керамики более экономически выгодной.

Производство изделий из данного материала осуществляется по технологии литья тонких керамических пленок (в среднем от 50 до 200 мкм [6]). В целом, изготовление изделий из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики можно разделить на две составляющие (рис. 1): первая (п. 1–4) – создание керамических “сырых листов” и вторая часть (п. 5–12) – формирование из них трехмерных интегральных систем [6–9].

Вторая часть данной технологии успешно внедрена на многих предприятиях России. Однако производство отечественных “сырых” керамических листов практически отсутствует, поэтому для разработки и производства многих приборов используют сырье американских фирм “DuPont” и “Ferro” [5, 10].

Цель данной работы – проанализировать физические и электрические характеристики основных компонентов стекол, выпускаемых отечественной промышленностью и разработать собственный состав ЛТСС-керамики для создания приборов СВЧ-диапазона.

2. ПОДБОР СТЕКЛА

Качество керамической пленки: пластичность, прочность, однородность, способность ламинироваться, совместимость для трафаретной печати и т.д., определяется тщательно подобранными компонентами и технологическими режимами приготовления шликера и литья керамической пленки. Чтобы придать “сухим” компонентам свойства жидкости, добавляют технологическую связку. В данном случае под “сухими” компонентами понимается порошки керамического глинозема, стекла и прочих порошковых дополнительных добавок. Ключевым компонентом, способствующим снижению температуры спекания и оказывающий большое влияние на диэлектрические характеристики является стекло [2, 6, 7, 11].

Материалы для введения стеклообразующих оксидов по химическому признаку подразделяют на три группы:

- 1) материалы для введения кислотных оксидов (SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , P_2O_5 и др.);
- 2) материалы для введения оксидов щелочно-земельных металлов (CaO , MgO , BaO , SrO и др.);
- 3) материалы для введения щелочных оксидов (Na_2O , K_2O , Li_2O) [12].

Авторы работы [13] провели анализ стеклокомпонентов, используемых для создания ЛТСС-керамики компаний “DuPont” и “Ferro”. На образцах необожженных пленок керамики проведено исследование микроструктуры. Результаты рентгенофазового и элементного ана-

Таблица 1. Влияние различных компонентов стекла на физические и диэлектрические характеристики

Свойства и характеристики	Оксиды силикатных стекол										
	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	BaO	PbO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	P ₂ O ₃	TiO ₂
$T_{пл}$	+	-	-	-	±	-	-	+	-	+	-
η	+	-	-	-	±	-	-	+	-	±	-
Механические свойства	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+
Химическая стойкость	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+
ТКЛР	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-
ϵ	-	+	+	+	±	+	+	+	-	-	-
$tg\delta$	-	-	+	±	-	-	-	-	-	-	+

Примечание: показатель свойства: (+) – увеличивается, (-) – уменьшается, (±) – зависит от концентрации; $T_{пл}$ – температура плавления; ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения; ϵ – диэлектрическая проницаемость; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; η – вязкость.

лиза показали, что исходные материалы представляют собой порошки оксида алюминия и стекол различных составов: стеклокompоненты пленки “DuPont 951” представлены оксидами группы PbO–CaO–SiO₂–Al₂O₃–Na₂O–K₂O, а пленки фирмы “Ferro L8” – бесвинцовым стеклом BaO–TiO₂–SiO₂–Al₂O₃–CaO. Также было выявлено, что в процессе обжига для образца “DuPont 951” происходят процессы спекания и кристаллизации анортита CaO–Al₂O₃–2SiO₂, а для “Ferro L8” – процессы спекания и одновременной кристаллизации целезиана Ba–Al₂O₃–2SiO₂ и волластонита CaO–SiO₂. Отметим, что присутствие в составе данных стекол большого содержания тяжелых оксидов BaO, PbO позволяет существенно увеличить показатель диэлектрической проницаемости и снизить тангенс угла диэлектрических потерь [14–16]. Снижению тангенса угла диэлектрических потерь также способствует содержание оксида алюминия Al₂O₃. Присутствие оксидов щелочных металлов с наличием ионов Na или K увеличивает удельное электрическое сопротивление. К увеличению диэлектрических потерь приводят такие компоненты как Fe₂O₃, Cr₂O₃, V₂O₅ и NiO. Влияние различных компонентов стекла на физические и диэлектрические характеристики представлено в табл. 1 [12, 14–19].

