

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А.В. Кузовников  
подпись                      инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка технологии изготовления модулей на основе отжига  
низкотемпературной керамики»  
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологической обеспечение  
машиностроительных производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ канд. физ.-мат. наук	<u>А.А. Хвалько</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>В.В. Даныкин</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	Ведущий инженер- конструктор отд. 640 АО «РЕШЕТНЁВ»	<u>И.С. Васильев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор, МБК ПФиКТ д-р техн. наук, доцент	<u>В.Е. Чеботарев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2024

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А.В. Кузовников  
подпись                      инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме магистерской диссертации**

Красноярск 2024

Студент Данькин Виктор Владимирович

Группа МТ22-04М

Направление (специальность) 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Тема выпускной квалификационной работы «Разработка технологии изготовления модулей на основе отжига низкотемпературной керамики»

Утверждена приказом по университету № 8094/с от 14.05.2024

Руководитель ВКР: А. А. Хвалько, доцент МБК ПФИКТ, канд. физ.-мат. наук, АО «РЕШЕТНЁВ»

Исходные данные для ВКР: Схема электрическая принципиальная

Перечень разделов ВКР:

- 1 Основные сведения об LTCC-технологии;
- 2 Указания по конструированию LTCC-устройств;
- 3 Описание выполненных работ.

Перечень графического материала представлен в виде рисунков, таблиц, слайдов презентации

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

подпись

А. А. Хвалько  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

В. В. Данькин  
инициалы и фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка технологии изготовления модулей на основе отжига низкотемпературной керамики» содержит 81 страницу текстового документа, 20 использованных источников.

LTCC, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА, ОТЖИГ, ТЕХНОЛОГИЯ, МОДУЛЬ, МНОГОСЛОЙНАЯ ПЛАТА.

Объект исследования: технология проектирования модуля из низкотемпературной керамики.

Цель исследования: Создание новой технологии проектирования модуля на основе отжига низкотемпературной керамики.

Задачи исследования: Обзор существующих методов проектирования LTCC-модулей. Создание новой технологии проектирования LTCC-модулей, превосходящей существующие.

В результате спроектирована и сконструирована трехмерная геометрическая модель керамического модуля. Модуль, изготовленный по LTCC-технологии, превосходит классическую печатную плату из FR-4 по своим характеристикам и возможностям, что подтверждает целесообразность использования данной технологии.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Основные сведения об LTCC-технологии.....	9
1.1 LTCC и традиционные печатные платы.....	9
1.2 Основные преимущества и применение LTCC-технологии .....	10
1.3 Технология производства LTCC .....	12
1.4 Материал GreenTape 951 .....	15
1.5 Проектирование СВЧ-модулей и многослойных плат .....	16
2 Указания по конструированию LTCC-устройств .....	
2.1 Общие указания по конструированию .....	
2.2 Указания по механической обработке.....	
2.3 Технологические указания.....	
2.3.1 Рекомендации по выполнению проводников и полосковых линий ...	
2.3.2 Требования к выполнению проводящего рисунка .....	
2.3.3 Требования к выполнению цепей питания и заземляющих проводников .....	
2.3.4 Требования к формированию переходных контактных отверстий ....	
2.3.5 Требования к выполнению межслойных контактных отверстий .....	
2.3.6 Выполнение высокочастотных переходных отверстий.....	
2.3.7 Заполнение переходных отверстий электропроводящим материалом .....	
2.3.8 Требования к выполнению полостей и окон в LTCC-структуре .....	
2.3.9 Выполнение резисторов .....	
2.3.10 Выполнение катушек индуктивности, трансформаторов.....	
2.3.11 Выполнение конденсаторов.....	
3 Описание выполненных работ.....	
3.1 Анализ исходной информации .....	
3.2 Создание трехмерной геометрической модели керамического коммутационного модуля.....	

Заключение .....	71
Список сокращений .....	72
Список использованных источников .....	73
Приложение А (обязательное) Структура и терминология элементов многослойных толсто пленочных ЛТСС-плат .....	76
Приложение Б (справочное) Размеры заготовок ЛТСС .....	77
Приложение В (справочное) Таблица значений технологических параметров	78
Приложение Г (справочное) Свойства электропроводящих паст .....	80
Приложение Д (справочное) Типы паст и их параметры .....	81

## ВВЕДЕНИЕ

Модуль, выполненный из LTCC-керамики – это конструктивно и функционально законченное радиоэлектронное (электронное) устройство или радиоэлектронный (электронный) функциональный узел, выполненное в модульном или магистрально-модульном исполнении с обеспечением конструктивной, электрической, информационной совместимости и взаимозаменяемости [1].

