

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  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка новой технологии определения характеристик керамических  
плат низкотемпературного отжига»  
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

Руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ канд. физ-мат. наук должность, ученая степень	<u>А.А. Хвалько</u> инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.А. Гераськина</u> инициалы, фамилия
Рецензен	_____	ведущий инженер- конструктор отдела 640 <u>АО «РЕШЕТНЁВ»</u> должность, ученая степень	<u>В.Б. Гарданов</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	_____	профессор МБК ПФиКТ д-р техн. наук, доцент должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> 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  
« 25 »                      апреля                      2024 г

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

Красноярск 2024

Студенту Гераськиной Александре Андреевне  
фамилия, имя, отчество

Группа MT22-04M Направление (специальность) 15.04.05  
код

«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Разработка новой технологии определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига»

Утверждена приказом по университету № 8094/с от 14.05.24

Руководитель ВКР: А.А. Хвалько, кандидат физико-математических наук, главный специалист АО «РЕШЕТНЁВ», доцент межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии»  
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: в рамках ВКР разрабатывается новая технология определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига.

Перечень разделов ВКР: введение; сравнительный анализ конструктивных и технологических особенностей коммутационных плат на эпоксидной и керамической основах; печатная плата; сравнительный анализ; оборудование для производства модулей на основе LTCC; применяемое оборудование; разработка образцов кармических коммутационных плат для определения тепловых и механических свойств; производители материалов для технологии LTCC; выбор материала; разработка керамических образцов методики проведения испытаний; характеристики; экспериментальное определение тепловых и механических свойств образцов кармических коммутационных плат; прочность; коэффициент Пуассона; усталость; теплопроводность и теплоемкость; заключение.

Перечень графического материала: презентация PowerPoint, раздаточный материал.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_  
подпись А.А. Хвалько  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
подпись А.А. Гераськина  
инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа (далее - ВКР) по теме «Разработка новой технологии определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига» содержит 69 страниц текстового документа, 20 использованных источников.

**ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА, ТЕХНОЛОГИЯ, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ, КЕРАМИКА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, АНАЛИЗ.**

Целью ВКР является разработка новой технологии определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига.

Задачи ВКР:

– выполнить анализ предметной области, и патентные исследования по теме характеристик керамических плат, проанализировать исходные данные материала;

– разработать технологию определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига, определение только механической прочности;

– провести сравнение характеристик, полученных новым методом и исходных данных.

Критерий оценки результата: теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент Пуассона, предел прочности.

Практическая значимость: внедрение технологий, улучшит разработку изделий из керамических плат. Включая изделия ракетно-космической отрасли.

В результате ВКР была разработана новая технология определения характеристик керамических плат низкотемпературного отжига.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Сравнительный анализ конструктивных и технологических особенностей коммутационных плат на эпоксидной и керамической основах.....	7
1.1 Печатная плата.....	7
1.2 Сравнительный анализ.....	18
1.2.1 Печатная плата на эпоксидной основе.....	19
1.2.2 Печатная плата из керамики.....	22
1.3 Оборудование для производства модулей на основе LTCC.....	30
1.4 Применяемое оборудование.....	31
Выводы раздела 1.....	39
2 Разработка образцов кармических коммутационных плат для определения тепловых и механических свойств.....	40
2.1 Производители материалов для технологии LTCC.....	40
2.2 Выбор материала.....	42
2.3 Разработка керамических образцов.....	42
2.4 Методики проведения испытаний.....	47
2.5 Характеристики.....	52
Выводы раздела 2.....	55
3 Экспериментальное определение тепловых и механических свойств образцов кармических коммутационных плат.....	56
3.1 Прочность.....	56
3.2 Коэффициент Пуассона.....	59
3.3 Усталость.....	60
3.4 Теплопроводность и теплоемкость.....	62
Выводы раздела 3.....	65
Заключение.....	66
Список использованных источников.....	68

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития информационных технологий требует от разработчиков радиоэлектронных и радиотехнических средств контроля в первую очередь решения проблем повышения их быстродействия, энергетического и информационного доступа в условиях резко усложнившейся радио обстановки.

Решение этой проблемы традиционными методами исчерпало свои возможности и показало необходимость поиска новых подходов при разработке и производстве сложных технических систем передачи, приема и обработки больших потоков информации.

Технология LTCC (Low - TemperatureCofireCeramic) эффективна при решении проблем развития систем на базе аналоговых, аналого-цифровых и цифровых ФАР. Технология LTCC широко развита в мировой практике, однако не имеет аналогов в Российской Федерации.