В данной работе рассмотрены марки стекол электровакуумной группы, так как они используются при производстве многих электронных приборов. Для изготовления данных стекол используют химически чистые материалы и компоненты, они обладают хорошей химической стойкостью и высокими показателями диэлектрических характеристик. В табл. 2 представлены основные выпускаемые российскими производителями марки стекол и их состав в соответствии с ОСТ 11 027.010-75 [20].

Стекла марок С87-1, С93-1 и С94-1 по химическому составу являются схожими со стеклами, ис-

пользуемыми в ЛТСС-керамики фирм “Ferro L8” и “DuPont 951”. Они содержат тяжелые оксиды BaO, PbO, которые способствуют увеличению показателя диэлектрической проницаемости и снижению тангенса угла диэлектрических потерь. Однако данные стекла обладают большим показателем температурного коэффициента линейного расширения, что может негативно сказаться на характеристиках конечного продукта. Наиболее сбалансированным по химическому составу и физическим свойствам является стекло марки С48-3. В отличие от предыдущих марок оно содержит меньше тяжелых оксидов, но наличие Al₂O₃ также способствует увеличению диэлектрических характеристик. К тому же стекло С48-3 имеет низкий показатель ТКЛР: $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, сопоставимый с ТКЛР многих распространенных полупроводников.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента были приготовлены образцы двух составов ЛТСС-керамики с использованием марок стекол С95-2 (рецепт 1) и С48-3 (рецепт 2). Выбор стекла марки С95-2 обусловлен его широким применением в радиоэлектронной промышленности и доступностью в приобретении. Недостатками данного стекла является высокий показатель ТКЛР и большое содержание оксида натрия, который негативно сказывается на показателе тангенса угла диэлектрических потерь, но в то же время позволяет снизить температуру плавления. Стекло марки С48-3 имеет низкий показатель температурного коэффициента линейного расширения, сопоставимый с многими полупроводниками. Также наличие в их составе оксидов Al₂O₃ и BaO способствует улучшению механических и диэлектрических свойств. Для того чтобы данные стекла можно было использовать для приготовления шликера, их измельчали на планетарной мельнице АПФ-3 при частоте

Таблица 2. Марки стекол и их состав в соответствии с ОСТ 11 027.010-75

Марка стекла	ТКЛР, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Химический состав стекол, %									
		SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	BaO	PbO	Na ₂ O	K ₂ O	другие окислы, %
C48-1	4.8	66.5	23.0	3.0	—	—	—	—	3.7	3.8	—
C48-2	4.8	66.3	20.9	3.5	—	—	—	—	3.0	5.0	0.2 (Li ₂ O)
C48-3	4.8	54.0	—	18.5	—	—	—	—	—	—	13.5 (CaO); 6.0 (InO); 9.0 (BaO)
C49-1	4.9	67.5	20.3	3.5	—	—	—	—	8.7	—	—
C52-1	5.2	68.7	19.0	3.5	—	—	—	—	4.4	4.4	—
C78-5	7.8	2.2	57.8	8.8	0.5	3.5	19.0	—	—	8.2	—
C82-1	8.2	71.0	—	3.0	—	13.0	—	—	11.7	1.3	—
C87-1	8.7	55.0	—	2.0	—	—	—	30.0	3.8	9.2	—
C89-1	8.9	71.0	—	0.9	8.5	5.5	2.0	—	16.1	1.0	—
C90-1	9.0	69.0	—	0.7	3.5	5.5	—	—	12.8	4.0	—
C93-1	9.3	55.0	—	2.0	—	—	—	30.0	3.8	9.2	—
C93-2	9.3	67.5	—	5.0	—	—	12.0	—	7.0	7.0	0.9 (F ₂); 0.4 (Li ₂ O)
C94-1	9.4	59.8	—	3.6	2.5	5.5	2.3	10.5	5.5	9.0	0.8 (F ₂); 0.5 (Li ₂ O)
C95-2	9.5	68.5	2.8	4.0	—	7.0	—	—	10.0	7.7	—