Если упростить то, этот термин можно сформулировать так: модули – сложные изделия, предназначенные для преобразования электрической энергии, выполнения алгоритмов и программ в составе электронной аппаратуры, электротехнического или механического оборудования.

Модули играют ключевую роль в современной электронике. Они объединяют в себе различные компоненты для выполнения определенной функции в электронном устройстве.

Микросхемы модулей выполняют целевые операции, выполняют логические вычисления или усиливают сигналы.

Основой работы модуля является взаимодействие между его компонентами, осуществляемое через электрические сигналы. Входной сигнал проходит через различные компоненты, где подвергается обработке, выполняется определенная цель и формируется выходной сигнал.

Компоненты модуля могут быть различными по своей природе и выполнять самые разные функции. К примеру, резисторы контролируют ток в схеме, конденсаторы служат для временного хранения энергии, диоды позволяют пропускать ток только в одном направлении, а транзисторы помогают управлять электрическими потоками.

Современная электроника немислима без использования модулей. Они являются основой множества устройств, от простых бытовых приборов до сложных промышленных систем.

Необходимость в этих модулях постоянно растет, ведь современные задачи требуют изготовления более сложных и функциональных устройств. Специалисты разрабатывают все новые модули, способные обрабатывать большие объемы данных, работать с большими частотами и выполнять сложные вычисления.



## 1 Основные сведения об LTCC-технологии

### 1.1 LTCC и традиционные печатные платы

Часто применяемыми материалами для изготовления многослойных печатных плат, как правило, были органические материалы с низкой диэлектрической проницаемостью (FR-4,  $\epsilon_r = 3,5 - 4,5$ ) и керамические, с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_r = 10 - 12$ ). С увеличением рабочих частот при конструировании электронных устройств потребовался новый материал, который может позволить создавать многослойные печатные платы для высокочастотных устройств, обладая при этом характеристиками схожими с керамикой. Этому материалу дали название «Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (Low Temperature Co-fired Ceramic – LTCC)».

Многослойные керамические печатные платы прежде изготавливались из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , которому дали название «Высокотемпературная совместно обжигаемая керамика (High Temperature Co-fired Ceramic – HTCC)». Печатные платы из оксида алюминия обжигались при температурах не менее  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому слои металлизации изготавливались исключительно из тугоплавких металлов: вольфрама или молибдена, что ограничивало функциональные возможности готовых изделий и не позволяло усовершенствовать технологию для снижения стоимости производства.

Поскольку основная часть потерь мощности в высокочастотных цепях возникает из-за конечной электропроводности металлов, используемых в HTCC-технологии, такие металлы как серебро или медь являются предпочтительными в качестве проводников. Трудности в использовании серебра или меди в качестве электропроводных материалов совместного обжига обусловлены их относительно низкими температурами плавления (серебро -  $962\text{ }^\circ\text{C}$ ; медь -  $1083\text{ }^\circ\text{C}$ ) по сравнению с температурой спекания обычно используемой HTCC-керамики ( $1300\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$ ). Для преодоления этих трудностей были разработаны и внедрены в практическое применение различные виды низкотемпературной

обжигаемой керамики. В керамику начали добавлять специальные стекла. Температура обжига керамики уменьшилась до 850 °С, что позволило значительно упростить процесс производства. На сегодняшний день к LTCC-технологии относят керамику, обжигаемую при температурах менее 1000 °С. LTCC-керамику можно классифицировать по основному материалу (система с добавлением стекла или не стеклянная система) и по материалу проводника (медная система, система серебро или серебро/палладий). Хотя добавление связующей добавки или стекла несколько ухудшает коэффициент рассеяния и теплопроводность, при тщательном выборе материалов ухудшение тангенса угла потерь можно удерживать в приемлемых пределах. Плохая теплопроводность налагает некоторые ограничения на устройства высокой мощности, но на практике ограничений для сигналов малой мощности нет.

