



高功率微波作用下三维结构中多物理场耦合过程仿真方法研究综述

张浩轩, 王寅达, 王一尧, 白容川, 陈哲, 李谭毅, 王大伟, 王卫杰, 谢浩, 赵振国, 詹启伟, 周海京, 周亮, 尹文言

Review of simulation method of multiphysics coupling process in three-dimensional structures under high power microwave action

ZHANG Haoxuan, WANG Yinda, WANG Yiyao, BAI Rongchuan, CHEN Zhe, LI Tanyi, WANG Dawei, WANG Weijie, XIE Hao, ZHAO Zhenguo, ZHAN Qiwei, ZHOU Haijing, ZHOU Liang, and YIN Wenyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率微波效应的多物理场建模方法研究

Multi-physics modeling method of high power microwave effect

电波科学学报. 2020, 35(1): 93-105

过孔转换信号完整性分析的区域分解有限元法

A domain decomposition finite-element method for signal integrity analysis of via transition

电波科学学报. 2019, 34(4): 467-472

电磁计算方法研究进展综述

Progress in computational electromagnetic methods

电波科学学报. 2020, 35(1): 13-25

基于CFS-PML的高阶有限元在地质雷达数值模拟中的应用研究

Application research on CFS-PML-based high-order finite element method in GPR numerical simulation

电波科学学报. 2022, 37(5): 837-843

1D介质型EBC噪声隔离性能的有限元建模分析

Modeling and analysis of the noise isolation performance for the 1D dielectric electromagnetic band-gap structure by finite-element method

电波科学学报. 2023, 38(2): 211-217

三维电磁散射问题区域分解技术研究进展

The progress of domain decomposition methods for 3D electromagnetic scattering problems

电波科学学报. 2020, 35(1): 34-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张浩轩, 王寅达, 王一尧, 等. 高功率微波作用下三维结构中多物理场耦合过程仿真方法研究综述[J]. 电波科学学报, 2024, 39(5): 852-869. DOI: 10.12265/j.cjors.2024055

ZHANG H X, WANG Y D, WANG Y Y, et al. Review of simulation method of multiphysics coupling process in three-dimensional structures under high power microwave action[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(5): 852-869. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024055

高功率微波作用下三维结构中多物理场耦合过程仿真方法研究综述

张浩轩¹ 王寅达¹ 王一尧¹ 白容川¹ 陈哲¹ 李谭毅¹ 王大伟² 王卫杰^{3,4} 谢浩^{1,5}
赵振国^{3,4} 詹启伟¹ 周海京^{3,4} 周亮⁶ 尹文言^{1*}

(1. 浙江大学电磁信息与电子集成创新研究所, 杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018; 3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 4. 中物院高性能数值模拟软件中心, 北京 100088; 5. 浙大城市学院信息与电气工程学院, 杭州 310015; 6. 上海交通大学射频异质异构集成全国重点实验室, 上海 200240)

摘要 电子系统暴露在高功率微波中, 产生的多物理耦合效应会引发其性能降低甚至损毁。为指导其电磁防护设计, 需要研究大规模电(磁)-热-应力耦合并行仿真方法。通过集成高性能并行计算框架和区域分解方法(domain decomposition method, DDM), 可以实现超大规模复杂结构的高效数值模拟。在无源结构的电-热-应力耦合数值模拟中, 每个时间步都需要反复求解电流连续性方程、热传导方程和热应力方程, 场间通过焦耳热和温变材料参数实现耦合, 当达到稳态后, 进入下一个时间步; 在射频无源结构的电磁-热-应力耦合过程数值模拟中, 每个时间步内分别求解电磁场和热场, 并通过耗散功率和温变材料参数实现场间耦合, 当达到稳态后, 根据温升计算热应力, 然后进入下一个时间步。本文回顾了电(磁)-热-应力大规模并行仿真的实现方法, 并列举了国内外科研团队在键合线阵列、系统级封装、微波滤波器等多种复杂结构的多物理场模拟方面的标志性成果。

