

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

Журавлёв В. И., Наумович Н. М., Стежко И. К., Колбун В. С.

Центр 1.6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь
E-mail: vadzh@bsuir.by

Рассматривается способ уменьшения потерь СВЧ-тракта приёмопередающего модуля с помощью активного охлаждения переключающих компонентов. Тепловой анализ переключателя мощности указывает на возникновение допустимых градиентов температуры при использовании термоэлектрического охлаждения

ВВЕДЕНИЕ

Центральной проблемой СВЧ-техники для космического радиолокатора с синтезированной апертурой является построение приёмопередающих модулей (ППМ) фазированной антенной решетки с заданными характеристиками. ППМ должны обеспечивать переключение различных поляризаций, максимальный коэффициент полезного действия, высокую температурную стабильность и точность установки параметров, минимальную массу, технологичность при серийном изготовлении и низкую стоимость. Основным требованием радиолокатора является качество результирующего изображения и его разрешающая способность [1]. Оптимизация тепловых режимов является важнейшим методом обеспечения стабильного и качественного функционирования электронных модулей [2]. Одним из действенных способов уменьшения потерь СВЧ-тракта ППМ является посредством использования активного охлаждения и термостабилизации ключевых компонентов. Применение методов управления тепловым режимом требует проведения соответствующего моделирования для создания наиболее эффективной конструкции.

I. ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

Ввиду того, что требования к температурным режимам для нормального функционирования конечного устройства высоки, а активные компоненты СВЧ систем становятся все более сложными при меньших размерах, усилительные каскады имеют всё большую удельную выходную мощность. Повышение температуры работы усилителя мощности ведёт к ухудшению основного параметра в СВЧ трактах: коэффициента передачи или мощности передающего тракта. Разница в потерях тем ощутимее, чем выше рабочая частота и выше температура корпуса усилителей мощности. В рассматриваемом ППМ используются два коммутатора, один предназначен для переключения поляризации антенной решётки и должен обладать высокой входной мощностью. Ввиду того, что мощные переключатели расположены в тракте после оконечного каскада усиле-

ния передающего канала ППМ, вносимые потери существенно влияют на характеристики всей радиолокационной системы [3]. Основную трудность при таком решении представляет не просто отведение избыточной температуры, а дополнительно охлаждение с поддержанием максимально низкой температуры основания корпуса микросхемы переключателя ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в допустимом диапазоне.

Одним из решений является использование термоэлектрических модулей (ТЭМ). Размеры теплоотводящего основания микросхемы переключателя в корпусе QFN не превышают 5×5 мм. Поэтому целесообразно использовать дополнительный теплопроводящий держатель между основанием корпуса микросхемы и ТЭМ. Вся теплообменная система требует локальной теплоизоляции во избежание дополнительных тепловых потерь и возникновения конденсата. Теплоперенос в ТЭМ модели описывается только механизмом теплопроводности, коэффициент теплопередачи конвекцией пренебрежимо мал. Это удовлетворяет требованию общих граничных условий и слабо влияет на получаемую точность. Топологически трёхсекционный ТЭМ представлен тремя кубоидами, образующими усечённую пирамиду с начальной температурой на горячей поверхности и заданным тепловым потоком на холодной поверхности.

Распределение тепла в таких структурах на поверхности многослойных материалов при импульсном нагреве носит неоднородный характер. Аналитические методы с использованием преобразований Фурье и Лапласа позволяют определить значения критических температур полупроводниковых структур с небольшими погрешностями и широко используются на практике при термических импульсных нагрузках. Они наиболее оптимально учитывают реальные условия теплопереноса в полупроводниковом кристалле при наличии теплоотвода. Для оптимизации параметров модели рассматривается моделирование теплопереноса теплопроводностью при граничных условиях второго рода. Математическая модель основана на системе уравнений теплопро-

водности в твёрдом теле, уравнении движения Навье-Стокса, уравнении сохранения энергии и уравнении неразрывности. В рассматриваемой расчётной области присутствуют несколько под-областей, система уравнений для каждой подобласти записывается отдельно.

В рассматриваемой постановке задачи определения теплового поля в области переключателя не требуется решать задачу теплопереноса для всей топологии ППМ. Решается только модель для локальной области микросхемы переключателя. Достаточно определить мощность источников тепла и тепловые потоки на границе печатной платы переключателя.

