

УДК 621.375

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.56.5.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.56.5.016)

Исследование тепловых режимов усилителя мощности СВЧ диапазона в SMD-исполнении

С.У. Увайсов, В.В. Шеденко✉, Иванов В.С.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. В статье приведены результаты численного исследования тепловых режимов усилителя мощности СВЧ, выполненного в SMD-корпусе, направленного на оценку влияния конструктивных параметров корпуса на эффективность теплоотвода и максимальную температуру активной области кристалла. Актуальность исследования обусловлена ростом плотности рассеиваемой мощности в радиоэлектронных устройствах СВЧ диапазона, что приводит к увеличению тепловых нагрузок на полупроводниковые приборы и их корпуса. В условиях ограниченных возможностей теплоотвода стандартные конструкции корпусов типа QFN не всегда обеспечивают требуемый тепловой режим, что снижает надежность и стабильность работы усилителей мощности. Целью работы является исследование влияния конфигурации SMD-корпуса на тепловой режим усилителя мощности СВЧ диапазона и выявление конструктивных решений, обеспечивающих снижение максимальной температуры активной области кристалла при заданной рассеиваемой мощности. В работе выполнено численное исследование тепловых режимов усилителя мощности СВЧ при различных конфигурациях SMD-корпуса. На основе стационарной модели теплопереноса с использованием индуцированной модели тепловыделения получены температурные поля для ряда конструктивных вариантов корпуса. Установлены количественные зависимости между параметрами конфигурации корпуса и максимальной температурой кристалла, а также показано, что применение системы тепловых переходных отверстий и размещение металлического основания корпуса в вырезе печатной платы позволяет существенно снизить тепловое сопротивление теплового тракта. Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать конфигурацию SMD-корпуса усилителей мощности СВЧ под область активного тепловыделения конкретного кристалла с целью снижения максимальной рабочей температуры кристалла без изменения типа корпуса и технологии монтажа. Представленные результаты могут быть использованы на ранних этапах проектирования полупроводниковых приборов для сокращения числа численных и натуральных экспериментов и повышения надежности СВЧ-устройств.

Ключевые слова: усилитель мощности СВЧ, тепловой режим, SMD-корпус, тепловое моделирование, теплоперенос, тепловые переходные отверстия, корпус QFN.

Для цитирования: Увайсов С.У., Шеденко В.В., Иванов В.С. Исследование тепловых режимов усилителя мощности СВЧ диапазона в SMD-исполнении. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(5). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2314> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.016

Investigation of thermal modes of a microwave power amplifier in the SMD version

S.U. Uvaysov, V.V. Shedenko✉, V.S. Ivanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a numerical study of the thermal regimes of a microwave power amplifier housed in an SMD package, aimed at assessing the influence of the package design parameters on heat sink efficiency and the maximum temperature of the active region of the die. The relevance of the study is due to the increasing power dissipation density in microwave electronic devices,

which leads to higher thermal loads on semiconductor devices and their packages. Given the limited heat dissipation capabilities, standard QFN package designs do not always provide the required thermal regime, reducing the reliability and stability of power amplifiers. The aim of this work is to investigate the effect of the SMD package configuration on the thermal regime of a microwave power amplifier and to identify design solutions that reduce the maximum temperature of the active region of the die at a given dissipated power. A numerical study of the thermal regimes of a microwave power amplifier was performed for various SMD package configurations. Based on a steady-state heat transfer model using a specified heat dissipation model, temperature fields were obtained for several structural package variants. Quantitative relationships between package configuration parameters and the maximum die temperature are established. It is also shown that the use of thermal vias and placing the metal base of the package in a cutout of the printed circuit board can significantly reduce the thermal resistance of the heat conduction path. The obtained results enable a well-reasoned choice of the SMD package configuration for microwave power amplifiers based on the active heat dissipation area of a specific die, in order to lower the maximum operating temperature without changing the package type or mounting technology. The presented results can be used in the early stages of semiconductor device design to reduce the number of numerical and field experiments and to improve the reliability of microwave devices.

Keywords: microwave power amplifier, thermal regime, SMD package, thermal modeling, heat transfer, thermal vias, QFN package.

For citation: Uvaysov S.U., Shedenko V.V., Ivanov V.S. Investigation of thermal modes of a microwave power amplifier in the SMD version. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(5). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2314> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.016

Введение

Современное развитие радиоэлектронных систем сопровождается постоянным ростом рабочих частот, выходной мощности и степени интеграции электронных компонентов [1]. Особенно остро данные тенденции проявляются в устройствах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, таких как усилители мощности, применяемые в радиолокационных системах, средствах беспроводной связи, спутниковых коммуникациях и различных измерительных комплексах. Повышение выходной мощности СВЧ устройств приводит к значительному увеличению плотности рассеиваемой тепловой энергии в активных элементах и микросхемах [2], что существенно усложняет обеспечение требуемого теплового режима работы полупроводниковых приборов.