СВЧ-устройства имеют низкие потери и невысокую стоимость производства, что является главными преимуществами LTCC-технологии для ВЧ и СВЧ-устройств. Стоимость производства изделий, изготовленных по LTCC-технологии, близка к печатным платам на основе FR-4, при этом диэлектрические характеристики низкотемпературной керамики соразмерны с алюмооксидной керамикой [2].

## **1.2 Основные преимущества и применение LTCC-технологии**

Главными преимуществами и особенностями LTCC-технологии являются:

1) электрические характеристики, а также их стабильность до миллиметровых длин волн. В зависимости от используемых материалов диэлектрическая проницаемость низкотемпературной керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь от 0,001 до 0,006 в гигагерцовом диапазоне частот. В качестве металлизации используются металлы с низким удельным сопротивлением (Ag, Au, Pt);

2) превосходная механическая стабильность и сохранение линейных размеров. Это преимущество возникает не только из-за малого коэффициента

теплового расширения, но и из-за эластичных свойств в широком диапазоне температур;

3) низкий КТР. КТР низкотемпературной керамики близок к КТР основных полупроводниковых материалов, используемых в электронике (Si, GaAs, InP). Это позволяет монтировать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы;

4) хорошая теплопроводность. Теплопроводность LTCC-керамики составляет 2-4 Вт/м·К, что гораздо выше, чем у печатных плат на основе органических материалов (0,1-0,5 Вт/м·К). Теплопроводность LTCC-керамики также может быть улучшена за счёт создания тепловых стоков с помощью металлизации (до 20 Вт/м·К);

5) возможность 3D интеграции. Можно легко создавать полости, отверстия, ограничители, встроенные пассивные компоненты, как показано на рисунке 1. Высокоуровневая интеграция позволяет объединять компоненты LTCC в миниатюрный корпус, устраняя необходимость во многих внешних ЭРИ

6) герметичность и возможность высокотемпературной пайки. Плотная структура LTCC-керамики не пропускает влагу, поэтому корпуса из керамики могут быть использованы в атмосфере с высокой влажностью без дополнительной защиты. Также LTCC-материалы в отличие от органических материалов сохраняют свои свойства во влажной среде (большая часть органических материалов сильно подвержена влиянию влаги);

7) устойчивость к плазменной или ионной бомбардировке.

Микросхемы с корпусами из LTCC-керамики благодаря своим свойствам успешно применяются в автомобильной отрасли, потребительской электронике, телекоммуникационных и спутниковых системах, а также в военных изделиях [2].

