

Чугунова Полина Вячеславовна, студентка,
Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург

Чугунов Александр Сергеевич, студент,
Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург

**ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ
АФАР С ВСТРОЕННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ФАЗОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
THERMAL SIMULATION OF AN ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA
TRANSCIVER MODULE WITH AN INEGRATED
PHASE-CHANGE COOLING ELEMENT**

Аннотация: В данной статье представлен результат моделирования тепловых процессов в ППМ АФАР X-диапазона с использованием локальных систем теплоотвода.

Abstract: This article presents the results of modeling thermal processes in a phased array antenna module (PAAM) of an X-band active phased array radar (APAR) using localized cooling systems.

Ключевые слова: моделирование тепловых процессов, отвод тепла, COMSOL, ППМ, ПТТ, АФАР, высокотеплопроводная подложка.

Keywords: thermal process modeling, heat dissipation, COMSOL, transceiver module (TM), flat heat pipe (FHP), active phased array antenna (APAA), high thermal conductivity substrate.

Введение. Перегрев остаётся одной из критических проблем в радиоэлектронных устройствах высокой плотности, особенно в приёмно-передающих модулях (ППМ) активнофазированных антенных решёток (АФАР), работающих в X-диапазоне. Высокая удельная тепловая нагрузка, ограниченное пространство и требование к термостабильности элементов фазирования усложняют тепловое управление. В условиях ограниченного объёма традиционные методы охлаждения становятся недостаточно эффективными.

Одним из перспективных решений является использование пассивных теплопередающих устройств (ПТТ), основанных на фазовых переходах теплоносителя. Встраивание ПТТ в конструкцию ППМ позволяет повысить эффективность отвода тепла без увеличения энергозатрат и габаритов. Настоящее исследование посвящено тепловому моделированию ППМ АФАР с интегрированным элементом фазового охлаждения и анализу его эффективности в условиях высокой тепловой нагрузки.

Исходные предпосылки. ППМ АФАР обладает удельной тепловой нагрузкой около 60 Вт на модуль. Температура активных элементов может достигать 85–100 °С, что приближается к верхней границе допустимого диапазона для полупроводниковых приборов. При этом локальный перегрев приводит к неравномерному температурному полю в модуле, что негативно сказывается на работе сопряжённых компонентов: меняются электрические характеристики, усиливаются тепловые напряжения, снижается общая надёжность сборки.

Постановка задачи. Среди локальных методов отвода тепла от приёмно-передающих модулей (ППМ) АФАР наибольшее распространение получили подложки из высокотеплопроводных материалов, таких как медно-алмазный композит (Cu-Diamond), нитрид алюминия (AlN) и карбид кремния (SiC). Использование подложек обеспечивает эффективное распределение тепла в пределах модуля, но не позволяет передать его за границы



зоны тепловыделения к внешнему теплоотводу (радиаторное, жидкостное охлаждение и т.д.), что при высокой плотности мощности ведёт к перегреву и неравномерному температурному полю.

Плоские тепловые трубы (ПТТ) реализуют пассивный фазовый перенос тепла и способны транспортировать его от источника к зоне теплоотвода при минимальной толщине. Встроенная плоская тепловая труба (ПТТ) дополняет подложку, уменьшая температурный градиент и передавая тепло. В условиях ограниченного объёма, высокой тепловой нагрузки и требований к термостабильности в X-диапазоне, использование ПТТ с подложкой является наиболее эффективным решением для охлаждения ППМ АФАР, устанавливаемого на борту летательного аппарата.

Основная часть. Приёмо-передающий модуль (ППМ) активной фазированной антенной решётки (АФАР) является ключевым элементом современной радиолокационной системы. В АФАР каждый модуль самостоятельно осуществляет приём, передачу и фазирование сигнала, обеспечивая высокую гибкость, точность и надёжность работы РЛС. Основными компонентами ППМ являются усилитель мощности (УМ), малoshумящий усилитель, фазовращатель, аттенюатор, цифровой контроллер и элементы радиочастотной обвязки.