关键词 多物理场计算; 高功率微波 (HPM); 有限元方法 (FEM); 区域分解方法 (DDM); 高性能计算

中图分类号 O441

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)05-0852-18

DOI 10.12265/j.cjors.2024055

Review of simulation method of multiphysics coupling process in three-dimensional structures under high power microwave action

ZHANG Haoxuan¹ WANG Yinda¹ WANG Yiyao¹ BAI Rongchuan¹ CHEN Zhe¹ LI Tanyi¹
WANG Dawei² WANG Weijie^{3,4} XIE Hao^{1,5} ZHAO Zhenguo^{3,4} ZHAN Qiwei¹
ZHOU Haijing^{3,4} ZHOU Liang⁶ YIN Wenyan^{1*}

(1. Innovative Institute of Electromagnetic Information and Electronic Integration (EIEI), Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 3. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China; 4. The Software Center for High Performance Numerical Simulation of CAEP, Beijing 100088, China; 5. School of Information and Electrical Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 6. State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Electronic systems exposed to high power microwaves (HPM) may experience multiphysics coupling effects that can lead to performance degradation or even damage. To guide the design of electromagnetic protection, it is necessary to study large-scale electric (magnetic)-thermal-stress coupling parallel simulation methods. By integrating high-performance parallel computing frameworks and domain decomposition methods, efficient numerical simulations

收稿日期: 2024-03-22

资助项目: 国家自然科学基金 (62071418, 61931007); 国家资助博士后研究人员计划 (GZC20241458)

通信作者: 尹文言 E-mail: wyyin@zju.edu.cn

of ultra-large-scale complex structures can be achieved. In the numerical simulation of electrical-thermal-mechanical coupling in passive structures, the current continuity equation, the heat conduction equation, and the thermal stress equation need to be repeatedly solved at each time step, with coupling between fields achieved through Joule heating and temperature-dependent material parameters. Once steady-state is reached, the simulation proceeds to the next time step. In the numerical simulation of electromagnetic-thermal-stress coupling processes in RF passive structures, the electromagnetic field and thermal field are solved separately at each time step, and coupling is achieved through dissipated power and temperature-dependent material parameters. Once steady-state is reached, thermal stress is calculated based on the temperature rise, and then the simulation proceeds to the next time step. This paper reviews the implementation methods of large-scale parallel simulations of electric (magnetic)-thermal-stress coupling and lists the landmark achievements of domestic and international research teams in multiphysics simulations of various complex structures, such as bond wire arrays, system in package, and microwave filters.

Keywords multiphysics computing; high power microwaves(HPM); finite element method (FEM); domain decomposition method (DDM); high performance computing

0 引言

目前,电子战技术如欺骗性干扰、反辐射导弹、高功率微波 (high-power microwave, HPM) 和电磁脉冲 (electromagnetic pulse, EMP) 武器的运用在战争冲突中变得日益普遍^[1]。这类技术会引发电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI), 其严重影响电子设备的性能, 甚至导致设备故障。HPM 信号能够通过天线或电缆进入通讯和雷达系统, 诱发电流和电压的剧烈波动, 导致电磁击穿、电弧放电和系统升温, 造成物理损伤^[2]。为预防这类损害, 设计初期需要对电子系统进行 HPM 注入仿真, 综合考虑电磁、热和应力的相互作用, 以评估多物理效应的影响^[3]。目前, 业界已经采用多种商业软件工具来对这类多物理场进行模拟, 以支持各种应用的设计与分析。但这些解决方案通常缺乏高效的并行计算能力, 导致模拟过程耗时且占用大量内存资源。当前的三维集成电路 (3D integrated circuits, 3DIC) 和系统级封装 (system-in-package, SiP) 结构十分复杂, 包含多层不同材料。使用有限元方法 (finite-element method, FEM) 进行多物理场模拟, 需要生成大量网格, 增加了计算复杂度^[4]。处理频域电场时谐亥姆霍兹方程时, 矢量基函数的离散化会产生条件数差的高维矩阵方程组。而在应力模拟方面, 每个网格节点都需要配置三个自由度, 加剧了时间和内存的消耗, 提高了仿真的难度。

