УДК 519.853:536.2:539.3

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООТВОДЯЩЕГО КОРПУСА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Новокшенов А.Д.[1], Карчевская А.С.[1], Матвеева А.И.[1], Боровков А.И.[1], Щербаков С.С.[2,3], Подгайская Д.А.[3], Мендель А.В.[3]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, karchevskaya_as@spbstu.ru

[2]Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

[3]Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация: исследован фланцевый корпус GaN-on-SiC-транзистора при импульсном нагреве 1 мс с периодом 10 мс. Нестационарная топологическая оптимизация объединяет конечно-элементный термомеханический расчет, сопряженные производные и ограничения на перегрев и напряжения. При лимитах 60 К и 60 МПа масса оптимизируемой области снизилась с 0,198 до 0,020 г/мм. Стационарный проект при проверке в импульсном режиме превысил ограничения на 26 % по перегреву и 11 % по напряжениям. Результат показывает необходимость учитывать временную структуру нагрева.

Ключевые слова: топологическая оптимизация; СВЧ-корпус; импульсный нагрев; термоупругость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Фланец мощного GaN-прибора одновременно отводит тепло от кристалла и воспринимает механические нагрузки. Уменьшение его массы ограничено допустимым перегревом и прочностью тепловых и силовых путей. В задачах охлаждения электронных корпусов топологическая оптимизация позволяет перераспределять материал с учетом термомеханического отклика [1]; для радиочастотных усилителей она применяется и при проектировании теплоотводов [2].

При импульсном питании температура кристалла и напряжения в корпусе зависят от длительности импульса и паузы между импульсами. Подложка и паяный слой реагируют быстрее массивного фланца; поэтому одинаковая средняя мощность не задает одинаковые пиковые температуры и температурные градиенты. Проект, рассчитанный только по стационарной средней мощности, может нарушить ограничения при проверке в рабочем цикле. Для оценки такого риска требуется нестационарная тепловая модель, связанная с расчетом напряжений.

Плотностная топологическая оптимизация на основе SIMP задает распределение материала в расчетной области [3]. Термоупругие постановки учитывают воздействие температурного поля на напряженное состояние [4], в том числе при совместных ограничениях на напряжения и температуру [5]. Исследования переходного термомеханического отклика [6], нестационарных тепловых нагрузок при ограничении напряжений [7] и зависящих от времени воздействий [8] показывают необходимость учитывать историю нагрева. При этом многократное интегрирование по времени увеличивает стоимость оптимизации [9].

В настоящей работе минимизируется масса фланцевого корпуса GaN-on-SiC-транзистора при импульсном нагреве с одновременным контролем перегрева кристалла и напряжений во фланце. Для каждого распределения материала вычисляется квазипериодический термомеханический отклик; производные ограничений определяются сопряженным методом, а плотности обновляются методом скользящих асимптот [10]. Сопоставление с вариантом, рассчитанным по средней мощности, позволяет оценить влияние временной структуры нагрузки на допустимость конструкции.

II. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Использована двумерная модель половины продольного сечения фланцевого корпуса GaN-on-SiC-транзистора в условиях плоской деформации (рисунок 1). Кристалл размером 3,2 × 0,1 мм соединен слоем припоя AuSn толщиной 50 мкм с фланцем CuMo размером 17,4 × 1,5 мм. Из области оптимизации исключены пьедестал под кристаллом, крепежная площадка и контактная подошва. Масса сплошной оптимизируемой области равна 0,198 г/мм, всего фланца – 0,261 г/мм.

На кристалл действует тепловой поток 9,77 МВт/м², соответствующий мощности 25 Вт во время импульса. Базовый режим: импульс 1 мс, период 10 мс; контактная теплопроводимость подошвы с шасси составляет $5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К). Ограничения заданы по максимумам перегрева кристалла 60 К и напряжений Мизеса во фланце 60 МПа.

