

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.396.61

НАУМОВИЧ
Екатерина Николаевна

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ
ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ КВЧ**

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 «Технологии приборостроения»

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор
Баранов В.В.

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Баранов Валентин Владимирович,**
доктор технических наук, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **Захаров Александр Георгиевич,**
кандидат физико-математических наук, начальник УПКВК Учреждения образования «Белорусский государственный университет»

Защита диссертации состоится «23» января 2015 г. года в 9³⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 4 уч.корп., ауд. 804, тел.: 293-89-92, e-mail: kafei@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Развитие производители арсенидгаллиевых технологий вывели на новый уровень реализацию мощных усилителей КВЧ диапазона. Еще несколько лет назад мощность в 1 Вт и более в диапазоне 30 – 40 ГГц можно было получить только сложением мощностей нескольких усилительных устройств.

Современные усилители мощности (УМ) представляют собой разнообразный модульный ряд от отдельных монолитных чипов до сложных конструктивных блоков с цифровым управлением.

Результатом представленных выше достижений явился большой интерес к созданию АФАР диапазона крайне высоких частот.

Вследствие того, что кратность шага активной решетки не должна превышать длину волны, при увеличении рабочей частоты длина волны уменьшается и вследствие этого уменьшается расстояние между ППМ АФАР. Данное условие требует повышения степени интеграции мощных аналоговых и цифровых интегральных схем.

Поэтому вопрос создания АФАР КВЧ является сложной научно-технической задачей, среди основных вопросов, возникающих при этом, является обеспечение тепловых режимов ППМ в ограниченном объеме конструкции для достижения требуемых параметров АФАР.

Проблемы отвода большого количества тепла от малых объемов полупроводниковых кристаллов, обладающих низкой теплопроводностью, являются одной из основных причин, ограничивающих достижение высоких мощностных, надёжностных и эксплуатационных показателей устройств КВЧ. В этой связи, всё возрастающую роль играет математическое моделирование тепловых процессов, которое позволяет: оценить работоспособность и параметрическую надёжность приборов, схемы, блоков КВЧ; разместить элементы в конструкции, минимизировав локальный нагрев и градиенты температуры; уменьшив термомеханические деформации и напряжения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тепловые эффекты являются одной из основных причин, ограничивающих достижение более высоких параметрических, надёжностных и эксплуатационных показателей КВЧ-приборов. Увеличение степени интеграции микросхем, мощности выходных каскадов усилителей и переключающих приборов при одновременном уменьшении их габаритов приводят к росту числа источников тепла на единицу объема внутри корпусов современных устройств КВЧ. Существенное усложнение процесса проектирования оказывает необходимость дополнительного учёта действия внешних дестабилизирующих факторов (высокая температура окружающей среды, наличие вибрации, импульсных электромагнитных полей, осадков и т.п.). Это может снизить эффективность работы активных элементов и заставляет проводить тща-

тельный анализ тепловых режимов разрабатываемых устройств и искать новые технологические подходы к проблеме отвода тепла и поиск новых решений его уменьшения.

Тепловой анализ узла модулей КВЧ является одним из важнейших этапов процесса их разработки ППМ КВЧ, позволяющий подтвердить правильность выбора и применения электронных компонентов, способа крепления и используемых материалов, что во многом определяет в дальнейшем надёжность работы устройства. Несмотря на актуальность данного вопроса, методики анализа тепловых режимов при проектировании КВЧ устройств различного назначения развиты недостаточно или затруднены малодоступны для широкого использования в инженерной практике.

В этой связи, всё возрастающую роль играет математическое моделирование тепловых процессов, которое позволяет: оценить работоспособность и параметрическую надёжность прибора, схемы, блока КВЧ; разместить элементы в конструкции, минимизировав локальный нагрев и градиенты температуры; уменьшить термомеханические деформации и напряжения. От конструкций используемых теплоотводящих элементов зависит не только эффективность отвода тепла, но также габариты и, конечно, надёжность электронных устройств. Современные теплоотводы нередко представляют собой сложные конструкции, состоящие из радиаторов, воздухопроводов, вентиляторов, тепловых труб, жидкостных систем охлаждения, различных прокладок из специальных материалов, улучшающих теплоотдачу.