Источником тепла в ППМ выступают, прежде всего, полупроводниковые СВЧ-компоненты, работающие на высоких уровнях мощности, активные элементы ППМ – полупроводниковые приборы, чаще всего на основе нитрида галлия (GaN). Они располагаются на поверхности подложки в верхней части модуля, формируют усилительный тракт передатчика и/или приёмника. Количество транзисторов зависит от выходной мощности модуля и выбранной архитектуры. Транзисторы располагаются плотно, что соответственно приводит к образованию локальных зон с повышенной тепловой нагрузкой – так называемых “горячих пятен”.

Также в конструкцию ППМ входят печатные платы, микрополосковые линии, фазовращатели, контроллеры и системы защиты. Однако с точки зрения теплового анализа, наибольший интерес представляет вертикальная структура: от кристалла GaN через подложку и контактные слои к основанию, откуда тепло передаётся в окружающую среду.

Таким образом, для проведения исследований выбран ППМ, обладающий следующими параметрами: габаритные размеры ППМ 60x20x8 мм; количество GaN-транзисторов в 1 ППМ – 4 шт.; габаритный размер кристалла GaN-транзистора 1x1 мм; КПД УМ 40-50 %.

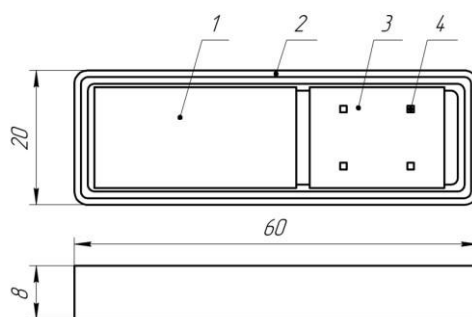


Рисунок 1 – Габаритные размеры и внешний вид ППМ АФАР X-диапазона; 1 – плата управления и питания ППМ; 2 – корпус ППМ; 3 – подложка; 4 – GaN-транзисторы (4 шт.)

Плоская тепловая труба (ПТТ) представляет собой пассивное теплопередающее устройство, в котором тепло транспортируется за счёт фазового перехода рабочего тела. Внутри герметичного корпуса размещена пористая капиллярная структура, обеспечивающая



циркуляцию теплоносителя без внешнего источника энергии. В зоне нагрева жидкость испаряется, пар переносится к зоне конденсации, где отдаёт теплоту, после чего конденсат возвращается по фитилю за счёт капиллярных сил.

В конструкции ПТТ применена капиллярно-пористая структура из спечённой меди с эффективным радиусом пор 20 мкм и толщиной 0,4 мм, обеспечивающая устойчивую циркуляцию теплоносителя и теплопередачу до 60 Вт. В качестве рабочего тела используется деионизированная вода, обладающая высокой удельной теплотой парообразования и совместимостью с медной структурой. Рабочий диапазон температур составляет 60–90 °С; при верхней границе давление насыщенного пара достигает ~70 кПа. Степень заполнения внутреннего объёма жидкостью выбрана в пределах 45–55%, что обеспечивает баланс между стабильностью фазового цикла и предотвращением затопления испарителя.

ПТТ интегрируется непосредственно в корпус ППМ и располагается под подложкой с активными элементами и платой управления.

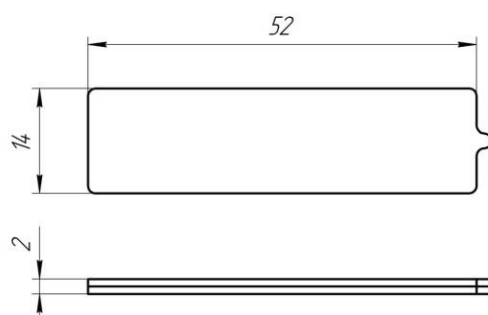


Рисунок 2 – Габаритные размеры и внешний вид ПТТ

На рисунке 3 представлено расположение контрольных точек измерения температуры, включая область активных элементов, центральную часть подложки и выходную зону тепловой трубы.