Температурный режим является одним из ключевых факторов, определяющих электрические параметры, долговременную стабильность и надежность работы полупроводниковых приборов [3]. Повышение температуры активных областей кристалла приводит к изменению характеристик усиления, снижению коэффициента полезного действия и ускорению процессов деградации материалов. В связи с этим при проектировании усилителей мощности особое внимание уделяется вопросам эффективного отвода тепла от кристалла к окружающей среде.

Существенную роль в формировании теплового режима интегральной микросхемы играет ее корпус [4]. Корпус обеспечивает не только механическую защиту и электрическое соединение кристалла с внешними цепями, но и является одним из основных элементов теплового тракта, по которому осуществляется передача тепловой энергии от кристалла к печатной плате и далее к окружающей среде. Поэтому выбор типа корпуса и оптимизация его конструкции имеют важное значение для обеспечения требуемых температурных режимов работы электронных устройств.

В современной микроэлектронике широкое распространение получили корпуса типа QFN (Quad Flat No-leads) [5]. Данный тип корпуса характеризуется компактными размерами, отсутствием выводов по периметру корпуса и наличием центральной металлической площадки, обеспечивающей эффективный тепловой контакт с печатной платой. Благодаря этим особенностям корпуса QFN широко применяются в различных высокочастотных и силовых микросхемах, включая усилители мощности СВЧ диапазона.

Несмотря на достаточно высокую эффективность теплоотвода, при работе мощных СВЧ устройств стандартная конструкция корпуса QFN не всегда обеспечивает требуемые температурные параметры. При увеличении рассеиваемой мощности кристалла тепловое сопротивление корпуса и печатной платы может приводить к существенному росту температуры корпуса и кристалла. В таких условиях возникает необходимость оптимизации геометрических параметров корпуса, конструкции его основания и условий теплового контакта с печатной платой.

Одним из перспективных способов улучшения теплоотвода является модификация конструкции основания корпуса и печатной платы, направленная на сокращение теплового пути между кристаллом и теплоотводящей структурой. В частности, интерес представляет вариант конструктивного исполнения, при котором металлическое основание корпуса частично размещается в специальном вырезе печатной платы. Такое решение потенциально позволяет уменьшить тепловое сопротивление между корпусом и платой и тем самым снизить температуру корпуса при заданной тепловой мощности.

Для оценки эффективности подобных конструктивных решений широко применяются методы численного моделирования тепловых процессов [6]. Современные системы автоматизированного проектирования позволяют создавать детализированные трехмерные модели корпусов и печатных плат, а также проводить расчет распределения температуры с учетом теплопроводности материалов, тепловыделения активных элементов и граничных условий теплообмена.

Целью настоящей работы является исследование тепловых режимов корпуса типа QFN [7], предназначенного для размещения кристалла усилителя мощности СВЧ диапазона, а также определение конструктивных параметров корпуса и печатной платы, обеспечивающих температуру корпуса ниже 70 °С при комнатной температуре окружающей среды. Для достижения поставленной цели разработана трехмерная тепловая модель системы «кристалл – корпус – печатная плата» (Рисунок 1) и выполнено численное моделирование тепловых процессов в программной среде SolidWorks Simulation [8].

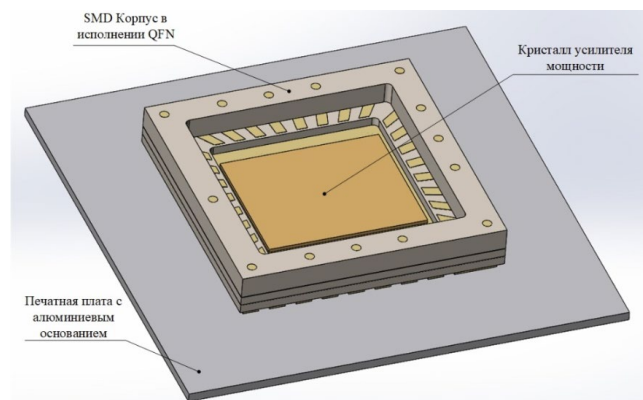


Рисунок 1 – Модель системы «кристалл-корпус-печатная плата»
 Figure 1 – The model of the "crystal-housing-printed circuit board" system

Проведено исследование влияния геометрических параметров корпуса и конструкции основания на распределение температуры в рассматриваемой системе.

Материалы и методы

Объектом исследования является усилитель мощности СВЧ, выполненный в SMD-корпусе и предназначенный для поверхностного монтажа на печатную плату. Усилитель включает полупроводниковый кристалл, установленный на центральной тепловой площадке корпуса, а также систему теплопроводящих элементов, обеспечивающих отвод тепла от кристалла к основанию корпуса и далее к металлической печатной плате. Рассматриваемый корпус относится к классу малогабаритных SMD-корпусов, применяемых в СВЧ-устройствах с повышенной плотностью рассеиваемой мощности.