为解决以上存在的问题, 国内外多个团队基于高性能并行框架和区域分解方法 (domain decomposition method, DDM) 等先进技术, 在超级计算机上实现了多款多物理场仿真求解器。伊利诺伊大学香槟分校金建铭教授团队以 FEM 为基础, 实现了多套多物理场求解器, 这些求解器能够处理包括电磁、热力

学、机械以及流体力学问题, 并能够实现这些不同物理场之间的耦合分析。例如: 开发了一种基于 FEM 的多物理场仿真技术, 用于互连的可靠性分析^[5]; 而在电磁诱导的多物理场效应分析方面, 提出了一种基于 FEM 的电磁热耦合仿真方法, 用于分析高功率射频/微波电路, 在该方法中引入了基于有限元撕裂对接 (finite-element tearing and interconnecting, FETI) 的 DDM, 以及基于比例积分微分控制算法的自适应时间步进方案, 提高了大规模问题的仿真效率^[6]; 使用其自研的电热耦合仿真方法, 准确预测了硅通孔 (through-Silicon vias, TSV) 结构的电气行为, 并考虑了热的影响^[7]。佐治亚理工大学 Madhavan Swaminathan 教授团队为 3DIC 开发了多种高效的多物理场建模和计算方法。例如: 提出了一种考虑焦耳热、流体冷却和空气对流效应的三维系统多物理场仿真方法, 该方法结合了有限体积方法, 并对多个封装实例进行了仿真^[8]; 为处理三维集成系统的多尺度效应, 使用非共形 DDM 实现了多尺度集成系统电热联合仿真^[9]; 进一步结合模式降阶 (model-order reduction, MOR), 对具有可变设计参数的三维封装结构, 进行了高效多物理场模拟^[10]。

本文系统回顾了 HPM 作用下三维结构中多物理场耦合过程仿真的基本原理、并行实现方案和相关标志性研究成果。

1 多物理场耦合模型与并行计算策略

刻画异质集成结构中的电(磁)-热-应力耦合过程可以用一系列偏微分方程组来描述, 也称为控制方程。其中包括描述频域电磁场的矢量波动方程, 描述传导电流的电流连续性方程, 以及描述热和应力的热传导方程和弹性力学相关方程。本部分将详细回顾这些方程的具体形式、数值离散方法和并行

实现策略。

1.1 电(磁)边值问题

1.1.1 矢量波动方程^[1]

全波电磁分析需要求解矢量波动方程

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -jk_0 Z_0 \mathbf{J}_{\text{imp}} \quad (1)$$

式中: μ_r 为相对磁导率; k_0 为波数; $\epsilon_r = \epsilon'_r - j \tan \delta \epsilon'_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ 为相对复介电常数, ϵ'_r 为相对介电常数, ϵ_0 为真空中介电常数, σ 为电导率; Z_0 为自由空间的固有阻抗; \mathbf{J}_{imp} 为电流密度。一阶吸收边界条件 (absorbing boundary condition, ABC)

$$\frac{1}{\mu_r} \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) + jk_0 \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) = 0 \quad (2)$$

用于将无限大自由空间截断为有限大的计算区域, 激励方式支持波端口和集总端口。其中波端口为

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) + P(\mathbf{E}) = \mathbf{U}_{\text{inc}} \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_{\text{inc}} = \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}_{\text{inc}}) + P(\mathbf{E}_{\text{inc}}) \quad (4)$$

$$P(\mathbf{E}) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{j\omega\mu\kappa_m} (\gamma_m \mathbf{e}_{vm} + \nabla e_{zm}) \int_S \mathbf{E} \cdot (\gamma_m \mathbf{e}_{vm} + \nabla e_{zm}) dS \quad (5)$$

式中:

$$\kappa_m = \frac{j}{\omega\mu} \int_S (\gamma_m \mathbf{e}_{vm} \cdot \mathbf{e}_{vm} + \mathbf{e}_{vm} \cdot \nabla e_{zm}) dS \quad (6)$$

\mathbf{e}_{vm} 和 e_{zm} 分别为模式电场的横向和纵向分量。

集总端口的具体形式为

$$\frac{1}{\mu_r} \mathbf{J} + \frac{j\omega\mu_0}{\eta} \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) = -2 \frac{j\omega\mu_0}{\eta} \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_0 \times \mathbf{n}) \quad (7)$$