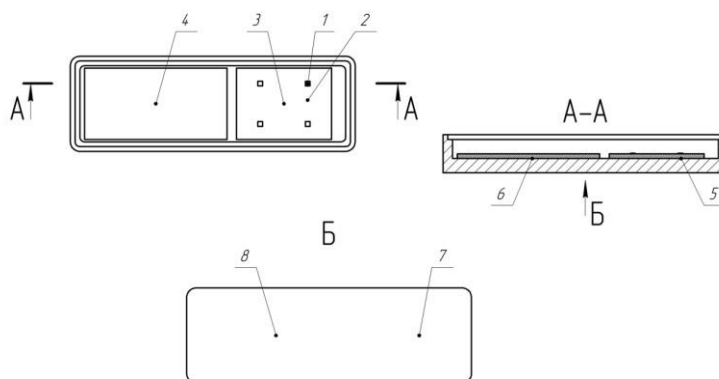


Рисунок 3 – Положение точек измерения температуры ППМ

Далее представлен этап численного моделирования, в рамках которого были рассмотрены два варианта конструкции ППМ – с использованием плоской тепловой трубы (ПТТ) и без неё. Ниже приведены результаты моделирования конфигурации с интегрированной ПТТ, выполненного в программной среде COMSOL Multiphysics.