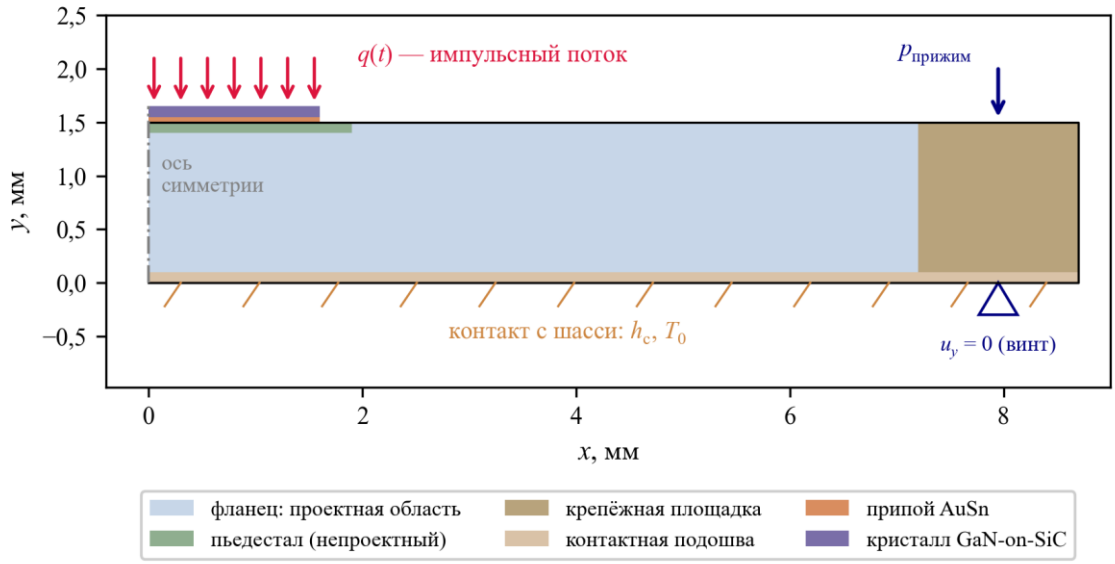


Рисунок 1. Расчетная схема корпуса, области материала, тепловые и механические граничные условия

Плотность материала интерполируется методом SIMP. Для каждого варианта вычисляется квазипериодическое температурное поле и квазистатический упругий отклик. Максимумы по расчетному циклу сглаживаются степенными нормами; дискретные сопряженные уравнения дают производные целевой функции и ограничений. Плотности обновляются методом скользящих асимптот. Стационарный расчет при средней мощности 2,5 Вт используется как контрольное сравнение.

Различие характерных времен объясняет необходимость переходной модели. Тепловая диффузия через подложку SiC толщиной 0,1 мм занимает около 0,06 мс, тогда как для фланца толщиной 1,5 мм характерное время достигает примерно 35 мс. Подложка успевает отреагировать в течение импульса 1 мс, но весь фланец не приходит к равновесию даже за период 10 мс. Поэтому одинаковая средняя мощность не задает одинаковые локальные пики температуры и напряжений.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Тепловой и упругий блоки проверены на аналитических задачах: ошибка интегральных характеристик не превысила 0,2 %, локального коэффициента концентрации – 0,7 %. Сопряженные производные согласовались с центральными конечными разностями с относительным расхождением менее 10^{-7}. Уточнение сетки и шага по времени изменило основные показатели оптимума на единицы процентов (рисунок 2).

При совместных ограничениях оптимизируемая область облегчена на 90 %: с 0,198 до 0,020 г/мм. Масса всего фланца снизилась с 0,261 до 0,083 г/мм. Материал сосредоточен в колоннах под кристаллом и подошве, обеспечивающих силовую и тепловую связность. При этом напряжения в припое и кристалле выросли; они не входили в заданные ограничения и требуют отдельного контроля.