Таблица 3. Количественный состав экспериментальных рецептов 1 и 2

Компоненты	Наименование	Вес, г
Мелющие тела цилиндрической формы (Ø8 мм)	Al ₂ O ₃ 93%	765.0
Глинозем	Almatis CT 1200 SG	284.0
Стекло	C95-2/C48-3	394.0
Прочие добавки	—	32.0
Система растворителей	Толуол 99.5%	102.0
	Этанол 99.8%	215.0
Связующее	Поливинилбутираль	66.7
Пластификатор	Бутилбензилфталат	50.1
Диспергатор	Рыбий жир Menhaden Fishoil Defloc Z3	7.4

вращения барабана 40 об/мин в течение 30 мин. Для более высокой эффективности измельчения специальная емкость была заполнена на 1/3 ацетоном ЧДА ГОСТ 2603-79. В качестве мелющих тел были использованы циркониевые шары диаметром 10 мм. Затем полученный порошок стекла сушили при температуре 90°C в течение 24 ч. Средний размер частиц стекла по результатам замеров методом седиментации и центрифугирования с рентгеновским детектором ВІ-ХДС составил 1.1 мкм, соотношение размера частиц 1 : 5, что является оптимальным показателем для “сухих” компонентов в технологии литья тонких керами-

ческих пленок. В качестве керамического порошка был использован Almatis CT1200 SG, измеренный средний размер частиц 0.9 мкм, соотношение размера частиц 1 : 3. Наиболее подробно подбор компонентов, расчет технологической связки и режимы приготовления шликера представлены в работе [21]. Количественный состав экспериментальных рецептов 1 и 2 приготовления шликеров ЛТСС-керамики одинаков и отличаются только типом используемых стекол — С95-2 и С48-3 соответственно (табл. 3).

Для приготовления шликеров использовали валковую мельницу “КЕКО ВЛ-3”. Литье кера-

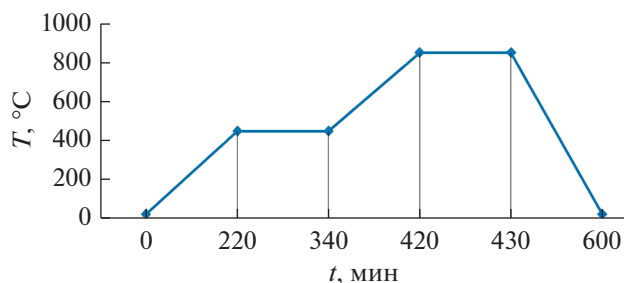


Рис. 2. График спекания.

мической пленки производили на установке “КЕКО САМ-М3520Н”. Резка на листы 8×8 произведена на установке “КЕКО SC-25MNC”. Для проверки качества совместного спекания ЛТСС керамики на листы наносили серебросодержащую пасту “Ferro CN33-498”, которая предназначена для ЛТСС-керамики “Ferro А6М”. Рисунок наносили вручную с помощью сетки-трафарета. После каждого этапа нанесения металлизации листы керамики сушили обдувом воздуха при температуре 90°C на установке “КЕКО SD-3”, затем формировали стеки, т.е. производили операцию совмещения листов керамики между собой. Для того чтобы точно совместить все слои между собой, на каждом листе еще на этапе формирования отверстий были сформированы специальные реперные метки. Далее произвели ламинирование стека. На данном этапе важно было сохранить топологию стека неизменной, потому что велик риск искажения отверстий и полостей во время изостатического прессования. Чтобы избежать этого, на стек сверху положили специальную силиконовую прокладку. Прессование осуществляли в изостатическом прессе “КЕКО ILS-66” при

следующих условиях: температура жидкости 60°C , время нагрева стека 5 мин, прессование осуществлялось в течение 15 минут при давлении в 20 МПа. Затем стек разрезали на заготовки с помощью установки резки “сырой” керамики “КЕКО СМ-15” (подробнее см. в работе [11]).