Тепло отводится от активной области кристалла через корпус усилителя и далее через печатную плату в окружающую среду. Корпус устанавливается на металлическую печатную плату, выполненную из алюминия. Толщина печатной платы составляет 1,5 мм. Для улучшения условий теплоотвода рассматривается вариант конструкции, при котором в печатной плате выполняется технологический вырез, позволяющий частично разместить металлическое основание корпуса внутри платы. Такое конструктивное решение потенциально позволяет уменьшить тепловое сопротивление между корпусом и платой за счет сокращения длины теплового пути и увеличения площади теплового контакта. Теплообмен с окружающей средой за счет конвекции и излучения задан в виде граничных условий на внешних поверхностях модели.

Работа усилителя мощности СВЧ-диапазона сопровождается интенсивным тепловыделением в активной области полупроводникового кристалла. При стационарном режиме работы тепловой процесс в системе «кристалл – корпус – печатная плата» может быть описан уравнением 1 теплопроводности в дифференциальной форме [9]:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v = 0, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, T – температура, q_v – объемная плотность тепловыделения.

Для кристалла тепловыделение задается по следующей формуле (в расчетной модели задано значение тепловой мощности 3,5 Вт):

$$q_v = \frac{V_{кр}}{P_{тепл}}, \quad (2)$$

где $P_{тепл}$ – тепловая мощность, рассеиваемая кристаллом, $V_{кр}$ – объем кристалла.

Эквивалентное тепловое сопротивление конструкции [10] может быть представлено в виде суммы последовательных составляющих:

$$R_{th} = R_{кр-пл} + R_{подл} + R_{via} + R_{пл} + R_{плата}, \quad (3)$$

где $R_{кр-пл}$ – эквивалентное тепловое сопротивление перехода «кристалл-подложка», $R_{подл}$ – эквивалентное тепловое сопротивление подложки, R_{via} – эквивалентное тепловое сопротивление тепловых переходных отверстий, $R_{пл}$ – эквивалентное тепловое сопротивление тепловой площадки корпуса QFN, $R_{плата}$ – эквивалентное тепловое сопротивление металлической печатной платы. В расчетной модели эквивалентное тепловое сопротивление кристалла составляет 5 К/Вт.

В стационарном режиме максимальная температура кристалла определяется суммарным тепловым сопротивлением конструкции:

$$T_{max} = T_{окр} + P_{тепл} \cdot R_{th}, \quad (4)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), R_{th} – эквивалентное тепловое сопротивление пути «кристалл – окружающая среда».

Таким образом, основная задача теплового проектирования сводится к минимизации эквивалентного теплового сопротивления конструкции за счет оптимизации геометрии корпуса и используемых материалов.

Теплоперенос в материалах корпуса, кристалла и печатной платы рассматривается как изотропный, а теплофизические параметры материалов принимаются постоянными и не зависящими от температуры в исследуемом диапазоне. Контактное тепловое сопротивление между элементами конструкции в модели не учитывается и считается пренебрежимо малым, что соответствует условию идеального теплового контакта.

Для расчетной модели была сформирована детализированная конечно-элементная сетка, изображенная на Рисунке 2, с повышенным коэффициентом локального измельчения в зонах повышенного тепловыделения:

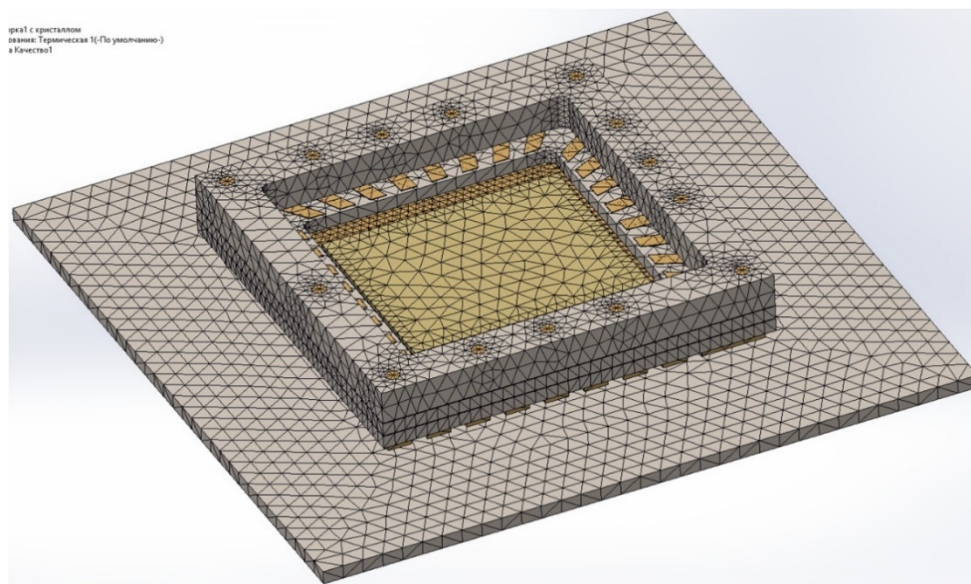


Рисунок 2 – Сформированная конечно-элементная сетка модели
 Figure 2 – Formed finite element grid of the model

Прямое моделирование распределенного тепловыделения в активной области транзисторных структур кристалла требует использования расчетной сетки с характерным размером элементов порядка долей микрометра, что приводит к резкому росту вычислительных затрат. В связи с этим в работе используется индуцированная модель тепловыделения, при которой активная область кристалла заменяется эквивалентной областью с усредненной плотностью тепловыделения.