Стационарная оптимизация дала более легкий вариант, но его нестационарная проверка показала перегрев 75,67 К и напряжения 66,66 МПа – превышение лимитов на 26 и 11 %. При одинаковой средней мощности изменение периода с 1 до 30 мс изменило оптимальную массу в 1,84 раза. Следовательно, средняя мощность не заменяет импульсную историю нагрузки.

Оптимальная структура использует сужающиеся колонны под кристаллом и контактную подошву: колонны образуют короткие силовые и теплопроводные пути, а подошва распределяет поток по контакту с шасси. Удаление материала между колоннами уменьшает массу, но усиливает локальную неоднородность жесткости. Поэтому температурное и прочностное ограничения оказываются одновременно активными. Контрольный расчет на уточненных сетках дал 57,85–60,08 МПа и 58,13–60,46 К, что показывает чувствительность результата к дискретизации вблизи заданных лимитов.

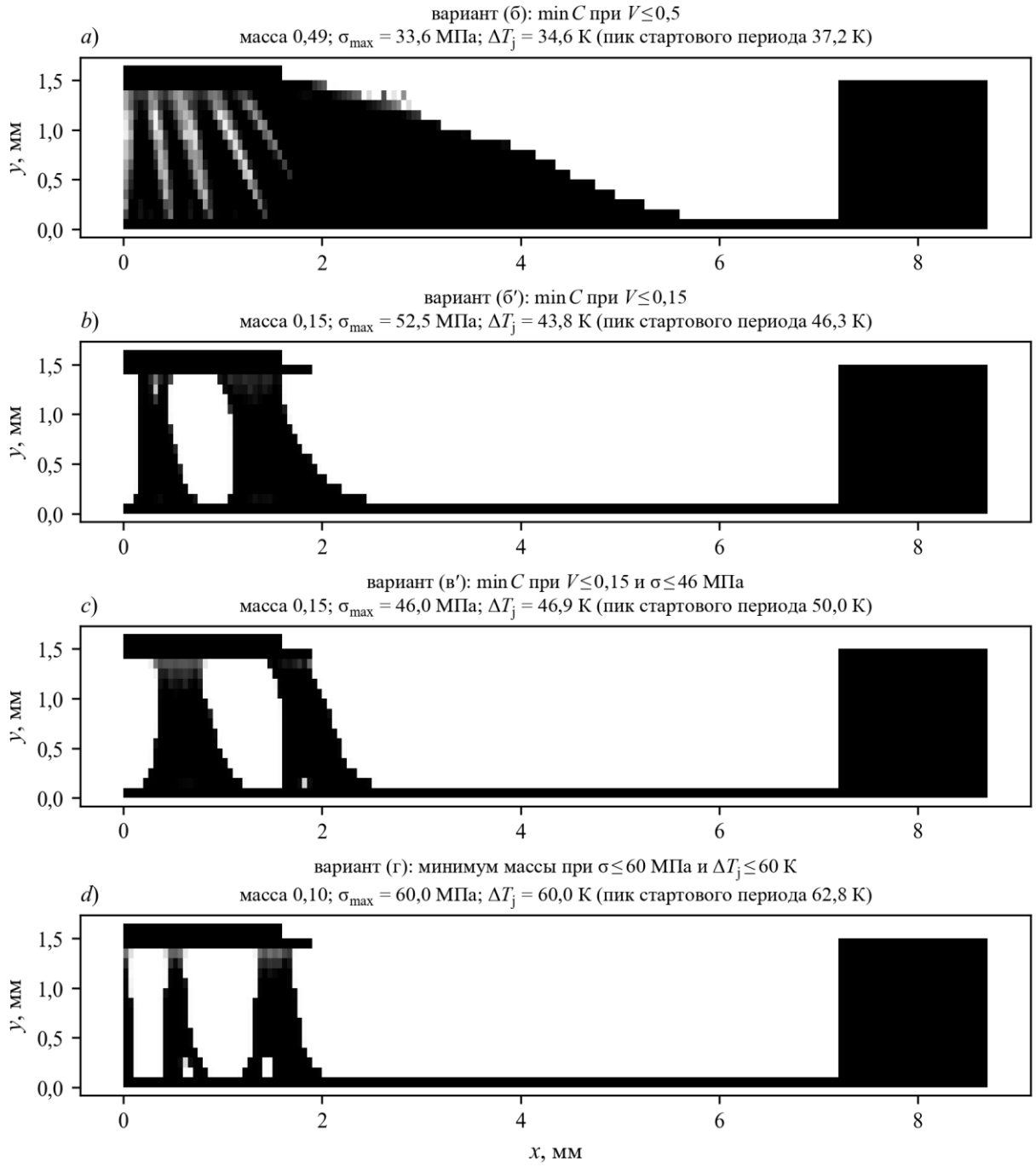


Рисунок 2. Распределение материала в вариантах оптимизации; нижний вариант учитывает совместные ограничения по напряжениям и перегреву

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нестационарная постановка позволила уменьшить массу фланца при совместном контроле перегрева и напряжений в самом фланце. Для перехода к рабочему изделию необходимы трехмерная проверка, учет напряжений в припое и кристалле, технологической предыстории пайки и температурной зависимости свойств.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» в рамках договора № 25-РБ-09-16, а также при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор Т26СПбГ-004).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Farzinazar S., Ren Z., Lim J., Kim J.C., Lee J. Thermomechanical topology optimization of three-dimensional heat guiding structures for electronics packaging // Journal of Electronic Packaging. 2022. Vol. 144, No. 2. Article 021118.

[2] Xiang H., Fu J., Shang Y., Inserra D., Guo R., Wen G. Fast heatsink topology optimization for RF power amplifier chip heat dissipation enhancement // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2025. Vol. 15, No. 9. P. 1953–1963.

[3] Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin: Springer, 2003. DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6.