Спекание ЛТСС-керамики произведено без пригрузки в печи “Nabertherm NT276” за один этап в две стадии по режиму, рекомендованному фирмой “Ferro” для ЛТСС-керамики марки “А6М” (рис. 2).

Первая стадия – нагрев до 450°C и выдержка в течение двух часов, что необходимо для эффективного процесса удаления всех органических компонентов, которые придавали “сырым” листам керамики форму и эластичность. На второй стадии происходит собственно спекание керамики: нагрев до 850°C с выдержкой 10 мин.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные “сырые” листы ЛТСС-керамики (рис. 3а) обладают механическими свойствами, аналогичными керамическому материалу “Ferro А6М” (рис. 3б). Процесс формирования стека и ламинирование производится без видимых деформаций отверстий и полостей деталей.

Для того чтобы сравнить свойства полученных керамических материалов с ЛТСС керамикой “Ferro А6М”, произведен термографический анализ с использованием прибора синхронного термического анализа “NETZSCH STA 449 F3 Jupiter” и получены диаграммы “сырых” листов керамики (рис. 4, 5). На графиках представлены кривые изменения массы от температуры (термогравиметрия (ТГ)) и выделение энергии от температуры (дифференциальная сканирующая калоримет-

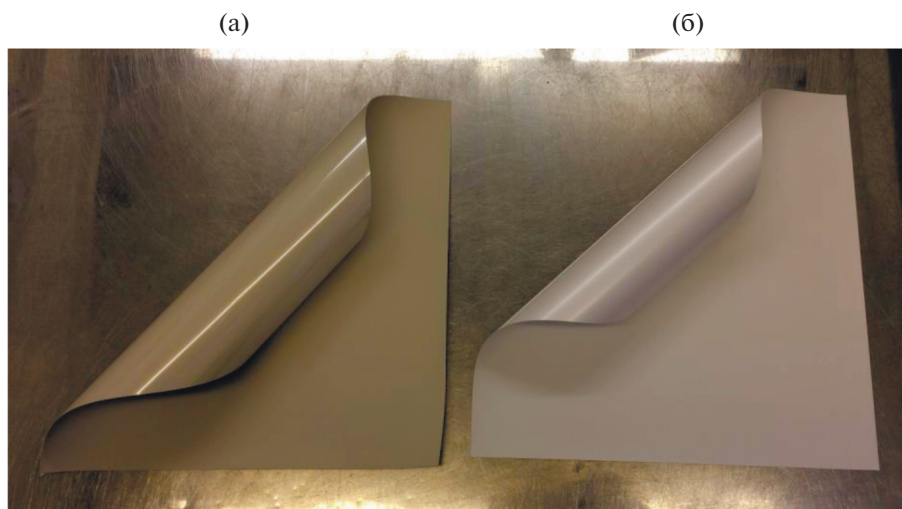


Рис. 3. “Сырые” листы ЛТСС-керамики, полученные в данной работе по рецепту 1 (а), и листы марки “Ferro А6М” (б).

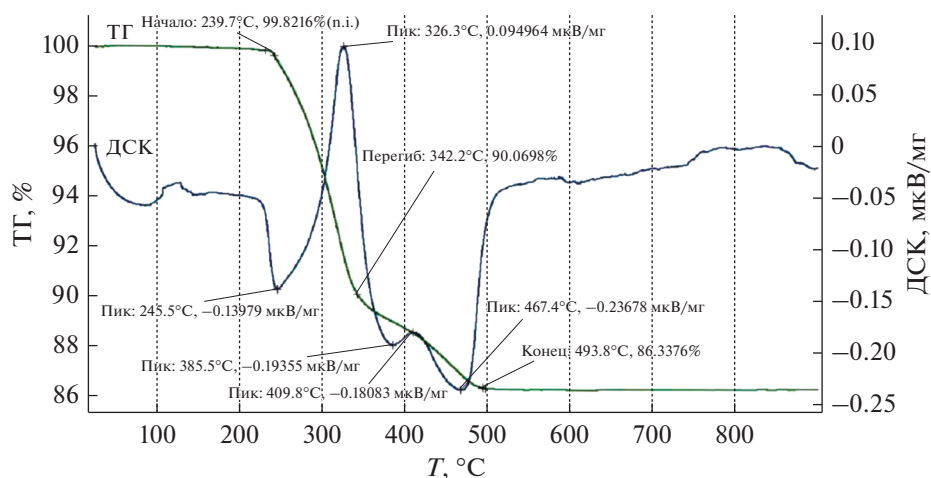


Рис. 4. Дифференциальный термический анализ ЛТСС-керамики “Ferro А6М”.