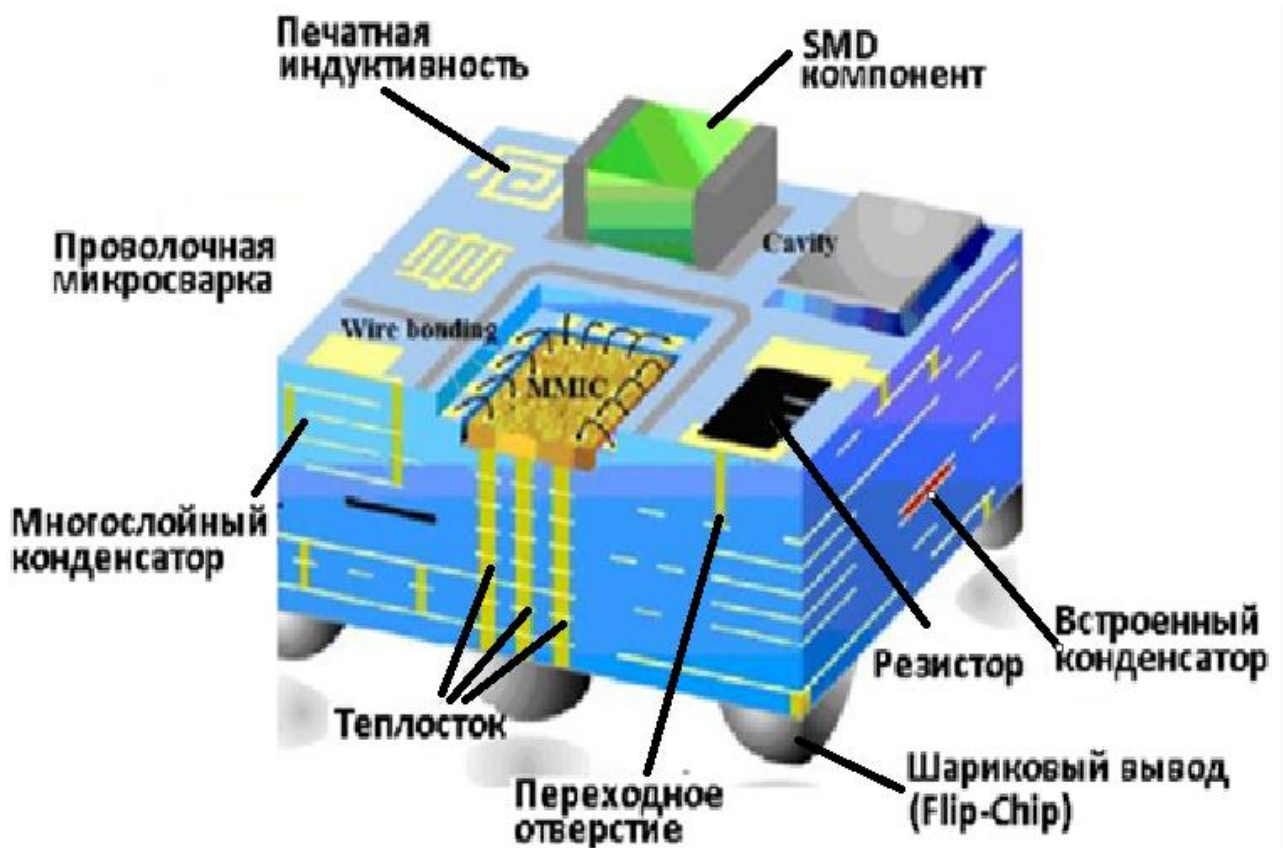


Рисунок 1 – Многослойная плата из LTCC-керамики

### 1.3 Технология производства LTCC

Процесс производства изделий из LTCC-керамики, который показан на рисунке 2, начинается с создания керамической суспензии путём смешивания керамического порошка, органических связующих, растворителей и модифицирующих добавок. Из суспензии впоследствии формируется керамическая лента. Лента нарезается на листы необходимых размеров в соответствии с имеющимся оборудованием. Затем производится формирование переходных отверстий, заполнение переходных отверстий проводящей пастой и формирование топологии с помощью специальных проводящих и резистивных паст. Керамические листы совмещаются, ламинируются, нарезаются на отдельные элементы и обжигаются. Процесс термообработки керамики, который показан на рисунке 3, как правило, состоит из этапа изостатического

ламинирования при температурах 60-70 °С под давлением, этапа выжигания органики при температурах 450-500 °С в течение 2-2,5 часов, затем следует обжиг при температуре 850 °С в течение 10 минут. После обжига LTCC-керамика сохраняет свою структуру даже при воздействии высоких температур. Это позволяет создавать устройства, работающие в широком диапазоне температур. Керамика во время обжига становится более плотной и, как правило, даёт усадку в размерах на 9-15% в плоскости листов (ось X, Y) и на 10-30% в направлении, перпендикулярном плоскости листов (ось Z). Это необходимо учитывать как при проектировании систем на основе LTCC, так и при выборе проводящих или резистивных паст. Пасты должны иметь коэффициент усадки, схожий со значениями для керамических листов. Основными материалами, необходимыми для производства LTCC-изделий, являются керамические порошки, специальные добавки, готовые керамические листы, а также пасты для создания проводников и встроенных пассивных компонентов. Все эти материалы объединяются в специальные LTCC-системы, в которых каждый компонент создан с учётом обеспечения химической и физической совместимости с другими элементами [3].