Особую трудность вызывает выбор адекватных тепловых моделей в зависимости от конкретных условий эксплуатации и индивидуальных особенностей конструкции блока КВЧ. Для описания тепловых моделей необходимо предварительно определить наиболее теплонагруженные и тепловыделяющие используемые в конструкции компоненты, а также их параметры, которые наиболее влияют на точность оценки теплового режима. Вместе с тем особенностью печатных плат КВЧ-диапазона является достаточно сложная в отличие от традиционных плат геометрическая форма. Корпус готового изделия обычно представляет собой несколько объёмных «резонаторов», в каждом из которых находится один функциональный блок (генератор, смеситель, усилитель и т.п.) устройства. Это значительно затрудняет применение стандартных методик оценки теплового режима вследствие необходимости существенного упрощения граничных условий подходящих тепловых моделей. Этим обусловлена необходимость учёта и использования многоуровневого подхода при создании методики теплового анализа отдельных компонентов схем, печатных плат и конструктивных блоков КВЧ.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время данная проблема находится в стадии разработки в виду того что, появились новые микроэлектронные технологии позволяющие создавать новые мощные полупроводниковые приборы КВЧ диапазона. В следствии, этого, и стоит вопрос их применения в реальных конструкциях требующие решения ряда научных задач. Среди которых, актуальным является вопрос, реализации эффективных тепло-

вых режимов работы усилителей мощности.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является анализ конструктивных особенностей и разработка методики анализа тепловых режимов приемопередающего модуля КВЧ. Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- анализ тепловых режимов приемо-передающих модулей КВЧ
- разработка методики анализа тепловых режимов приемопередающего модуля КВЧ (ППМ КВЧ)
- апробация разработанной методики

Объектом исследования является приемопередающий модуль КВЧ

Предметом исследования являются тепловые процессы, протекающие в ППМ КВЧ, методы их анализа.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 «Технологии приборостроения».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты исследований в области анализа тепловых полей радиоэлектронных средств.

Для получения теоретических результатов использовались пакеты прикладного программного обеспечения

Имитационные расчеты, использующие метод конечных элементов для моделирования тепловых процессов, могут проводиться в таких программах как HyperLynxThermal (MentorGraphics) детализация процессов на основе численного решения фундаментальных законов гидро- и газодинамики, теплообмена и сопротивления материалов. осуществлены в программах: ANSYSIcepak, MentorFloTHERM, CD-Adapco и QFin. По решению задач механики сплошных сред использован программный комплекс STAR-CCM + (CD-adapco). Обработка статистических данных проводилась с использованием MSExcel.

Информационная база основана на использовании действующих методик расчёта тепловых полей в устройствах радиоэлектроники.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики анализа тепловых режимов приемопередающих модулей с учетом конструктивных особенностей, среди которых одним из основных является учет термокомпенсационных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Особенности конструкций приемопередающих модулей КВЧ
2. Методы расчета тепловых режимов приемопередающих модулей
3. Методика анализа тепловых режимов приемопередающего модуля КВЧ

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе предложенных методов анализа тепловых режимов возможно проектирование КВЧ устройств различного назначения с оптимальной теплоотдачей и

усовершенствованной и элементной базой и исполнением.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования были представлены на: Международной научно-технической конференции приуроченной к 50-тилетию МРТИ/БГУИР (18-19 марта 2014г, Минск).

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 77 страниц. Работа содержит 4 таблицы, 19 рисунков. Библиографический список включает 71 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы методики анализа тепловых режимов приемопередающих модулей КВЧ, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

Тепловой анализ модуля КВЧ является одним из важнейших этапов процесса его разработки, позволяющий предварительно оценить правильность выбора и применения электронных компонентов, способов компоновки конструкции и крепления тепловыделяющих элементов и используемых материалов, что во многом определяет в дальнейшем надёжность работы устройства. Наличие методик и моделей, позволяющих с высокой достоверностью провести анализ разрабатываемой конструкции является до настоящего времени важной научно-технической задачей. Решением данной задачи в настоящее время активно занимаются ведущие производители РЭС, о чем свидетельствует большое число публикаций, посвященных названным проблемам и появление новых алгоритмов, программных продуктов и методик анализа тепловых режимов РЭС и модулей КВЧ, как неотъемлемой составляющей РЭС.