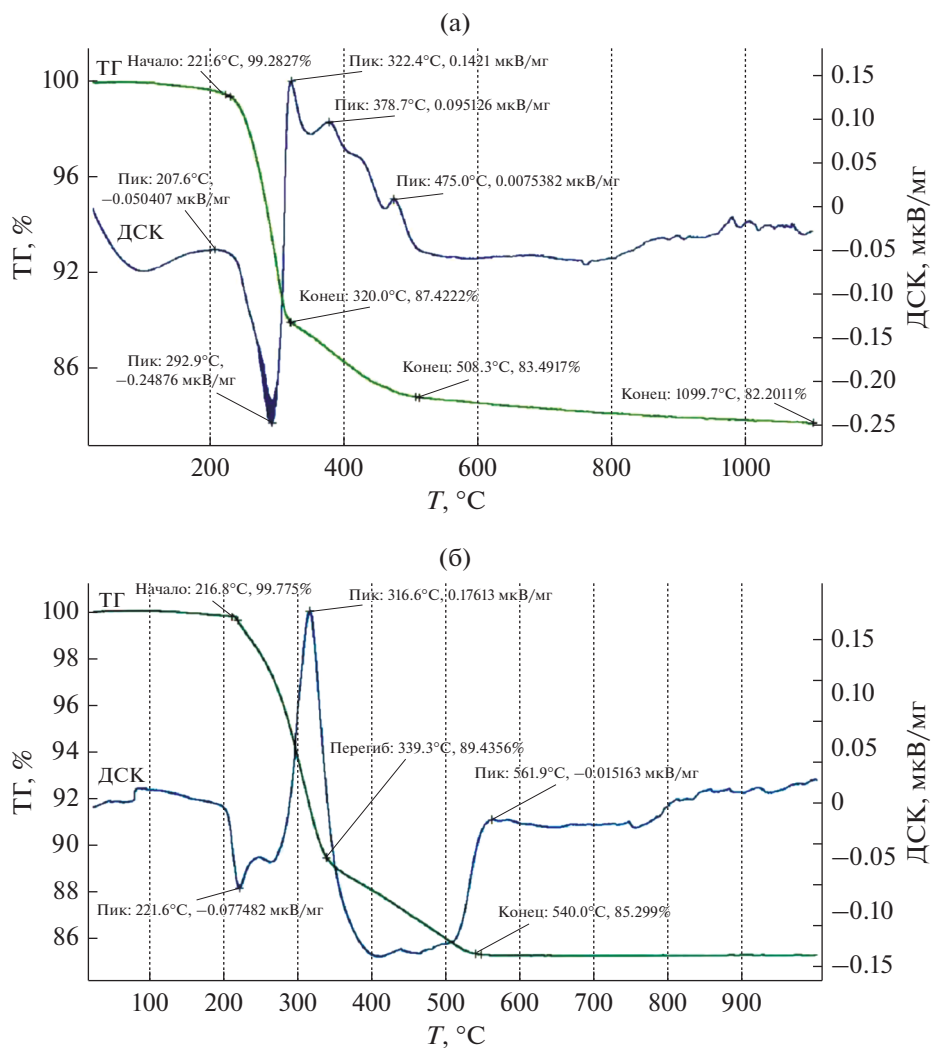


Рис. 5. Дифференциальный термический анализ образцов ЛТСС-керамики, полученных по рецепту 1 (а) и по рецепту 2 (б).