式中: \mathbf{E}_0 为入射电场; η 为集总端口的等效表面阻抗。对于矩形集总端口, 有 $\mathbf{E}_0 = -(V_0/h)\mathbf{e}_z$, $\eta = Z(w/h)$, 其中 V_0 和 Z 分别为用户设置的输入电压和输入阻抗, h 和 w 分别为端口的高度和宽度。

1.1.2 电流连续性方程

电流连续性方程的表达式为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = \frac{\partial \rho_E(t)}{\partial t} \\ \phi|_{\Gamma_D} = \bar{\phi} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ϕ 为电势, Γ_D 为 Dirichlet 边界; $\bar{\phi}$ 为 Dirichlet 边界上的电势; $\rho_E(t)$ 为电荷密度。

1.2 热边值问题

瞬态热传导方程形式如下:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \kappa \nabla T + P(\mathbf{E}) \quad (9)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为恒压热容; T 为温度; κ 为热导率; $P(\mathbf{E})$ 为热源, 由导体损耗和介质损耗产生。边

界条件包括 Dirichlet 边界

$$T = T_D \quad (10)$$

以及对流散热边界

$$\kappa(T) \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = -h(T - T_a) \quad (11)$$

式中: h 为对流系数; T_a 为外部温度。

1.3 力边值问题

热应力问题由以下方程组描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \bar{f}_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ \epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^E + \epsilon_{ij}^{Th} \\ \varsigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl}^E \\ \epsilon_{ij}^{Th} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \\ u_i|_{\Gamma_u} = \bar{u}_i \\ \sigma_{ij} n_j|_{\Gamma_\sigma} = \bar{\lambda}_i \end{cases} \quad (12)$$

式中: i, j, k, l 的取值范围是1,2,3; \bar{f}_i 为外部施加的力; μ_0 为阻尼系数; ς_{ij} 为应力张量; ϵ_{ij} 为应变张量; ϵ_{ij}^E 为弹性应变分量; ϵ_{ij}^{Th} 为热应变分量; ΔT 为温度变化; α 为热膨胀系数; u_i 为位移; \bar{u}_i 为 Dirichlet 边界上设置的位移值; $\bar{\lambda}_i$ 为应力边界 Γ_σ 上施加的应力值。 D_{ijkl} 为四阶张量, 具体形式为

$$D_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (13)$$

式中: E, ν 分别为杨氏模量和泊松比, 而 δ_{ij} 为 Dirac 函数:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (14)$$

由以上各式, 可推导出热应力的具体形式:

$$\varsigma_{ij} = \frac{1}{2} D_{ijkl} (u_{kl} + u_{lk}) \alpha(T) \Delta T D_{ijkl} \delta_{kl} \quad (15)$$

1.4 有限元离散与场间耦合

1.4.1 无源结构中电-热-应力耦合过程

电-热-应力耦合过程的物理模型包括电流连续性方程(8)、热传导方程(9)和应力方程(12)。使用时域 FEM (time-domain FEM, TD-FEM) 方法离散, 将这些方程转化为矩阵形式:

$$\mathbf{K}_E(T) \mathbf{U}(t) = \mathbf{Q}_E(T, t) \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_T \frac{\partial \mathbf{T}(t)}{\partial t} + \mathbf{K}_T(T) \mathbf{T}(t) = \mathbf{Q}_T(T, t) \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_S \frac{\partial^2 \mathbf{a}(t)}{\partial t^2} + \mathbf{H}_S \frac{\partial \mathbf{a}(t)}{\partial t} + \mathbf{K}_S(T) \mathbf{a}(t) = \mathbf{Q}_S(T, t) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{U}(t)$ 、 $\mathbf{T}(t)$ 和 $\mathbf{a}(t)$ 分别为 TD-FEM 方法中网格节