Рассеиваемая усилителем тепловая мощность прикладывается к активным зонам, расположенным в объеме кристалла арсенида галлия (GaAs). Для детального моделирования теплоотвода от рНЕМТ-транзисторов в составе общей сборки была создана вспомогательная деталь гребенчатой структуры, расположенная в объеме кристалла. Тепловыделение в данной области задавалось в виде эквивалентного объемного источника, расположенного в активном слое на глубине $0,2\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$. Такие геометрические параметры соответствуют зоне формирования двумерного электронного газа (2DEG) и области максимальной плотности тока [11]. Данная аппроксимация обеспечивает учет высоких градиентов тепловых потоков и плотности мощности без

избыточной детализации микромасштабной гребенчатой топологии затворных секций прибора.

На основе результатов моделирования тепловыделения в активных областях транзисторов определяется эквивалентное тепловое сопротивление кристалла. На следующем этапе анализа системы «кристалл – корпус – печатная плата» тепловыделение задается в виде полной тепловой мощности, распределенной по всему объему кристалла. При этом локальное тепловое взаимодействие кристалла с основанием учитывается путем введения рассчитанного теплового сопротивления в области их контакта.

При численном моделировании тепловых режимов электронных устройств одной из ключевых задач является корректное задание граничных условий теплообмена между элементами конструкции и окружающей средой. В реальных условиях электронные модули часто устанавливаются на массивные металлические основания, радиаторы или элементы корпуса аппаратуры, которые обладают значительно большей тепловой емкостью и теплопроводностью по сравнению с печатной платой и корпусом микросхемы.

Прямое моделирование радиатора с учетом его геометрии, теплофизических свойств материала и условий теплообмена с окружающей средой существенно усложняет расчетную модель и приводит к значительному увеличению вычислительных затрат. В связи с этим в задачах теплового моделирования широко применяется эквивалентное представление радиатора в виде граничного условия теплообмена с повышенным коэффициентом конвективной теплоотдачи.

Физическое обоснование такого подхода следует из закона теплообмена Ньютона:

$$q = h(T_s - T_a), \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, h – коэффициент теплоотдачи, T_s – температура поверхности, T_a – температура окружающей среды.

При увеличении коэффициента теплоотдачи величина температурной разности между поверхностью и окружающей средой уменьшается. В предельном случае при $h \rightarrow \infty$ граничное условие конвекции переходит в изотермическое условие $T_s = T_a$, что соответствует контакту поверхности с идеальным теплоотводом бесконечной теплопроводности. Применение коэффициентов теплоотдачи порядка $10^3 - 10^4$ Вт/(м²×К) обеспечивает учет влияния массивного радиатора. Использование данного граничного условия на тыльной стороне печатной платы позволяет исключить из расчетной модели геометрическое описание системы охлаждения без потери точности расчета распределения температур.

Подобный методический подход является общепринятым в задачах термического анализа электронных модулей. Его применение обеспечивает сокращение размерности расчетной сетки и экономию вычислительных затрат при сохранении достоверности учета влияния внешних теплоотводящих конструкций на температурное поле исследуемой системы.

В настоящей работе для оценки влияния условий теплоотвода рассмотрены два варианта граничных условий. В первом случае задавалась естественная конвекция воздуха с коэффициентом теплоотдачи $h = 15$ Вт/(м²×К), соответствующая охлаждению печатной платы при свободной циркуляции воздуха.

Во втором случае использовалось граничное условие интенсивного теплоотвода, задаваемое повышенным коэффициентом теплоотдачи $h = 5000$ Вт/(м²×К). Данное

условие соответствует тепловому контакту печатной платы с массивным металлическим радиатором или корпусом устройства.

Результаты и обсуждение

Распределение температурного поля для базовой конфигурации корпуса, включающей 25 тепловых переходных отверстий диаметром 0,3 мм, представлено на Рисунке 3.

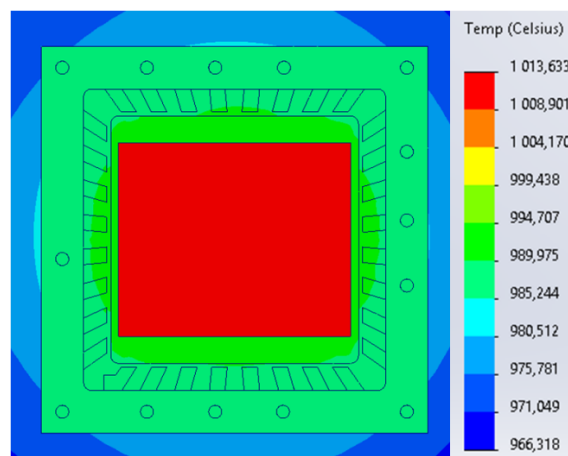


Рисунок 3 – Распределение температурного поля для базовой конфигурации при естественной конвекции

Figure 3 – Distribution of the temperature field for the basic configuration under natural convection

Расчёт с учетом только естественной конвекции показывает крайне высокие значения температуры корпуса и печатной платы. Это связано с низким коэффициентом теплоотдачи при естественной конвекции и ограниченной площадью теплообмена. Полученные значения температур существенно превышают реальные эксплуатационные температуры и указывают на необходимость применения эффективных теплоотводящих конструкций.