Таблица 4. Результаты измерений физических и диэлектрических характеристик разработанных материалов в сравнении с ЛТСС-керамикой “Ferro А6М”

Характеристики	“Ferro А6М”	Рецепт 1	Рецепт 2
Кажущаяся плотность, г/см ³	2.47	2.31	2.37
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	183	150	167
КТЛР, 10 ⁻⁶ /°С	6.8	8.1	6.1
λ, Вт/м К	2.20	1.79	1.86
ε	6.1	5.7	6.7
tgδ (при 1 МГц)	2.2 × 10 ⁻⁴	64 × 10 ⁻⁴	8.2 × 10 ⁻⁴
ρ, Ом см	8.1 × 10 ¹²	5.1 × 10 ¹²	7.2 × 10 ¹²
Усадка в плоскости ХУ, %	14.4	8.5	12.5

Примечание: λ – теплопроводность; ρ – удельное электрическое сопротивление.

рия (ДСК)). Результаты анализа керамики “Ferro А6М” представлены на рис. 4, а образцов, полученных по рецепту 1 и рецепту 2, – на рис. 5а и 5б соответственно.

Как видно из рисунков, графики изменения массы от температуры нагрева на образце “Ferro А6М” и образце, полученному по рецепту 2, идентичны и практически не отличаются, за исключением участка температур 340...500°С. Это является основанием полагать, что состав органических компонентов у всех образцов ЛТСС-керамики идентичен и небольшие различия связаны с разным составом стекла. Наличие в образце рецепта 1 большого содержания оксида натрия в составе стекла С95-2 способствует снижению температуры плавления, что и является причиной отличий на графиках. Внешний вид деталей образцов рецептов 1 и 2 до и после спекания представлен на рис. 6.

Как видим, на образцах рецепта 2 отсутствуют расслоения и деформации при совместном спекании деталей, состоящих из пяти слоев керамики, на каждый из которых был нанесен слой металлизации с идентичной конфигурацией. Применение стекла с более низким показателем ТКЛР в составе ЛТСС-керамики позволило добиться лучшей совместимости с металлизационной пастой “Ferro CN33-498”. Сравнительные результаты измерений физических и диэлектрических характеристик представлены в табл. 4.

Большой коэффициент температурного линейного расширения образцов “Рецепт 1” связан с применением стекла С95-2, у которого данный показатель равен $9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Предел прочности при статическом изгибе, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление полученных образцов отличаются от показателей ЛТСС-керамики “Ferro А6М” в среднем не более чем на 16%. Существенно отличаются значения геометрической

усадки образцов. Образцы рецептов 1 и 2 имеют значительно меньшую геометрическую усадку по сравнению с зарубежной керамикой, что связано с особенностями процесса приготовления шликера и обжига.

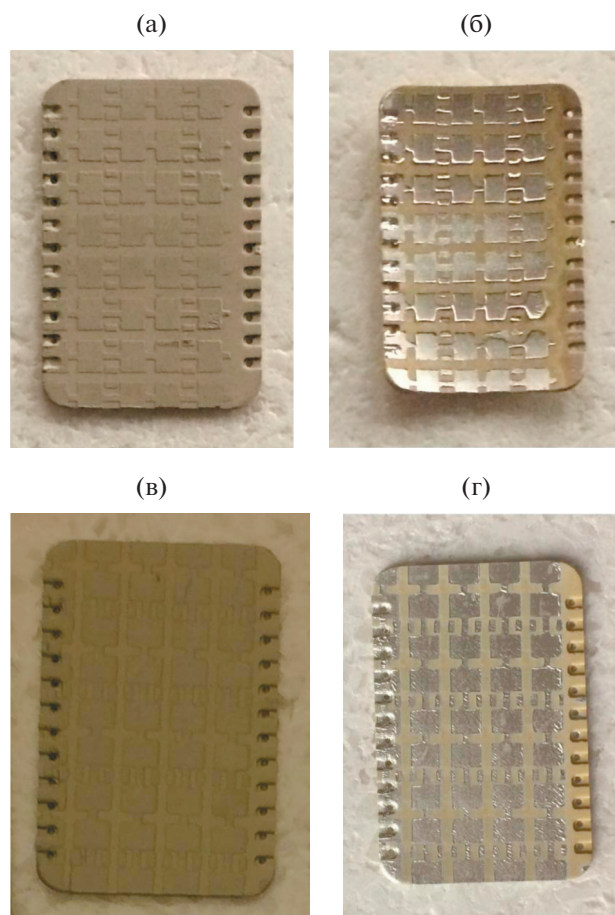


Рис. 6. Образцы деталей из ЛТСС-керамики по рецепту 1 (а, б) и 2 (в, г) до спекания (а, в) и после спекания (б, г).