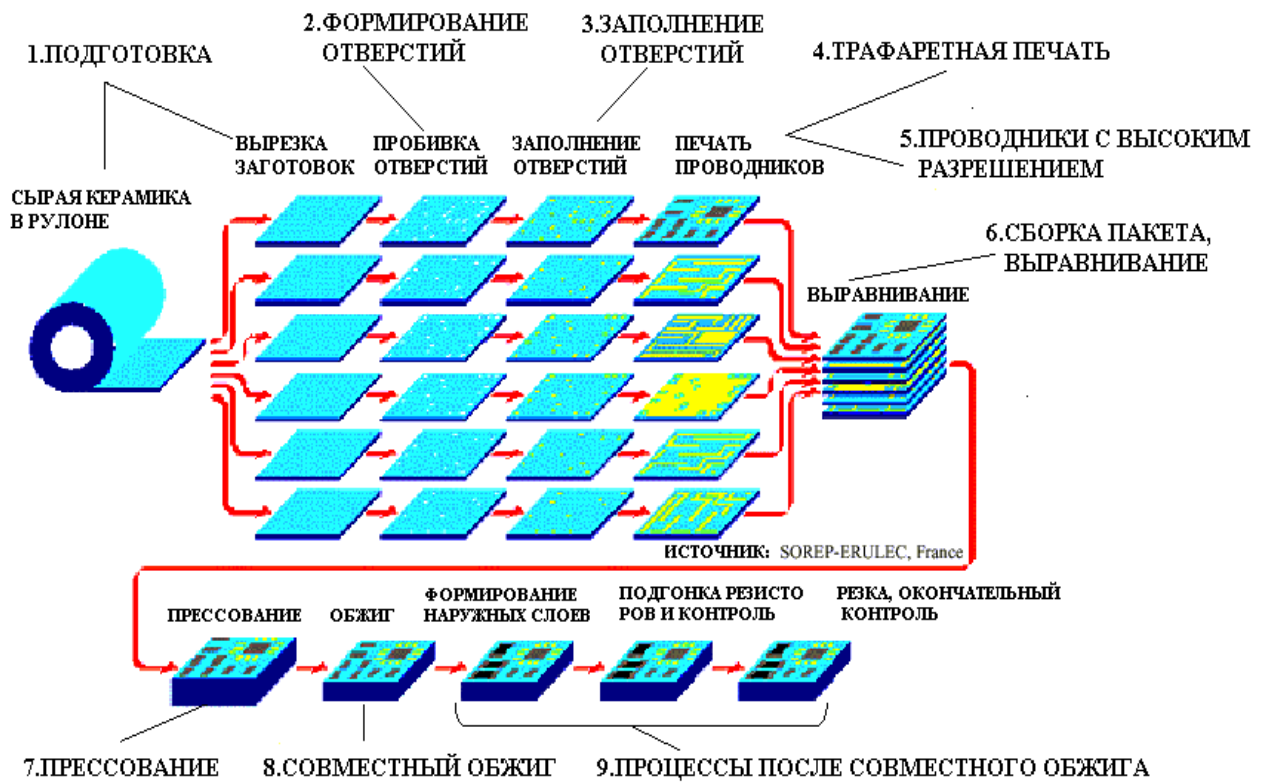


Рисунок 2 – Технология производства плат из LTCC-керамики

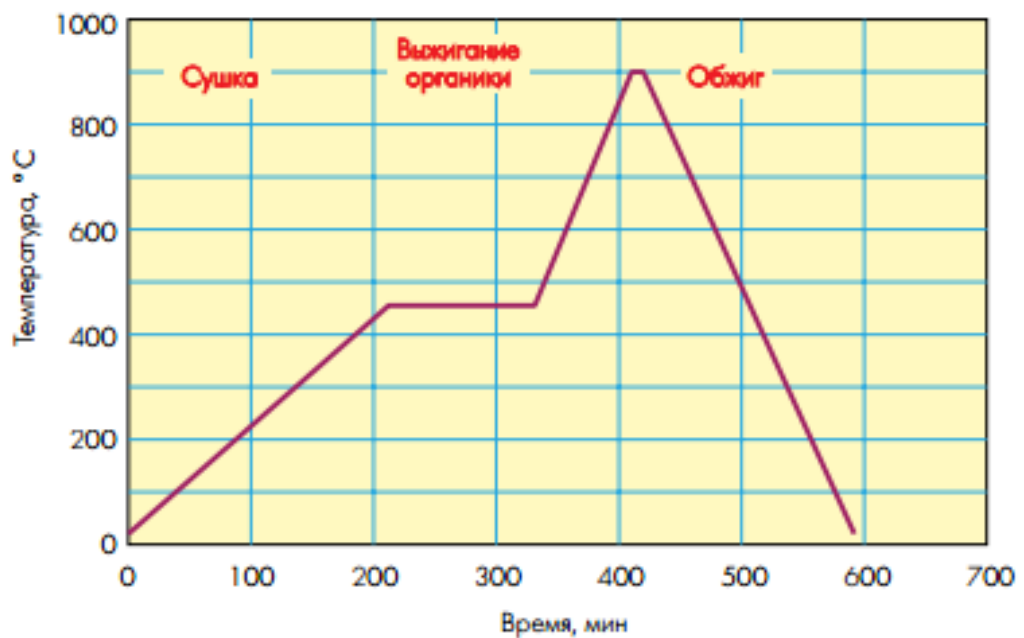


Рисунок 3 – Температурный профиль для обжига LTCC-керамики

## 1.4 Материал GreenTape 951

Создание LTCC-системы – сложный, наукоёмкий процесс, требующий существенных инвестиций. Поэтому, как правило, каждая LTCC-система представляет собой уникальное решение, и заменить один из его компонентов материалом другого производителя не представляется возможным [3].

Обслуживая отрасли промышленности, начиная от бытовой электроники и заканчивая промышленной и военной электроникой, LTCC-керамика производства фирмы DuPont™ (США) обеспечивает надежность, стабильные механические, электрические и тепловые характеристики.

Система GreenTape™ 951 включает в себя полное семейство металлов серебра и золота с совместным обжиганием, встроенных пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей). Доступный в различных толщинах, GreenTape™ 951 предназначен для использования в качестве изоляционного слоя в широком спектре применений, таких как мультичиповые модули, однокристалльные корпуса и радиочастотные модули.

Особенности включают в себя:

- 1) интеграция пассивных элементов;
- 2) встроенное экранирование/заземление;
- 3) флип-чип, чип и проволока, крепление припоя;
- 4) герметичная упаковка с низкотемпературной (<500°C) пайкой;
- 5) соединения высокой плотности;
- 6) совместная обработка и устойчивость к повторному обжигу.

Преимущества GreenTape™ 951:

- 1) надежность;
- 2) меньший размер упаковки;
- 3) стабилен в суровых условиях;
- 4) контролируемые импедансные структуры;
- 5) управление температурным режимом;
- 6) снижение общей стоимости системы;

- 7) крупносерийное производство;
- 8) стабильные механические, электрические и тепловые характеристики.

Ленты доступны в нескольких толщинах, могут быть сконфигурированы для полостей и вырезов, а также имеют контролируемую усадку [4].

Характеристики материала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики материала GreenTape 951