Перспективность технологии LTCC основана на том, что она становится технологией создания единого конструктива больших трехмерных радиоэлектронных модулей, объединяя в нем большое количество различных низкочастотных, высокочастотных и СВЧ элементов и узлов.

Наряду с улучшением массогабаритных характеристик создаваемых технических средств и их надежности это позволяет резко повысить и другие ТТХ за счет уменьшения общей компоновки изделия и сокращения меж соединений в многослойных трехмерных конструкциях. В аппаратуре формирования и обработки информационных сигналов тактовые частоты перспективной аппаратуры в ближайшее время уходят в СВЧ-диапазон. Это требует нового подхода к технологии формирования цифровых цепей, т.к. они становятся СВЧ трактами.

Технология печатных плат не позволяет создавать такого уровня коммутационные цепи (низкие СВЧ свойства применяемых материалов, низкое для данного диапазона частот разрешение технологии).

Технология LTCC, как по свойствам применяемых материалов, так и по точности разрешения элементов топологии обеспечивает перспективные требования для цифровой аппаратуры на ближайшее десятилетие [1].

Изъяты главы с 1 по 3 со страницы 7 по 65 включительно, изъята таблица 17 из заключения со страницы 66 согласно приложению Б Регламента о размещении ВКР СФУ, 2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология LTCC позволяет создавать принципиально новые трехмерные гибридно-монокристаллические конструкции приемо-передающих устройств и модулей аналого-цифровых ФАР, позволяющие осуществить интеграцию в составе единого модуля многослойных СВЧ узлов и устройств цифровой обработки с интегрированными цифровыми СБИС (в т.ч. «система на кристалле»), СВЧ МИС, элементами оптоэлектроники и акустоэлектроники.

Технология LTCC базируется на технологии толсто пленочных ГИС и многослойных печатных плат. Широкое распространение получила при создании РЭА за рубежом. В отечественной практике находится в стадии освоения.

Основой технологии LTCC является комплекс материалов, включающий «сырую» керамику (термин для необожженной ленты GreenTape™, DuPont) в качестве несущего диэлектрического основания слоев и согласованную по усадке керамики при совместном обжиге систему паст для формирования пассивных элементов (проводников, резисторов, конденсаторов, индуктивностей). Отечественные материалы отсутствуют. Анализ показал, что для реализации поставленной задачи наиболее перспективными являются материалы фирм «DuPont».

Специальное технологическое оборудование отечественного производства практически отсутствует. Ведущими зарубежными фирмами по производству СТО для технологии LTCC являются «Vaccini», «AMIPresco», «DEK», «VTU», «PacificTrineticsCorporation», «КЕКО Equipment», «ЕКРА», «Aurel» и др.

Основными технологическими ограничениями при создании модулей по технологии LTCC, исходя из возможностей имеющегося оборудования и степени освоения технологии являются:

- количество слоев не выше 40;
- максимальный размер заготовки 127 x 127 мм. (5 x 5 дюймов);
- максимальный размер платы не более 100x100 мм.;
- минимальная ширина проводников 50 мкм;
- минимальный зазор между проводниками 50 мкм;
- допуск резисторов внутренних слоев  $\pm 20$  %;
- допуск резисторов наружных слоев  $\pm 1$  %.
- минимальный диаметр переходного отверстия 100 мкм.


Частотный диапазон устройств на основе технологии LTCC зависит от характеристик исходных материалов. Так «951 GreenTape™system» фирмы «DuPont» предназначена для диапазона частот до 20 ГГц, а «943 GreenTape™system (lowloss)» до 40 ГГц.



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

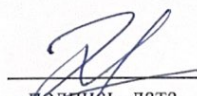
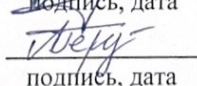

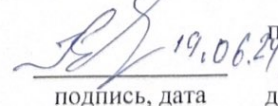
УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 А. В. Кузовников  
подпись инициалы, фамилия  
« 21 » 06 2024г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка новой технологии определения характеристик керамических  
плат низкотемпературного отжига»  
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

Руководитель	 подпись, дата	доцент МБК ПФиКТ канд. физ-мат. наук должность, ученая степень	<u>А.А. Хвалько</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>А.А. Гераськина</u> инициалы, фамилия
Рецензен	 подпись, дата	ведущий инженер- конструктор отдела 640 АО «РЕШЕТНЁВ» должность, ученая степень	<u>В.Б. Гарданов</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	 подпись, дата	профессор МБК ПФиКТ д-р техн. наук, доцент должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2024