Распределение температурного поля для базовой конфигурации корпуса (25 тепловых переходных отверстий с диаметром 0,3 мм) с применением математической модели теплоотвода представлено на Рисунке 4.

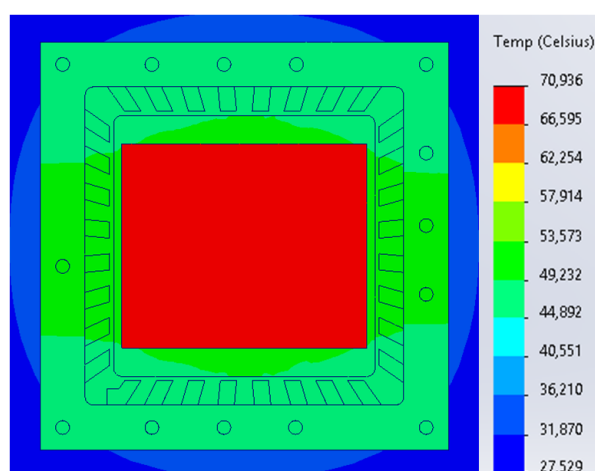


Рисунок 4 – Распределение температурного поля для базовой конфигурации корпуса

Figure 4 – Temperature field distribution for the basic housing configuration

Результаты численного моделирования показали, что для базовой конфигурации корпуса при заданных параметрах теплоотвода максимальная температура корпуса составляет 70,94 °С при температуре окружающей среды 25 °С и тепловой мощности кристалла 3,5 Вт. Полученное значение незначительно превышает целевой уровень температуры 70 °С, принятый в работе в качестве критерия обеспечения требуемого теплового режима. Тем не менее данный результат показывает, что базовая конструкция корпуса работает на пределе допустимого теплового режима и обладает ограниченным запасом по температуре. Это обстоятельство подтверждает необходимость дальнейшей оптимизации конструкции корпуса и печатной платы с целью снижения эквивалентного теплового сопротивления системы. Дальнейшее снижение температуры может быть обеспечено за счет увеличения толщины тепловой площадки, применения дополнительных тепловых переходных отверстий, а также модификации конструкции основания корпуса. Указанные варианты рассмотрены в последующих конфигурациях исследования.

На Рисунке 5 представлена конфигурация корпуса с увеличенным диаметром тепловых переходных отверстий. В данной конфигурации количество тепловых отверстий остается равным 25, однако их диаметр увеличен до 0,5 мм. Увеличение диаметра отверстий приводит к росту площади теплопроводящего металлического канала, соединяющего верхнюю тепловую площадку корпуса с нижними слоями печатной платы.

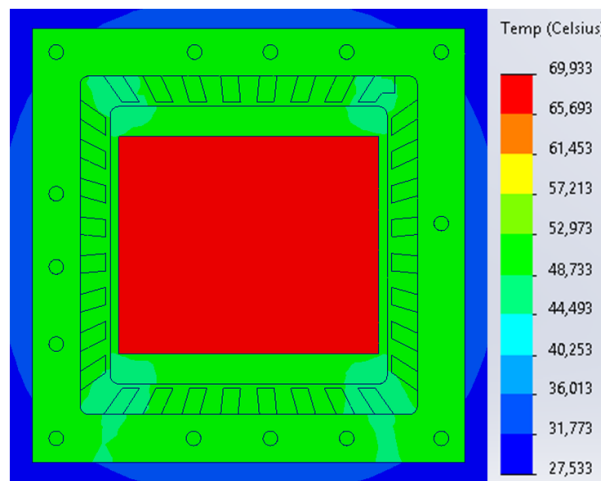


Рисунок 5 – Распределение температурного поля для конфигурации с увеличенным диаметром тепловых переходных отверстий

Figure 5 – Temperature field distribution for a configuration with increased diameter of thermal vias

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что увеличение диаметра тепловых переходных отверстий приводит к снижению максимальной температуры корпуса до 69,93 °С.

В следующей конфигурации исследуется влияние увеличения количества тепловых переходных отверстий в области тепловой площадки корпуса. Диаметр отверстий соответствует базовой конструкции, при этом их число составляет 49.

Результаты численного моделирования показывают, что увеличение количества тепловых отверстий приводит к дополнительному снижению температуры корпуса до 70,32 °С (Рисунок 6).