Адекватность тепловой подмодели термоэлектрического модуля имеет важное значение, так играет ключевую роль в распределении температуры вдоль кристалла микросхемы переключателя. Помимо термоэлектрических характеристик, выбор рассматриваемого ТЭМ обусловлен минимальными размерами холодной стороны. При этом высота ТЭМ должна быть минимальной для размещения между верхней и нижней крышкой ППМ с учётом теплоотвода с горячей стороны.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На данном этапе рассматривается тепловая модель на уровне кристалла микросхемы переключателя с выводами. Во-первых, необходимо определить, эффективно ли охлаждение самого кристалла; во-вторых, важно избежать больших тепловых градиентов при работе ТЭМ. Основным механизмом передачи тепла в это случае – теплопроводность по оси, нормальной к охлаждающей поверхности ТЭМ (ось OZ). Результаты моделирования показывают, что механизм теплопроводности эффективно и равномерно работает вдоль всего теплового пути (рис. 1). Очевидно, что в местах крепления и пайки этот механизм замедляется вследствие увеличенного переходного теплового сопротивления, что не оказывает значительного влияния.

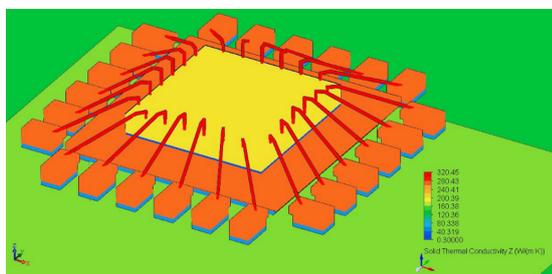


Рис. 1 – Теплопроводность микросхемы переключателя по оси OZ

Рассматривая распределение температуры вдоль кристалла и корпуса микросхемы переключателя, можно установить, что в этих областях

отсутствуют существенные градиенты температуры (рис. 2). Это чрезвычайно важно, так как позволяет переключателю, а следовательно, и всему СВЧ тракту надёжно функционировать и не испытывать термомеханических напряжений. Результаты показывают перепады температуры не более 1°C вдоль кристалла и не более $2-3^\circ\text{C}$ по корпусу микросхемы и по нормали к поверхности ТЭМ, что является вполне допустимым в процессе эксплуатации при заданной мощности.

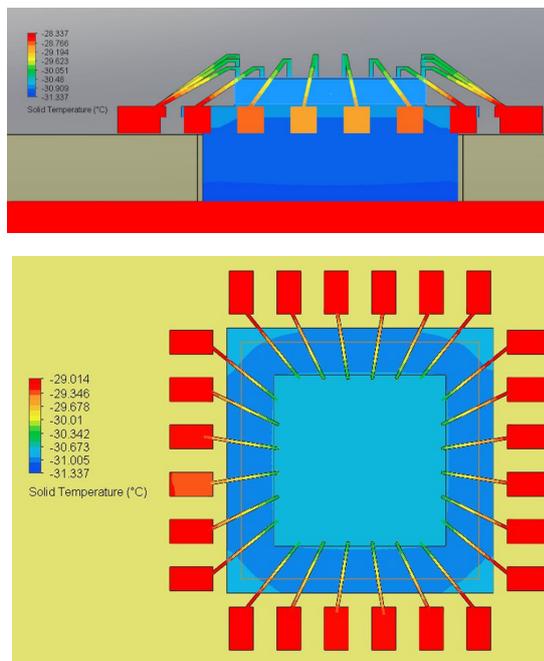


Рис. 2 – Градиенты температуры при наличии ТЭМ

Как видно из результатов, используемая топология позволяет избежать больших градиентов температуры даже на сравнительно больших по размеру структурах. Предварительная оценка рассмотренным способом на этапе проектирования позволяет вовремя спрогнозировать возникновение неоднородного разогрева структуры и принять меры по её оптимизации.

III. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумович, Н. М. Представление радиолокационных данных космического радиолокатора с синтезированной апертурой / Н. М. Наумович, Р. П. Богущ, В. И. Журавлёв, В. Т. Ревин, И. К. Стежко, С. П. Урбанович // Восьмой Белорусский космический конгресс, 25-27 октября 2022 года, Минск : материалы конгресса : в 2 т. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т. 1. – С. 222–225.
2. I. Torralbo *et al.* Thermal Analysis of the Solar Orbiter PHI Electronics Unit // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – Vol. 56, no. 1. – 2020. – P. 186–195.
3. V. Kumar *et al.* Thermal Equilibrium in T/R Module Operation and Active Phased Array Antenna Calibration / R. K. Verma, U. S. Pandey, K. S. Beenamole and R. K. Gangwar // 2021 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC), KANPUR, 2021. – P. 1–4.