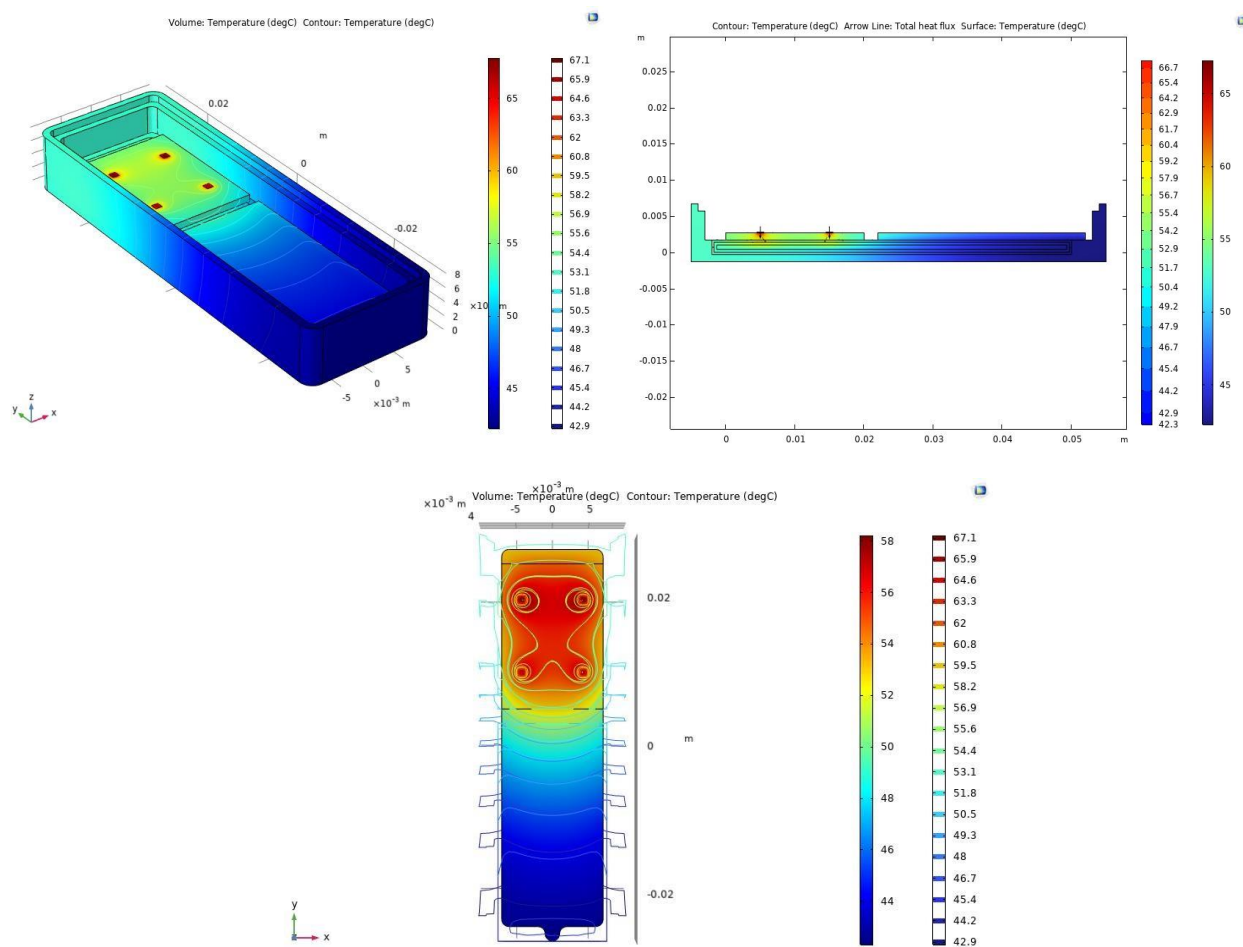


Рисунок 4 – Результаты моделирования ПТТ в составе ППМ

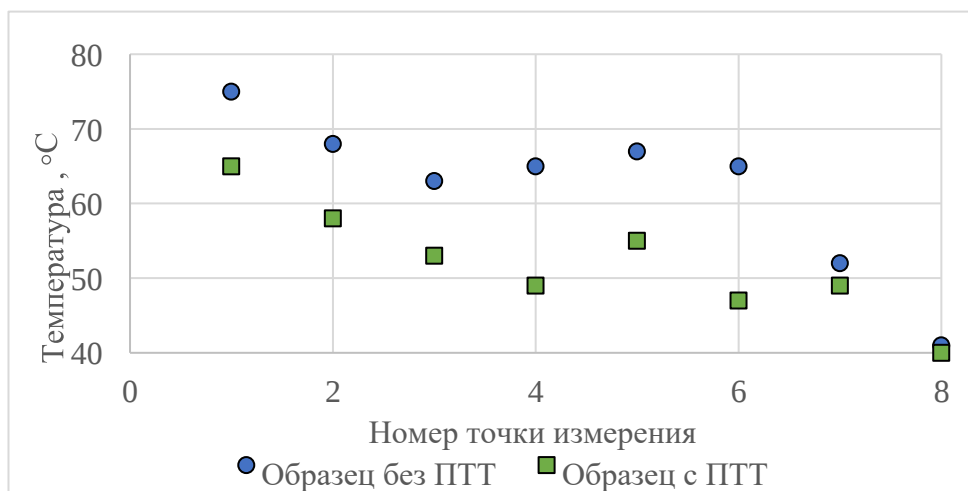


Рисунок 5 – Значения температуры в выбранных точках ППМ без использования ПТТ, и с использованием ПТТ

Анализ графика показывает, что интеграция плоской тепловой трубы (ПТТ) в конструкцию ППМ приводит к значительному снижению температурных значений в контрольных точках по сравнению с образцом без ПТТ. Наибольшая разница достигает 18 °С,



что свидетельствует об эффективности фазового механизма теплопереноса. Кроме того, использование ПТТ способствует выравниванию температурного поля в пределах ППМ, снижая термические градиенты. Данный подход повышает термостабильность активных элементов и может существенно улучшить надёжность и ресурс функционирования устройства в условиях высокой тепловой плотности.

Для более детального анализа эффективности теплопередачи была также рассмотрена зависимость температурного распределения от материала конструкционной подложки, используемой совместно с ПТТ.

Для проведения численного моделирования в среде COMSOL были выбраны подложки из следующих материалов: медно-алмазного композита (Cu-Diamond), нитрида алюминия (AlN) и карбида кремния (SiC). Выбор материалов Cu-Diamond, AlN и SiC обусловлен их высокой теплопроводностью, термической стабильностью и применимостью в конструкциях радиоэлектронных модулей с высокой плотностью тепловыделения. Ниже приведён результат моделирования тепломассопереноса в ППМ с ПТТ и высокотеплопроводной подложкой из медно-алмазного композита.