点上的电势、温度和位移的向量; $\mathbf{K}_E(T)$ 、 \mathbf{H}_T 、 $\mathbf{K}_T(T)$ 、 \mathbf{M}_S 、 \mathbf{H}_S 和 $\mathbf{K}_S(T)$ 分别为电导率、热容、热导率、质量、阻尼和刚度对应的矩阵; $\mathbf{Q}_E(T, t)$ 、 $\mathbf{Q}_T(T, t)$ 和 $\mathbf{Q}_S(T, t)$ 分别为电、热和力的负载矢量。而电、热和应力之间的相互耦合由以下方程控制:

$$p(T, x, y, z, t) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \quad (19)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi, \mathbf{J} = \sigma(T)\mathbf{E} \quad (20)$$

$$\varepsilon^{\text{Th}} = \alpha(T)\Delta T = \alpha(T)(T - T_a) \quad (21)$$

式中, $p(T, x, y, z, t)$ 为焦耳热的功率密度。焦耳热会造成温度分布的变化, 并进一步改变材料的物理参数, 包括电参数、热参数以及力学参数, 为描述材料参数随温度的非线性变化规律, 本工作将所涉及的温变参数拟合合成如下多项式形式:

$$x(T) = \sum_{n=0}^4 a_n T^n, \quad T_0 \leq T \leq T_1 \quad (22)$$

式中: $a_n (n=0, \dots, 4)$ 为多项式系数, 典型材料的 a_n 见文献 [12]。材料参数随温度变化使得电-热-应力耦合过程具有很强的非线性, 需要合理设计耦合流程。首先, 将仿真时间离散化为许多微小的时间步长。在每个时间步中, 迭代求解方程 (16)~(18), 直到达到收敛条件。

1.4.2 射频器件中电磁-热-应力耦合过程

对于矢量波动方程, 为避免出现伪解 (spurious solutions) 和场的奇异性, 使用矢量基函数 (Nédélec 基函数^[13]) 将电场展开:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{N_{\text{basis}}} N_i \mathbf{E}_i \quad (23)$$

式中: N_i 为矢量基函数; N_{basis} 为基函数总数。再应用伽辽金方法, 最终得到波动方程的 FEM 矩阵形式:

$$\mathbf{K}_{\text{EM}} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (24)$$

在电磁场的作用下, 导体和介质损耗

$$P(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'_i \tan \delta |\mathbf{E}|^2 + \frac{1}{2} \sigma |\mathbf{E}|^2 \quad (25)$$

会改变温度分布, 引起材料参数的变化和结构的膨胀或收缩。这些变化反过来又会影响电磁场分布, 导致电磁-热-应力耦合过程的强非线性。为精确表征这一复杂过程, 需要科学地设计耦合机制。典型的耦合流程如图 1 所示。在每个时间步长中, 仿真过程分为电磁-热耦合和热-应力耦合两个阶段。电磁场与温度场之间通过焦耳热效应和温变材料参数变化实现双向耦合。为表征这一过程中的非线性, 需要反复求解方程 (17) 和 (24), 并更新材料参数及电磁损耗, 直到温度达到稳定状态。在进行热应力

模拟时, 使用每个时间步的温度变化来计算初应变。考虑到射频器件中由热膨胀引起的结构形变很小, 其对电磁场和热场的影响不纳入考虑范围内。

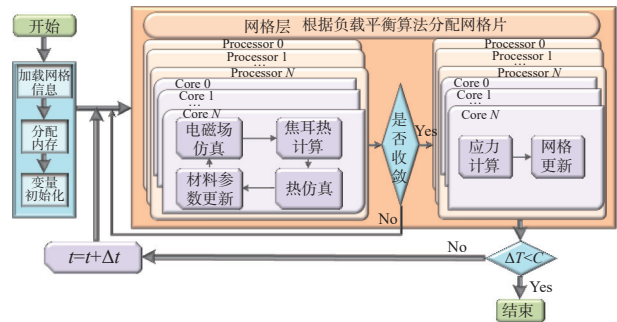


图 1 电磁-热-应力耦合流程^[11]

Fig. 1 Electromagnetic-thermal-stress coupling process^[11]

