

# ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ X ДИАПАЗОНА

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

Центр 1.6 НИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: vadzh@bsuir.by

*Предложена тепловая модель бескорпусной монолитной микросхемы усилителя в составе приёмопередающего модуля. Результаты моделирования показывают, что при максимально допустимой постоянной входной мощности обеспечивается допустимый нагрев и равномерное распределение теплового поля в области размещения кристалла усилителя.*

## ВВЕДЕНИЕ

Бескорпусные твердотельные элементы, выполненные в виде микроволновых интегральных монолитных интегральных схем на диэлектрических подложках с высокой диэлектрической проницаемостью, всё чаще используются в качестве мощных усилителей X диапазона [1]. Такие компоненты находят применение в усилителях мощности приёмопередающих модулей и радиочастотных переключателях [2]. Несмотря на технологический прогресс, позволяющий увеличивать мощность микроволнового излучения, системы отвода тепла часто не справляются с необходимыми режимами охлаждения в условиях эксплуатации.

Наиболее сложной является задача поддержания стабильных температур при высокой плотности упаковки усилителей и переключателей мощности в условиях низкого атмосферного давления или его отсутствия для бортовых систем [3]. Управление тепловым режимом цепей радиочастотной мощности играет ключевую роль в обеспечении стабильной и надежной работы оборудования. Основная задача – эффективное удаление избыточного тепла из компонентов и участков цепи, чтобы предотвратить их перегрев, снизить риск ухудшения характеристик или выхода из строя. Даже несмотря на универсальный характер контроля тепловых режимов для всех элементов цепи, оптимальный подход должен начинаться именно с компоновки и проектирования печатных модулей. Правильное расположение компонентов, использование эффективных участков металлизации и организация хороших тепловых путей позволяют значительно повысить тепловую эффективность и обеспечить надёжную работу радиочастотных систем. Это требует разработки специальных решений для обеспечения эффективного теплоотвода и предотвращения перегрева активных элементов, что критически важно для поддержания их работоспособности и долговечности. Моделирование этих тепловых процессов играет важную роль в определении оптимальных параметров охлаждения и позволяет настроить

как электрические, так и конструкционные свойства микроволновых усилителей мощности.

## I. ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

В качестве примера рассматривается микросхема усилителя X диапазона СН8100 (United Monolithic Semiconductors), выполненная в бескорпусной конструкции на основе GaAs и предназначенная для размещения на теплоотводящем основании. Рассмотрим анализируемая конструкция с пассивным теплоотводом, где микросхема размещена на теплоотводящей пластине, что способствует повышению эффективности теплоотдачи и снижению температуры активных элементов, обеспечивая более стабильную работу устройства и увеличивая его надёжность.

В разработанной модели анализа теплового поля для описания распределения температуры применяются граничные условия второго рода. Для упрощения решения были введены следующие допущения. Распространение тепла в многослойной системе считается определяющимся распределением внутри того слоя, который занимает наибольшую площадь. При этом, несмотря на структуру микросхемы из нескольких слоёв, максимальные тепловые перепады в основном зависят от параметров материала полупроводниковой подложки, которая существенно крупнее сформированных слоёв. Хотя теплоотвод зачастую имеет размеры, сопоставимые с кристаллом, распределение тепловых потоков в нём аналогично распределению в кристалле, а возникающие тепловые градиенты в целом значительно меньше. При общем решении уравнения теплопроводности параметры полупроводника моделируются как постоянные величины, что значительно упрощает аналитическую и числовую обработку.

Топология усилителя мощности довольно неоднородна, поэтому применение численных методов является важным для оценки теплового нагрева как активных элементов, так и прилегающих областей структуры. В моделируемой сеточной модели каждая область представляется как самостоятельный источник тепла. Используя CFD-методы, можно получить распределение тепловых полей в неоднородной структуре, что

обеспечивает более точное представление о температурных градиентах и эффективных путях отвода тепла внутри устройства.

## II. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты моделирования показывают, что при максимально допустимой постоянной входной мощности примерно 11 Вт обеспечивается допустимое и достаточно равномерное распределение теплового поля в области размещения кристалла усилителя (рис.1). В местах крепления и пайки теплопередача замедляется из-за увеличенного теплового сопротивления, однако это не оказывает значительного влияния на общую температуру. Анализ распределения температуры по кристаллу и теплоотводящей пластине усилителя выявил отсутствие существенных температурных градиентов, что важно для надежной работы СВЧ тракта и предотвращения термомеханических напряжений (рис.2). Максимальные температурные перепады вдоль кристалла составляют менее 2 °C (рис.3). Видно, что механизм теплопроводности эффективно и равномерно работает вдоль всего теплового пути. Это является допустимым в условиях эксплуатации при заданной мощности, позволяя своевременно прогнозировать и избегать локальных перегревов и структурных проблем на стадии проектирования.