Материал	Химический состав	Толщина после обжига, мкм	Характеристики						Совместимость с металлом проводников
			Электрические		Тепловые		Механические		
			$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta \times 10^{-3}$	ЛКТР ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) $\times 10^6$	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Модуль Юнга, ГПа	Прочность на изгиб, МПа	
GreenTape 951	42% Al, 47% Si, 7% Ca	36; 96; 130; 216	7,8 на 10ГГц	1,5 на 10ГГц	5,8	3,0	152	320	Pd/Ag, Ag

### 1.5 Проектирование СВЧ-модулей и многослойных плат

В настоящее время в области моделирования СВЧ-устройств существует множество программ, предлагающих различные подходы к компьютерному решению электродинамических задач.

Наиболее быстрым и удобным продуктом в этой области является пакет «Microwave Office» производства американской компании «Applied Wave Research» (AWR). Однако, при всех явных преимуществах этого продукта, у него есть одно ограничение: трехмерные структуры в нем считаются как набор планарных элементов, расположенных на различных слоях, так как продукт изначально задумывался именно как инструмент проектирования монолитных СВЧ-устройств.

Однако, в большинстве случаев, СВЧ-техника не ограничивается только планарными устройствами, поэтому потребность в трехмерном моделировании



не только не отпала, она стала еще более актуальной с развитием современных средств связи, особенно миллиметрового диапазона.

«IE3D» фирмы «Zeland Software», Inc. (США) — это программа для проектирования, которая обеспечивает точность моделирования для удовлетворения совокупных потребностей инженеров по проектированию высокочастотных схем и обеспечению целостности сигналов в различных областях проектирования. Многопоточная и распределенная архитектура моделирования IE3D и высокая проектная мощность являются наиболее экономичным решением для электромагнитного моделирования и моделирования для приложений на уровне компонентов и схем. IE3D предлагает высочайшие возможности моделирования и кратчайшие сроки выполнения работ для самого широкого числа приложений.