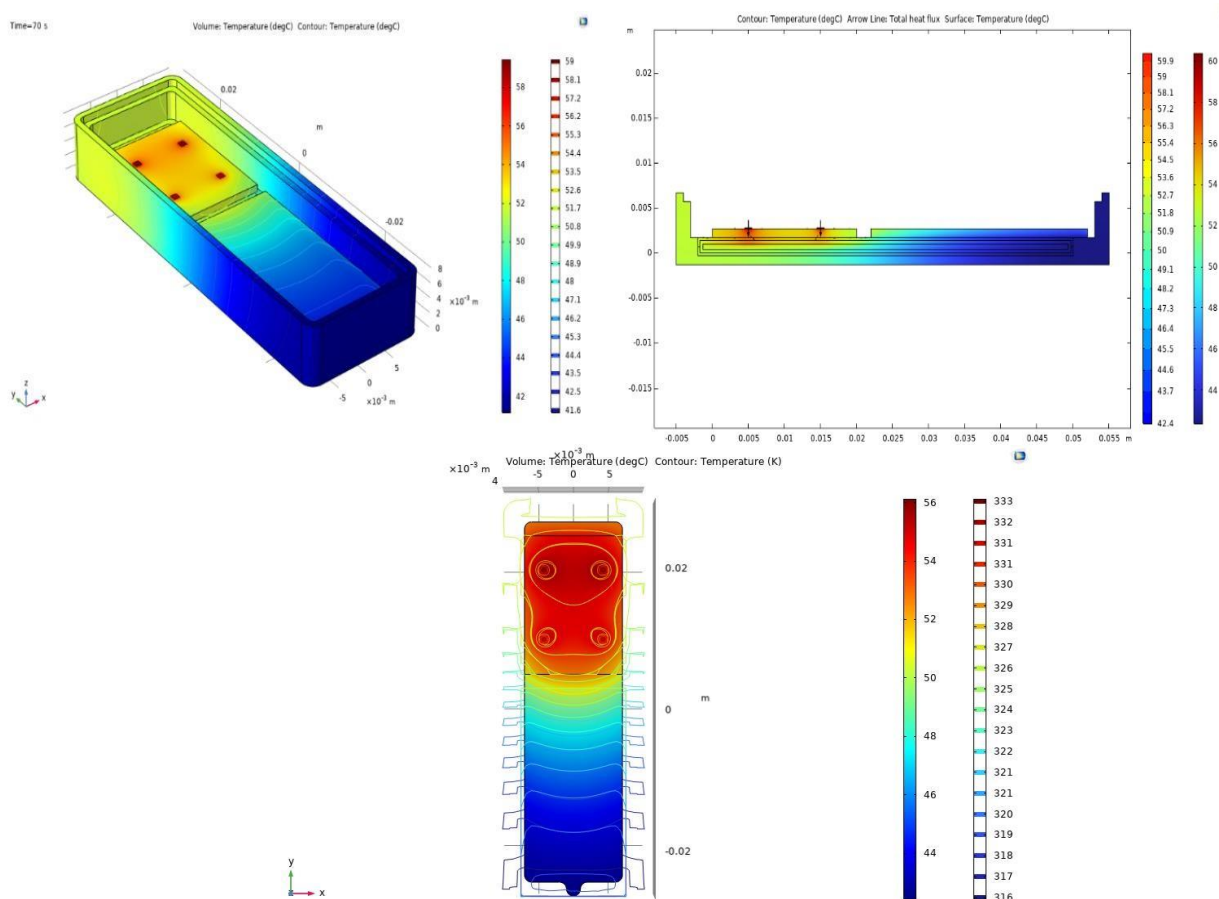


Рисунок 6 – Распределение температур в модели ППМ с использованием подложки из CuDiamond

Все полученные результаты моделирования представлены наглядно на графике ниже, включая температурные распределения для всех рассматриваемых вариантов подложек – CuDiamond, AlN и SiC.