[4] Gao T., Zhang W. Topology optimization involving thermo-elastic stress loads // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 42, No. 5. P. 725–738. DOI: 10.1007/s00158-010-0527-5.

[5] Meng Q., Xu B., Wang C., Zhao L. Thermo-elastic topology optimization with stress and temperature constraints // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2021. Vol. 122, No. 12. P. 2919–2944.

[6] Ogawa S., Yamada T. Topology optimization for transient thermomechanical coupling problems // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 109. P. 536–554.

[7] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2023. Vol. 66, No. 1. Article 9.

[8] Guo Y., Cheng S., Wang Y., Lai X., Chen L. Topology optimization for transient thermoelastic structures under time-dependent loads // Engineering Computations. 2024. Vol. 40, No. 3. P. 1677–1693.

[9] Theulings M.J.B., Maas R., Noël L., van Keulen F., Langelaar M. Reducing time and memory requirements in topology optimization of transient problems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2024. Vol. 125, No. 14. Article e7461.

[10] Svanberg K. The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1987. Vol. 24, No. 2. P. 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A HEAT DISSIPATING MICROWAVE PACKAGE UNDER PULSED THERMOMECHANICAL LOADS

A. Novokshenov[1], A. Karchevskaia[1], A. Borovkov[1], A. Matveeva[1], S. Sherbakov[2,3], D. Podgayskaya[3], A. Mendel[3]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, novoksh_ad@spbstu.ru

[2]National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

[3]Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract: a flanged GaN-on-SiC transistor package is optimized under 1 ms heat pulses with a 10 ms period. Transient finite element analysis, discrete adjoint sensitivities, and stress and die-overheat constraints are combined with topology optimization. At limits of 60 MPa and 60 K, the optimization-domain mass decreased from 0.198 to 0.020 g/mm. A design optimized for average steady power exceeded the pulsed limits by 26% in overheat and 11% in stress. The results show that pulse timing must be represented explicitly in package design.

Keywords: topology optimization; microwave package; pulsed heating; thermoelasticity.