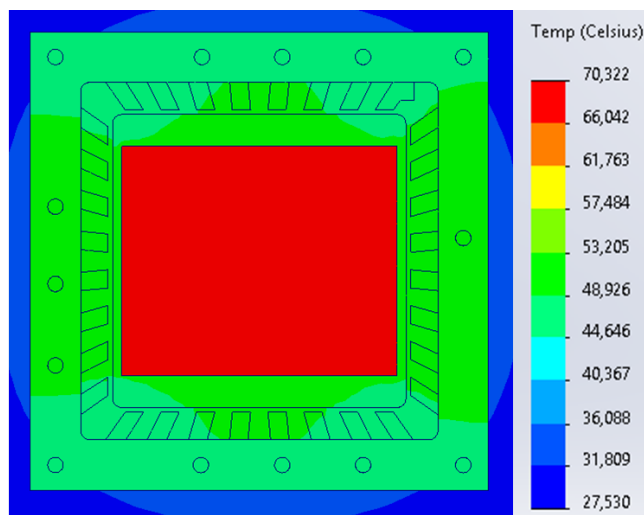


Рисунок 6 – Распределение температурного поля для конфигурации с увеличенным количеством тепловых переходных отверстий
Figure 6 – Temperature field distribution for a configuration with an increased number of thermal vias

На Рисунке 7 представлена конфигурация корпуса с увеличением толщины металлического основания с 0,1 мм до 0,5 мм. Максимальная температура корпуса в этой конфигурации составила 70,25 °С.

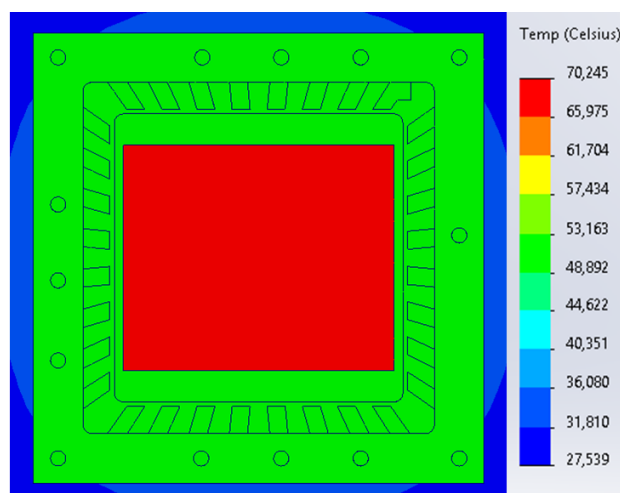


Рисунок 7 – Распределение температурного поля для конфигурации с увеличенной толщиной основания корпуса
Figure 7 – Distribution of the temperature field for a configuration with an increased thickness of the housing base

На Рисунке 8 представлена конфигурация корпуса с утолщенной центральной тепловой площадкой, которая проходит через вырез в металлической печатной плате и обеспечивает непосредственный тепловой контакт с теплоотводом. В данном случае участок теплового тракта, проходящий через материал печатной платы, заменяется более теплопроводным материалом основания корпуса. Это приводит к уменьшению теплового сопротивления системы за счет увеличения эффективной теплопроводности теплового пути. В результате рассматриваемая конфигурация демонстрирует наибольшую эффективность теплоотвода: температура корпуса по результатам

моделирования снижается до 68,47 °С, что является минимальным значением среди исследованных вариантов.

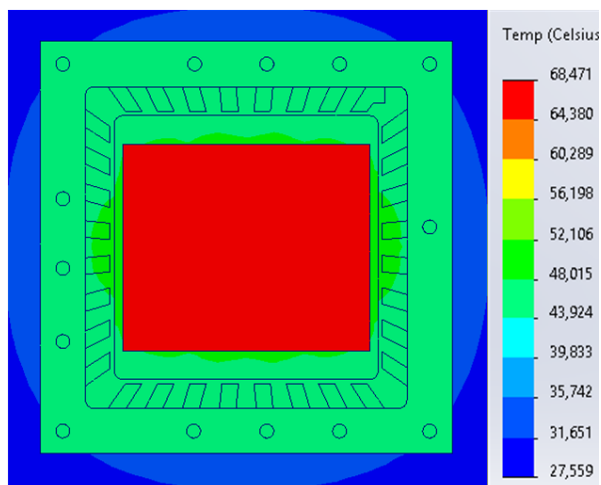


Рисунок 8 – Распределение температурного поля в модели корпуса с утолщённой центральной тепловой площадкой, проходящей через вырез в металлической печатной плате
 Figure 8 – Distribution of the temperature field in a housing model with a thickened central heat pad passing through a cutout in a metal printed circuit board

Аналитически снижение температуры для конфигурации с утолщенной центральной тепловой площадкой объясняется уменьшением эквивалентного теплового сопротивления конструкции. В базовой конфигурации тепловой поток передается от основания корпуса к теплоотводу через материал печатной платы, что приводит к появлению дополнительного теплового сопротивления $R_{плата}$. В рассматриваемой конфигурации центральная тепловая площадка проходит через вырез в печатной плате и обеспечивает непосредственный тепловой контакт с теплоотводом. В результате вклад теплового сопротивления печатной платы в общее тепловое сопротивление конструкции уменьшается, а эквивалентное тепловое сопротивление системы определяется выражением:

$$R_{th,new} = R_{th} - R_{плата}, \quad (6)$$

где $R_{th,new}$ – эквивалентное тепловое сопротивление конструкции без учета теплового сопротивления печатной платы.