Особую трудность вызывает выбор адекватных тепловых моделей в зависимости от конкретных условий эксплуатации и индивидуальных особенностей конструкции модуля КВЧ. Для описания тепловых моделей необходимо предварительно определить наиболее теплонагруженные и тепловыделяющие используемые в конструкции компоненты, а также их параметры, которые наиболее влияют на точность оценки теплового режима. Это возможно сделать на основании анализа конструктивных и технологических особенностей реализации устройств КВЧ.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апроба-

ции результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности конструкций приемопередающего модуля КВЧ.

Проведен анализ конструктивных особенностей модулей КВЧ, показывающий, что:

- теплопроводность подложки *GaAs* характеризуется большим тепловым сопротивлением;

- кристаллы МИС УМ имеют малую толщину – около 100мкм,

- поверхность кристалла УМ КВЧ должна находиться на одном уровне с контактными площадками и токоведущими дорожками печатной платы. Данное требование приводит к тому, что монтаж кристаллов УМ КВЧ производится не на печатную плату, а в окно в печатной плате.

- размеры окна в печатной плате должны иметь размер, превышающий размер кристалла УМ не более чем на 0,2мм. Данное требование обусловлено требованием минимизации длины проводников межсоединений кристалл УМ

- контактная площадка печатной платы,

- печатная плата КВЧ выполняется с учетом всех требований электродинамики к заданному частотному диапазону ППМ;

- кристалл УМ монтируется не на печатную плату, а на основание корпуса ППМ;

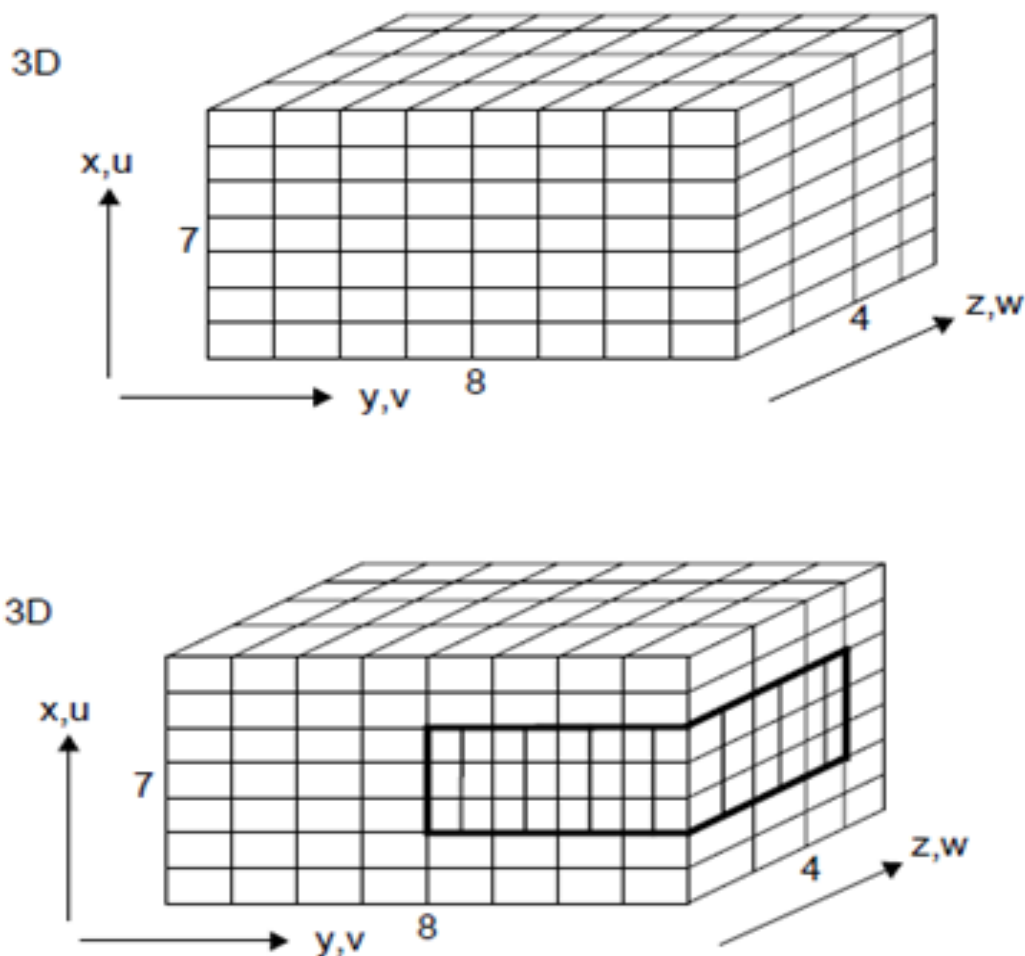
- вследствие того, что поверхность кристалла и печатной платы должны быть на одном уровне, необходимо принимать меры по конструктивному совмещению этих уровней, зачастую фрезеруя пьедестал в основании корпуса для посадки кристалла УМ.