1.5 大规模并行实现

在硬件架构日益复杂的超级计算机上开发高性能程序对于各自领域的专家非常困难, 为攻克该瓶颈, 国内外许多研究机构基于超算硬件架构开发了高性能编程框架。以我国自主研发的非结构网格高性能并行框架 JAUMIN^[14-15] 为例: JAUMIN 架构的主要功能是有有效利用超级计算机平台实现大规模并行数值模拟; JAUMIN 集成了高性能数据结构、成熟的矩阵方程求解算法、大规模并行算法和网格自适应生成模块。JAUMIN 编程框架的架构分为三层: 并行自适应支撑层、数值通用层和应用接口层。首先, JAUMIN 将传入的网格划分为 n 个网格片 (patch), n 的数量由用户设置。网格片是 JAUMIN 中的基本调度单元, 并行程序的每个进程可以分配给一个或多个网格片。网格片上存储了相应子网格的几何信息, 可以根据用户需求定义数值计算所需的各种数据。JAUMIN 框架依靠其独特的构件 (component) 功能来实现模块化编程。图 2 展示了 JAUMIN 框架为用户提供的编程接口中包含的常用构件。其中, 积分构件类是数据操作的基本单元, 主要完成网格片上的数据通信和数值计算。积分构件类中的常用构件包括初始化构件、时间步进构件、归约构件和数值构件, 可完成数值计算中的定义、初始化和局部系统矩阵组装; 而网格几何和网格拓扑支持程序遍历所有面片。得到矩阵方程后, 就可以调用求解器完成矩阵求解。

基于以上 JAUMIN 框架和多物理场仿真流程, 作者团队实现了可支持大规模并行计算的电 (磁)-热-应力耦合求解器, 并基于高性能并行框架的数据结构, 实现了一系列基于 DDM 的迭代及预处理加速方法^[11,14,16-20], 进一步扩大了多物理场耦合计算的规模。

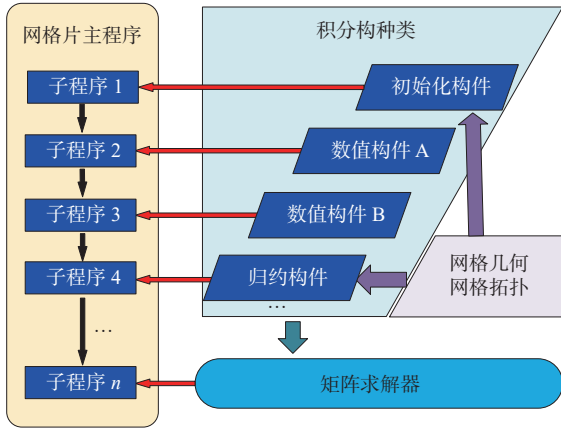


图 2 JAUMIN 中基于构件的编程流程^[14]

Fig. 2 JAUMIN component-based programming process^[14]

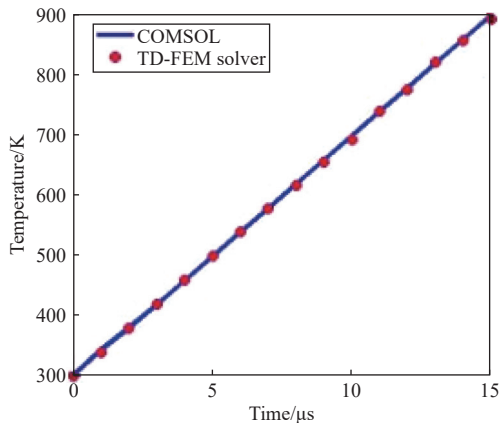
2 多物理场数值模拟

2.1 电-热-应力耦合数值模拟

随着通信技术的进步,封装结构变得越来越复杂,互连之间的耦合效应逐渐引起研究人员的重视。在封装技术中,引线键合(wire bonding)^[21]是实现芯片间及系统内外电气连接的重要工艺,作为最早发展并且最成熟的连接工艺,因其加工简单且成本低廉,在半导体设备和 SIP 中被广泛使用。然而,键合线的可靠性问题是导致电子设备故障的一个重要诱因。因此,对键合线进行高效数值模拟是至关重要的。目前的研究主要集中在电、热或力的单一物理过程仿真上,且模型通常只涉及单条或少数几条键合线,关于大规模键合线阵列的电-热-应力耦合仿真还相当少见。