Максимальная температура кристалла для конфигурации корпуса с утолщенной центральной тепловой площадкой определяется выражением:

$$T_{max,new} = T_{окр} + P_{тепл} \cdot R_{th,new}, \quad (7)$$

Следовательно, уменьшение теплового сопротивления приводит к снижению температуры кристалла согласно выражению:

$$\Delta T = P_{тепл} \cdot R_{плата}. \quad (8)$$

Полученные результаты численного моделирования подтверждают данное аналитическое предположение и показывают, что уменьшение теплового сопротивления участка «корпус – печатная плата – теплоотвод» является основным фактором снижения температуры для рассматриваемой конфигурации корпуса.

В результате численного моделирования получены стационарные температурные поля для усилителя мощности СВЧ при различных конфигурациях SMD-корпуса. Для

всех вариантов расчета рассеиваемая мощность и граничные условия оставались неизменными, что обеспечило корректность сравнительного анализа.

В качестве базовой была рассмотрена конфигурация SMD-корпуса с минимальным числом теплопроводящих элементов, соответствующая типовым конструктивным решениям. Расчет показал, что максимальная температура формируется в области, соответствующей расположению кристалла, при этом наблюдается выраженный температурный градиент в направлении центральной тепловой площадки корпуса.

При увеличении числа тепловых переходных отверстий и изменении их пространственного расположения наблюдается перераспределение температурного поля в корпусе. Тепловой поток более равномерно распространяется по объему тепловой площадки, что приводит к снижению локальных температурных максимумов в кристалле.

Температурные поля для различных конфигураций корпуса демонстрируют, что не только количество, но и геометрическое расположение теплопроводящих элементов оказывает существенное влияние на характер теплопереноса в системе «кристалл – корпус – печатная плата».

Для количественной оценки эффективности различных конфигураций корпуса в качестве основного критерия использовалась максимальная температура кристалла. Для всех рассмотренных вариантов были определены значения максимальной температуры, а также относительное снижение температуры по сравнению с базовой конфигурацией.

Результаты расчетов показывают, что оптимизированные конфигурации корпуса обеспечивают снижение максимальной температуры кристалла на величину, сопоставимую с эффектом от изменения теплофизических параметров материалов, при этом не требуют изменения типа корпуса или технологии монтажа. Полученные данные подтверждают возможность целенаправленного улучшения теплового режима усилителя мощности СВЧ за счет конструктивной параметризации SMD-корпуса.

На Рисунке 9 представлена зависимость температуры корпуса от конфигурации конструкции. Наибольший эффект снижения температуры достигается при использовании конфигурации с тепловой площадкой, проходящей через печатную плату и обеспечивающей непосредственный тепловой контакт с теплоотводом.

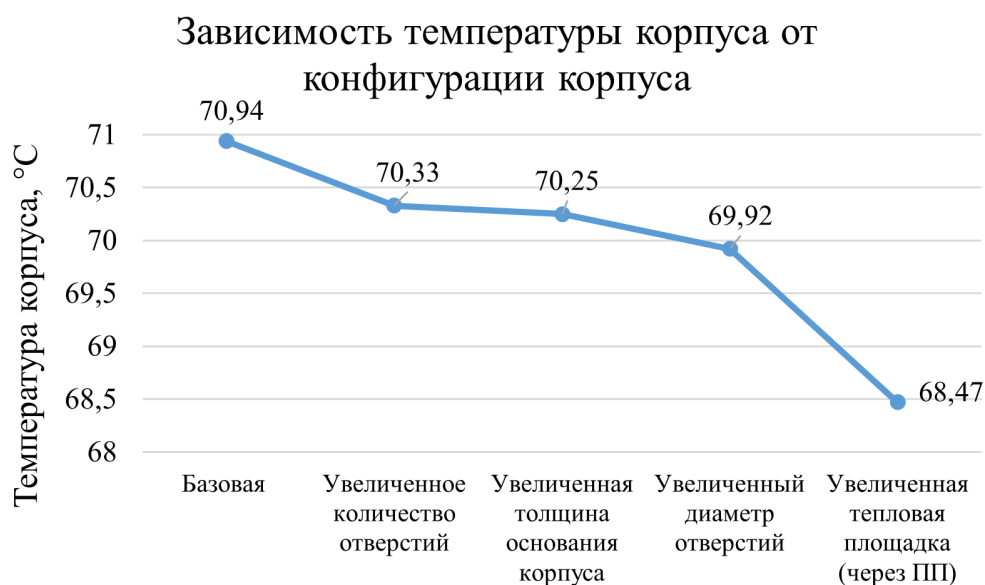


Рисунок 9 – Зависимость температуры корпуса от конфигурации корпуса
Figure 9 – Dependence of housing temperature on housing configuration

Полученные результаты численного моделирования показывают, что конфигурация SMD-корпуса оказывает существенное влияние на тепловой режим усилителя мощности СВЧ даже при неизменных значениях рассеиваемой мощности и теплофизических параметров материалов. Снижение максимальной температуры кристалла при оптимизированных конфигурациях корпуса обусловлено перераспределением тепловых потоков и формированием более эффективных теплопроводящих каналов в направлении печатной платы.