- арсенид галлия имеет температурный коэффициент линейного расширения существенно меньший, чем теплоотводящие материалы, на которые кристаллы УМ должны монтироваться. Это может приводить к тому, что кристаллы УМ разрываются. Для исключения данного явления в последнее время между кристаллом УМ из *GaAs* и корпусом стали помещать специальную термокомпенсационную пластину. Для данной пластины подбирается материал с коэффициентом температурного линейного расширения (ТКЛР) приближающимся к ТКЛР *GaAs*. Термокомпенсаторы не имеют такой высокой теплопроводности как медь или алюминий, но их наличие является необходимым условием обеспечения механической надежности ППМ КВЧ.

Рассмотрены теплофизические модели активных элементов приемопередающих модулей КВЧ

Вторая глава посвящена методам расчета тепловых режимов ППМ.

На конструкцию модулей существенно влияют не только способы и методы охлаждения ЭРЭ и модуля в целом, но и параметры системы охлаждения. Однако теоретические и экспериментальные исследования проводятся чаще лишь для отдельных составляющих этих систем..

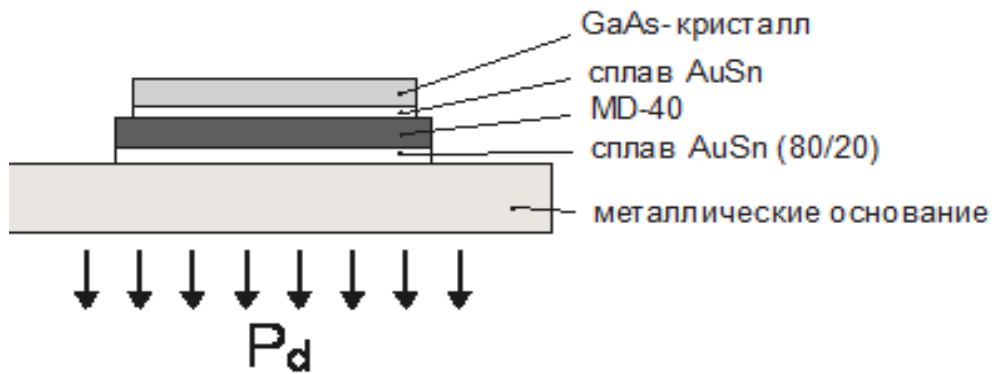


Локализация сетки в сетчатых моделях FloTHERM

На сегодняшний день не существует чётко сформулированных рекомендаций и универсальных методик их теплового проектирования как единого целого, особенно с учетом особенностей требований конструктивной реализации, которые выдвигает перед разработчиком конкретное техническое задание. Рассмотрены особенности компьютерного моделирования тепловых полей ППМ,