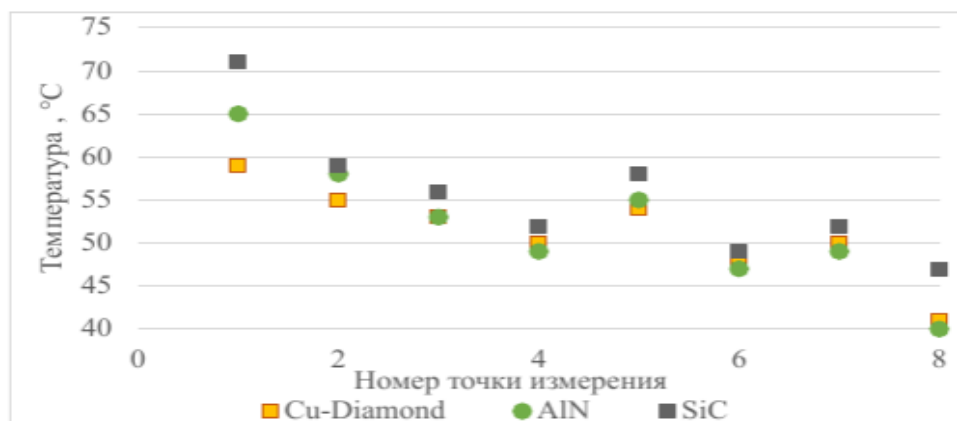


Рисунок 7 – Сравнение температурных значений в контрольных точках ППМ при использовании различных материалов подложки

На основании данных, представленных на рисунке 7, установлено, что материал подложки существенно влияет на температурное распределение в ППМ. Наименьшие значения температуры наблюдаются при использовании медно-алмазного композита (Cu-Diamond), что обусловлено его высокой теплопроводностью. Подложка из SiC демонстрирует близкие, но менее эффективные результаты, с превышением температур на 3–7 °С. Несмотря на термические преимущества Cu-Diamond, его высокая стоимость и ограниченная доступность могут ограничивать применение в серийных изделиях. Подложка из AlN наиболее оптимальна по обеспечению температурного режима и стоимости.

Заключение. В работе проведено численное моделирование тепловых процессов в ППМ с интеграцией плоской тепловой трубы и различных материалов подложек. Показано, что применение ПТТ позволяет снизить пиковые температуры на 12–18 °С и уменьшить температурные градиенты до 5–7 °С, обеспечивая более равномерный тепловой режим активных компонентов.

Сравнение подложек из Cu-Diamond, AlN и SiC подтвердило, что теплопроводность материала существенно влияет на температурное распределение. Наилучшие результаты показал медно-алмазный композит (до 59 °С в области кристаллов транзисторов), однако его высокая стоимость ограничивает широкое применение. Подложки из AlN и SiC обеспечивают приемлемые температуры (65–71 °С) при лучшей технологичности.

Результаты подтверждают целесообразность использования ПТТ и оптимального выбора подложек для повышения тепловой стабильности ППМ в условиях ограниченного объема. Перспективными задачами остаются экспериментальная проверка и моделирование в нестационарных режимах.

Список литературы:

1. Бекишев А. Т., Смоляков А. А., Исаков М. В., Попель А. А., Пономарев Д. Л. Новый подход к решению задачи охлаждения многоканальных приемо-передающих модулей АФАР // Воздушно-космическая сфера. 2018. №1. С. 64–69. 2.
2. О.И. Крахин., В.П. Радченко. Проблема теплоотвода приемо передающих модулей и АФАР с высоким уровнем теплового излучения // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г. 3
3. Тимошенков В.А., Хлыбов А.В., Родионов Д.С., Пантелеев А.Ю., Тимошенков П.В. Тепловой баланс СВЧ Т/Р-модуля Х-диапазона // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2019. – №2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microwave.ru/moduls/teplovojbilans/> – (Дата обращения: 01.05.2025).