Фирма «DuPont» (США) разработала программу «DuPont™ 943 Design Kit» для конструирования СВЧ-устройств на основе керамики с низкими потерями «943 Low Loss Green Tape™». Программа интегрирована с пакетом «Advanced Design System» (ADS) фирмы «Agilent EESof EDA» (США) и позволяет производить расчет и электромагнитный анализ устройств СВЧ-диапазона

Sonnet» фирмы «Sonnet Software, Inc.» (США) - программное обеспечение, которое заслужило прочную репутацию самого точного в мире коммерческого набора инструментов высокочастотного планарного электромагнитного (EM) анализа для однослойных и многослойных схем и антенн. Данное программное обеспечение обеспечивает высокую точность электрических моделей пассивных цепей и плоских линий передачи на основе топологии в диапазоне частот от кГц до ТГц.

«APLAC» фирмы «Aplac Solutions, Inc.» (США) — среда моделирования процессов проектирования печатных плат. Компания предоставляет программное обеспечение для использования при проектировании и разработке схем беспроводных устройств, акустических приложений и микроэлектромеханических устройств.

«Optotek» (США) – компания разрабатывающая и производящая оптоэлектронные и полупроводниковые компоненты и подсистемы. К ним относятся электроника и испытательное оборудование. Компания также поставляет специализированное программное обеспечение для автоматизированного проектирования схем, испытаний и анализа, включающее в себя «MMICAD» и «SALSA».

Для проектирования многослойных плат применяются в основном продукты компании из Австралии «Altium Limited» (Protel International). А именно «**P-CAD**» – САПР проектирования принципиальных электрических схем радиоэлектронных устройств, «**Protel**» – САПР моделирования аналого-цифровых радиоэлектронных устройств и САПР **Altium Designer**, являющийся самым распространенным продуктом разработчиков и конструкторов радиоэлектронных устройств.

Изъято: глава 2-3 стр. 19-69 согласно «приложению Б» в соответствии с регламентом размещения работ СФУ, по согласованию с научным руководителем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

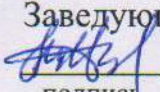
В данной работе изучена технология производства LTCC-модулей. Целесообразность применения данной технологии по сравнению с использованием традиционных печатных плат из FR-4 и высокотемпературной керамики подтверждается ее преимуществами. Изучена последовательность технологии изготовления многослойных печатных плат из LTCC-керамики, материалы, используемые в LTCC-технологии, области применения таких устройств. Также изучены программные продукты, используемые в проектировании LTCC-модулей.

Даны указания для проектирования LTCC-модулей о том, каких размеров и формы следует выбирать заготовку, как выполнять проводники и полосковые линии, какие требования существуют при выполнении проводящего рисунка, цепей питания и заземляющих проводников, полостей и окон в LTCC-структуре, переходных контактных и межслойных контактных отверстий. Также даны указания о том, как интегрировать пассивные элементы в керамической структуре и методики их расчёта.

На основе исходных данных разработана трёхмерная геометрическая модель коммутационного модуля, состоящего из 10 слоёв. Для этого использовались программные комплексы САПР P-CAD, Altium Designer и SolidWorks. В данном модуле интегрированы встроенные пассивные элементы, что невозможно в технологии изготовления классической печатной платой из FR-4. Благодаря этому удалось осуществить выигрыш в габаритных размерах и массе. При этом LTCC-керамика имеет более низкий КТР и более высокую механическую стабильность благодаря эластичности свойств в широком диапазоне температур.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра


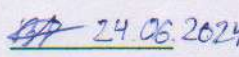
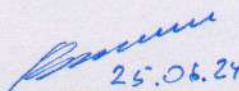

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 А.В. Кузовников  
подпись      инициалы, фамилия  
« 25 » 06 2024 г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка технологии изготовления модулей на основе отжига  
низкотемпературной керамики»  
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	 подпись, дата	доцент МБК ПФиКТ канд. физ.-мат. наук должность, ученая степень	<u>А.А. Хвалько</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>В.В. Данькин</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	Ведущий инженер- конструктор отд. 640 АО «РЕШЕТНЁВ» должность, ученая степень	<u>И.С. Васильев</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 подпись, дата	профессор, МБК ПФиКТ д-р техн. наук, доцент должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2024