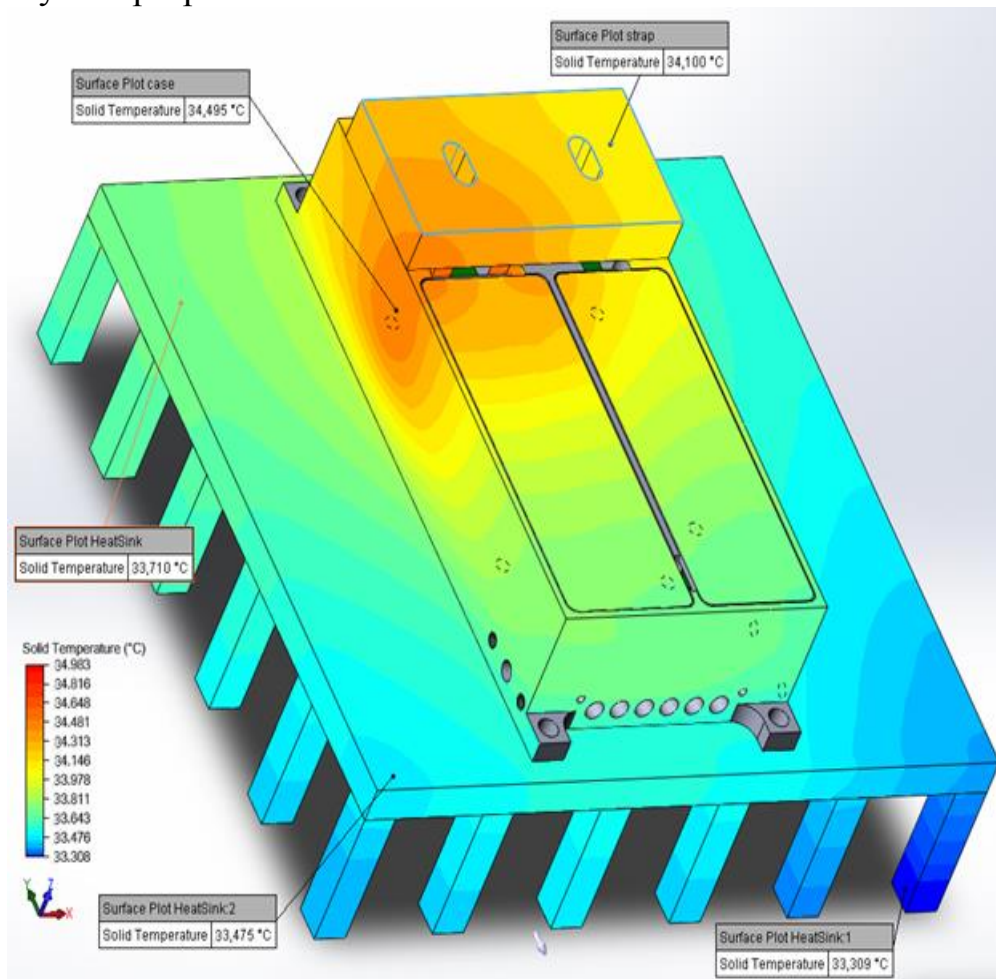
В третьей главе на основании проведенного обзора и анализа проведена разработка методики анализа тепловых режимов приёмо-передающего модуля КВЧ.

Для вычисления температуры кристалла относительно окружающей среды необходимо также знать тепловое сопротивление всех элементов конструкции, всей цепи распространения теплового потока. Это значение зависит от площади, геометрии поверхности, толщины материала элемента и его коэффициента теплопроводности.