* * *

Таким образом, найдено, что улучшение показателей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь оказывают влияние элементы ВаО, РbО. Данные оксиды, также содержатся в LTCC-керамик “Ferro L8” и “DuPont 951” [13]. В ходе экспериментов, проведенных в рамках данной работы определено, что наиболее оптимальным по составу и свойствам является марка стекла С48-3. Оно обладает низким показателем ТКЛР: $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и содержит в своем составе 9% ВаО и 18.5% Al_2O_3 , которые способствуют улучшению диэлектрических характеристик LTCC-керамики. Образцы с применением данного стекла обладают характеристиками, сопоставимыми и даже по некоторым параметрам превосходящие американскую LTCC-керамику “Ferro А6М”.

Применение в составе LTCC-керамики стекла марки С95-2 позволило экспериментально убедиться, что большой показатель ТКЛР негативно сказывается на качестве конечного продукта и способствует деформациям и расслоениям во время обжига. Большое содержание в составе стекла Na_2O способствует увеличению тангенса угла диэлектрических потерь на образцах LTCC-керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимов А. // Электроника НТБ. 2011. № 3. С. 56.
2. Кондратюк Р. // Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26.
3. Чигиринский С. // Технологии. 2009. № 11. С. 130.
4. Симин А.В., Холодняк Д.В., Вендик И.Б. // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С. 190.
5. Черных В., Чигиринский С. // Технологии. 2012. № 4. С. 176.
6. Mistler R.E., Twiname R.E. // Tape casting theory and practice. Westerville: American ceramic society, 2000.
7. Zhou J. // J. Advanced Ceramics. 2012. № 1. P. 89.
8. Imanaka Y. Multilayered Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) Technology. Kawasaki: Fujitsu Laboratories, Ltd, 2005.
9. King A.G. Ceramic technology and processing. N.-Y.: William Andrew Publ., 2002.
10. Непочатов Ю., Кумачева С., Швецова Ю., Дитц А. // Совр. электроника. 2014. № 4. С. 12.
11. Вайман Д.А., Красный И.Б., Данилов В.С., Кумачева С.А. // Доклады АН ВШ РФ. 2017. № 1. С. 31. doi 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45
12. Жигальский А.А. Технология материалов электронной техники: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2006.
13. Пашков Д.А., Тютюнькова Д.О., Погребенков В.М. // XII Междунар. конф. студентов и молодых ученых: “Перспективы развития фундаментальных наук”. Томск, 2015. С. 484.
14. Федотов А.К., Анищик В.М., Тиванов М.С. Физическое материаловедение: учебное пособие. Ч. 3. Материалы энергетики и энергосбережения. Минск: Высшая школа, 2015.
15. Справочник химика. Т. 5. Сырье и продукты промышленности неорганических веществ, процессы и аппараты, коррозия, гальванотехника, химические источники тока / Под ред. Никольского Б.П. М.: Химия, 1968.
16. Машиностроение: энциклопедический справочник. Т. 4. Материалы машиностроения / Под ред. Чудакова Е.А., Одингга И.А. М.: Машгиз, 1947.
17. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Чаплыгина Ю.А. М.: Техносфера, 2013. Вып. 2.
18. Евстропьев К.С., Торопов Н.А. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: Промстройиздат, 1950.
19. Куколев Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: Высш. школа, 1966.
20. Стекло электровакуумное. Марки: ОСТ 11 027.010-75. Взамен НПО.027.600, 1975.
21. Вайман Д.А., Данилов В.С. // Доклады АН ВШ РФ. 2018. № 1. С. 69.