Моделирование в импульсном режиме показало возможность снижения рассеиваемой мощности и минимизации рисков деградации из-за неравномерного нагрева. При длительности импульса 50 мкс и частоте повторения 3,5 кГц средняя рассеиваемая мощность в микросхеме составила около 0,45 Вт за один цикл. Максимальная температура нагретой зоны при этом не превышала 99 °C, что соответствует требованиям по эксплуатационной надёжности и сохранению электрических характеристик усилителя.

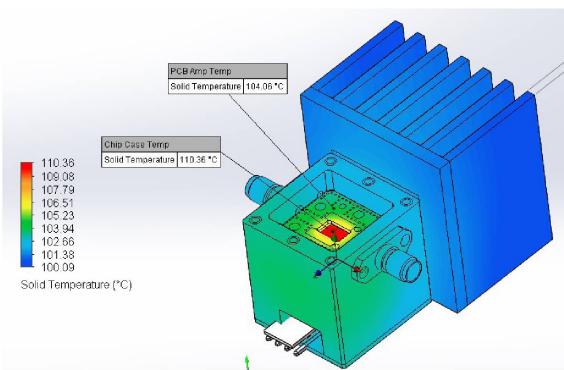


Рис. 1 – Результаты моделирование нагрева усилителя при максимально подводимой постоянной мощности

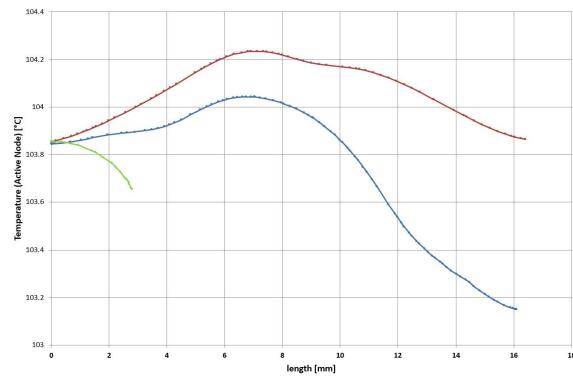


Рис. 2 – Градиенты температуры по осям пластины

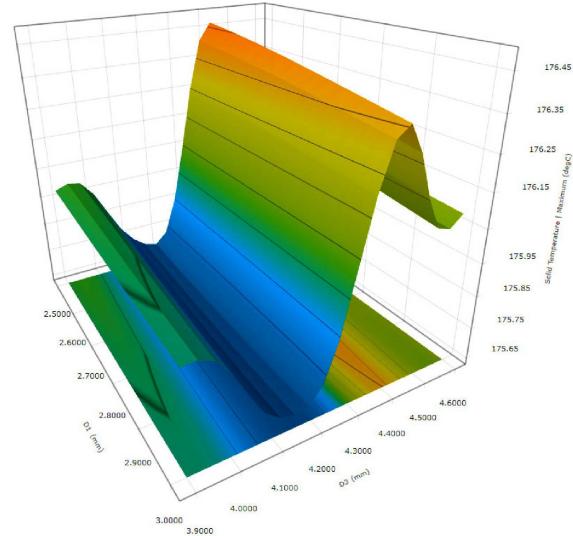


Рис. 3 – Расчётное распределение температуры кристалла

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты позволяют использовать моделирование для анализа теплового распределения в усилителях мощности диапазона Х и использовать меры для снижения потерь в СВЧ тракте без необходимости кардинальной смены конструкции, что способствует повышению эффективности системы и долговечности её компонентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Aras, *et al.* HEMTs With Side-Source-Via for Optimizing the Performance and Size of High-Power Amplifiers // IEEE Microwave and Wireless Technology Letters. – vol. 35, no. 7. – 2025. – P. 1061-1064.
2. S. T. Sriram, *et al.* A 42 dB Gain, 16 W X-Band MMIC Power Amplifier with 46% PAE for Satellite Applications / 2024 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference, Hyderabad. – 2024. – P. 1-4.
3. 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.