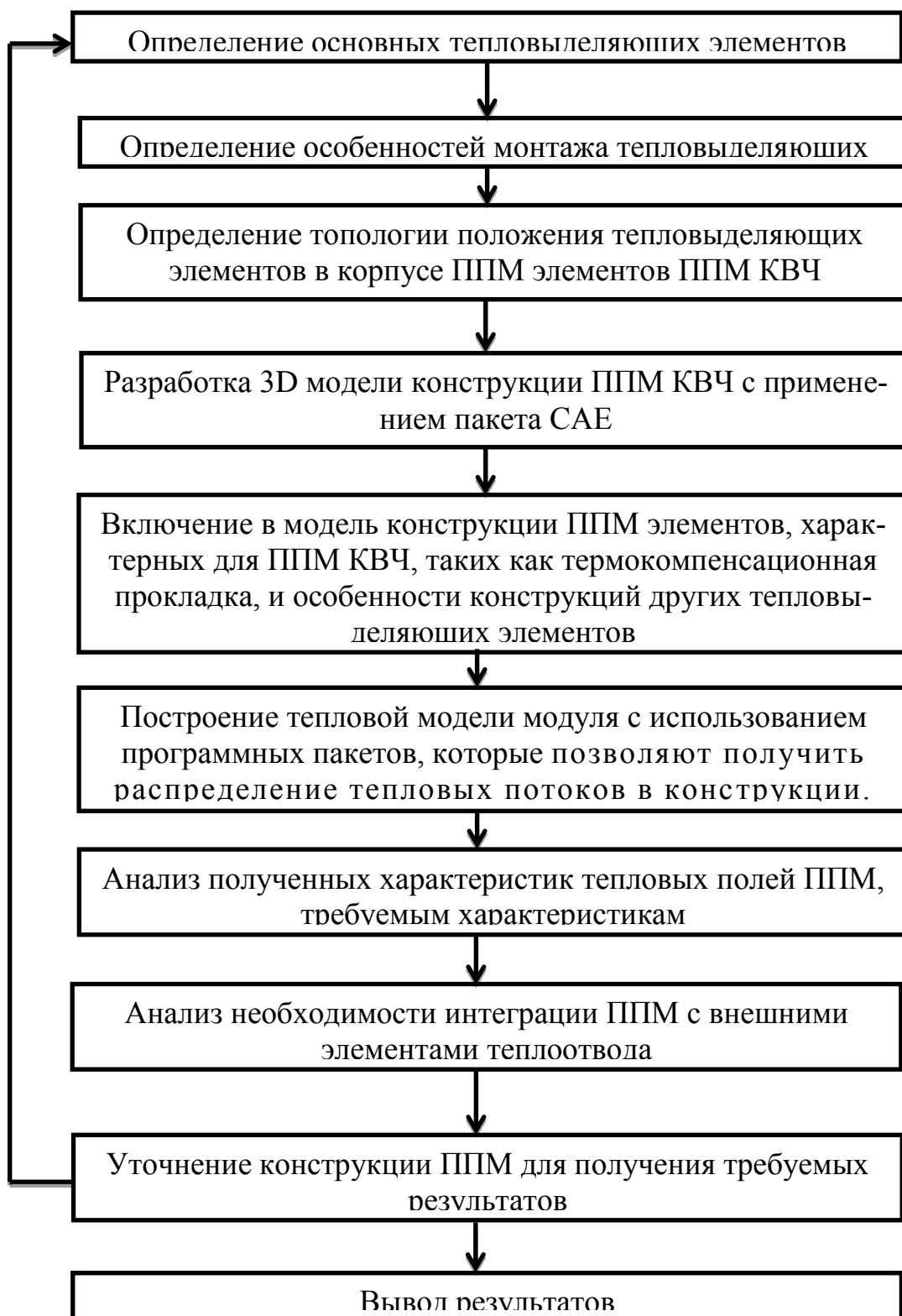
Геометрия размещения кристалла усилителя мощности при использовании термокомпенсирующей прокладки из сплава MD-40

В связи с ограниченными габаритами модулей КВЧ, для них широко применяются выходные усилители мощности в виде кристаллов с последующей разваркой межсоединений и последующей герметизацией всего корпуса модуля. Такой подход позволяет в 3-5 раз уменьшить габаритные размеры модуля, что в условиях габаритных ограничений весьма важно и широко используется разработчиками ППМ КВЧ.



Тепловое поле модуля на дополнительном теплоотводе

Рассмотрена практическая реализация конструкции ППМ КВЧ с применением представленной методики, показавшая ее эффективность.