Сопоставление полученных результатов с данными, представленными в работе Wang H., Zhang Y., Li X. [4], показывает, что в известных исследованиях основное внимание уделяется оптимизации количества тепловых переходных отверстий и геометрии тепловой площадки корпуса QFN. В отличие от указанных работ, в настоящем исследовании рассмотрена конфигурация корпуса с утолщенной центральной тепловой площадкой, проходящей через вырез в металлической печатной плате и обеспечивающей непосредственный тепловой контакт с теплоотводом. Показано, что применение данной конструкции позволяет дополнительно снизить температуру корпуса до 68,27 °С, что на 2,47 °С ниже по сравнению с базовой конфигурацией корпуса.

Результаты относятся к стационарным тепловым режимам СВЧ усилителей мощности, при которых теплоперенос определяется преимущественно теплопроводностью, а вклад конвективного и радиационного теплообмена незначителен. Показано, что конфигурация корпуса может рассматриваться как самостоятельный параметр проектирования, позволяющий улучшить тепловой режим без изменения схемотехнических решений и технологии монтажа.

Заключение

Проведено численное исследование тепловых режимов СВЧ усилителя мощности в SMD-корпусе с учетом теплового взаимодействия элементов системы «кристалл – корпус – печатная плата». Моделирование позволило выявить влияние конструктивных параметров корпуса на максимальную температуру активной области кристалла.

Установлено, что конфигурация теплопроводящих элементов корпуса существенно влияет на распределение температурного поля. Наиболее выраженный эффект достигается при использовании конструкции с утолщенной центральной тепловой площадкой, обеспечивающей непосредственный тепловой контакт с теплоотводом. Снижение температуры обусловлено уменьшением суммарного теплового сопротивления теплового тракта «кристалл – корпус – печатная плата – теплоотвод» за счет исключения части теплового тракта, проходящего через материал печатной платы, что приводит к снижению максимальной температуры корпуса.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании SMD-корпусов СВЧ усилителей мощности с учетом условий охлаждения. Предложенные конструктивные решения позволяют улучшить тепловой режим без изменения схемотехнических решений, типа корпуса и технологии монтажа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Qin Y., Albano B., Spencer J., et al. Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: a review and perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2023;56(9). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acb4ff>
2. Rao X., Huang K., Wu Y.-P., Zhang H., Xiao Ch. Analysis of ballistic thermal resistance in FinFETs considering Joule heating effects. *Micro and Nanostructures*. 2025;201. <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2025.208113>

3. Belguith M., Eloued S., Kadi M., Slama J.B.H., Hamouda M. A review of thermal management techniques adopted for high-power-density GaN-based converters. *Chips*. 2026;5(1). <https://doi.org/10.3390/chips5010004>
4. Yuan Z., Ding D., Zhang W. Effect of thermal via design on heat dissipation of high-lead QFN packages mounted on PCB. *Applied Sciences*. 2023;13(23). <https://doi.org/10.3390/app132312653>
5. Hollstein K., Yang X., Weide-Zaage K. Thermal analysis of the design parameters of a QFN package soldered on a PCB using a simulation approach. *Microelectronics Reliability*. 2021;120. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114118>
6. Paret P., Moreno G., Kekelia B., et al. Thermal and thermomechanical modeling to design a gallium oxide power electronics package. In: *2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 31 October – 02 November 2018, Atlanta, USA*. IEEE; 2018. P. 287–294. <https://doi.org/10.1109/WiPDA.2018.8569139>
7. Bill C.J., Hu B., Lin M., et al. Advanced QFN packaging for low cost and solution. In: *2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 16–19 August 2010, Xi'an, China*. IEEE; 2010. P. 45–49. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2010.5582373>
8. Peng Y. Research of thermal analysis collaboratively using ANSYS Workbench and SolidWorks Simulation. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;127:262–266. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.127.262>
9. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2011. 1048 p.
10. Lasance C.J.M., Vinke H., Rosten H. Thermal characterization of electronic devices with boundary condition independent compact models. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*. 1995;18(4):723–731. <https://doi.org/10.1109/95.477457>
11. Meneghesso G., Verzellesi G., Danesin F., et al. Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: State of the art and perspectives. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2008;8(2):332–343. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2008.923743>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: uvajsov@mirea.ru
ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

Saygid U. Uvaysov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Шеденко Владимир Вячеславович, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: shedenkovv@mail.ru
ORCID: [0009-0007-2833-6277](https://orcid.org/0009-0007-2833-6277)

Vladimir V. Shedenko, Assistant at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Иванов Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: ivanov_vs@mirea.ru
ORCID: [0000-0001-9827-1690](https://orcid.org/0000-0001-9827-1690)

Vyacheslav S. Ivanov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 13.05.2026; accepted for publication 21.05.2026.