Алгоритм методики анализа тепловых режимов ППМ КВЧ

В приложении приведен графический материал проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепловое моделирование ППМ КВЧ позволяет сократить время разработки, найти лучшее конструктивное решение и уменьшить количество опытных образцов для испытаний.

Решение задач анализа тепловых режимов приемо-передающих модулей КВЧ современных радиоэлектронных систем выходит за рамки чисто конструкторской задачи и требует рассмотрения:

- схемотехнических задач, таких как повышение КПД работы разрабатываемых систем и снижение тепловыделения за счет перевода работы системы в импульсный режим, когда усилитель мощности включается только в момент излучения сигнала.

- учета технологий микроэлектроники, вследствие перехода модулей КВЧ на уровень бескорпусных технологий с общей герметизацией.

Показано, что основной задачей расчёта анализа теплового режима модуля КВЧ является определение таких параметров отвода избыточной теплоты, при которых отсутствует перегрев используемых бескорпусных микросхем. Наиболее уязвимым элементом с точки зрения воздействия тепловой нестационарности являются бескорпусные микросхемы КВЧ ввиду их большого удельного поверхностного теплового потока. Анализ полученных результатов показывает, что, начиная с некоторых значений коэффициента теплоотдачи конвекцией и излучением, гораздо больший вклад в снижение максимальной температуры таких активных элементов вносит применение высокотеплопроводных оснований по сравнению с увеличением коэффициента теплоотдачи конвекцией и излучением.

Представленная в настоящей работе методика, учитывающая влияние термокомпенсационной пластины для снижения механических напряжений кристалла усилителя мощности, позволяет получить уточненную модель для анализа тепловых режимов приемо-передающего модуля КВЧ. Определено, что использование термокомпенсатора незначительно повышает возможную температуру нагрева самого кристалла и его нагретой зоны, что практически не влияет на его работоспособность. Для нахождения температурных профилей необходимо решать трёхмерное стационарное уравнение теплопроводности без объёмных источников в многослойной системе полупроводниковый кристалл полупроводника – металлизация – рассекатель – металлизация – теплоотвод, при этом участки избыточной мощности удобно представлять в виде плоских тепловых источников.

Моделирование тепловых полей, возникающих при работе модулей КВЧ рекомендуется проводить в два этапа. На первом этапе проводится оценка теплового режима модуля и его компонентов с помощью тепловых эквивалентных схем, определяется необходимость использования дополнительных теплоотводящих компонентов и осуществляется предварительный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования. На втором

этапе проводится построение тепловых моделей для численного моделирования распределения тепловых полей методом конечных элементов. Использование упрощённой геометрии компонентов модели позволяет разработать общую тепловую модель модуля без видимого снижения погрешности расчётов. При этом расчёт иницируемых тепловых полей целесообразно проводить для «наихудшего» случая.

Показано, что нахождение численного решения общей тепловой модели целесообразно проводить методом конечных элементов с использованием программных пакетов инженерного анализа. При этом наиболее оптимально использование CFD-анализа для трёхмерного решения задач теплообмена со сложной структурой граничных условий.

На основании результатов проведённых расчётов подтверждено, что нагрев бескорпусной микросхемы незначительно зависит от её текущего местоположения в корпусе модуля, иницируемые градиенты невелики, влияние локальных очагов избыточной мощности других источников выражено слабо, что обусловлено металлической конструкцией корпуса модуля КВЧ, наличием металлического основания с хорошей теплопроводностью и возможностью использования дополнительного теплоотвода.

Практическая ценность выполняемой работы заключается в том, что показана возможность реализации модуля КВЧ с требуемыми функциональными характеристиками на основе прогнозирования его теплового режима с целью наиболее оптимальной компоновки и определения необходимости использования дополнительных средств теплоотвода.

Список опубликованных работ

[1 – А] Журавлёв, В. И. Неоднородный разогрев модулей СВЧ нерегулярной структуры / В. И. Журавлёв, Е. Н. Наумович, В. С. Колбун // Сборник материалов конференции посвященной 50-тилетию МРТИ/БГУИР. – 2014. – С.62 – 63