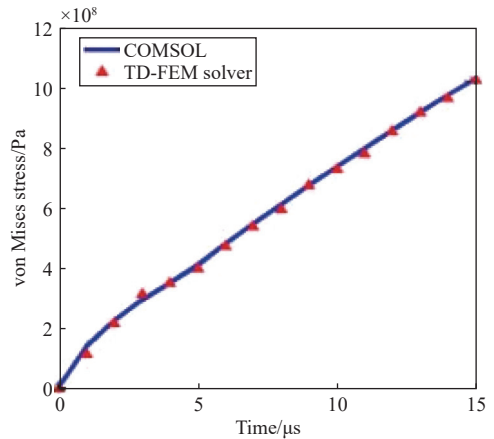
2.1.1 键合线阵列在脉冲注入下的电-热-应力响应

文献 [12, 16, 18] 采用键合线阵列作为分析对象,模拟了高功率脉冲激励下的多物理耦合效应。使用文献 [16] 中的键合线模型与商业软件进行对比验证,图 3 的结果表明其自研程序的精确度较高。在验证精确度后,使用更大规模的键合线阵列实现多物理场仿真分析,键合线阵列模型的几何结构和



(a) 最大温度

(a) Maximum temperature



(b) 最大范氏应力

(b) Maximum von Mises stress

图 3 电-热-应力耦合求解精度验证^[18]

Fig. 3 Precision verification of electric-thermal-stress coupling solution^[18]

参数设置见文献 [12, 16]。通过将三种不同宽度和幅度的梯形脉冲(图 4)从输入端和输出端的 SiN 材料上的铜电极注入,分析了键合线阵列在不同脉冲激励条件下的电-热-力耦合效应。模型使用四面体网格进行划分, FEM 求解的自由度共 1 689 861 个。使用天河 II 号超级计算机完成计算,共调用 20 个计算节点上的 200 个 CPU 核心。仿真的网格剖分和并行计算的进程分配如图 5 所示。

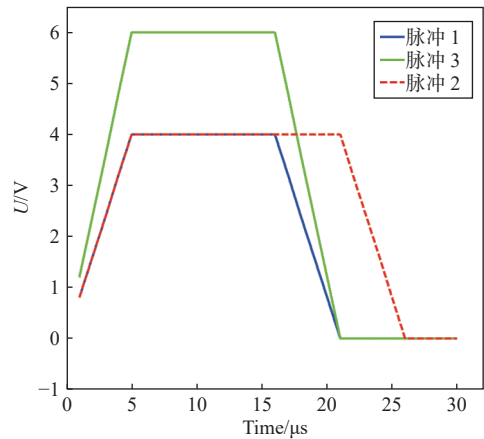


图 4 键合线阵列仿真中使用的梯形脉冲^[12]

Fig. 4 Trapezoidal pulses used in simulation of bonding wire array^[12]

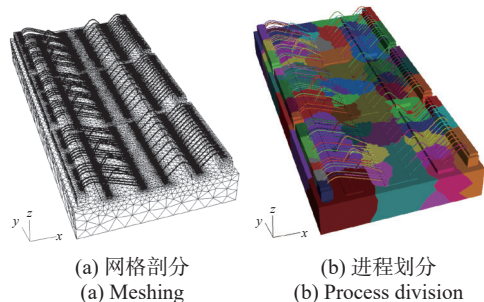


图 5 网格剖分和计算进程划分^[12]

Fig. 5 Meshing and process division^[12]

图 6(a) 和 (b) 展示了键合线阵列在不同宽度脉冲注入下其最大温度和应力随时间的变化。仿真结果表明: 在脉冲 1 的初始上升期, 即前 5 μs , 温度增长较慢; 当脉冲稳定在其最大幅度时, 温度呈线性增长; 而在脉冲幅度开始下降时, 温度趋向平稳。然而, 温度不会随脉冲幅度的降低而快速下降, 这主要是因为键合线阵列与铜电极的接触面积较小, 散热缓慢。因热应变与温度变化成线性关系, 应力变化的趋势预期与温度的变化类似, 这一点从图 6(b) 的结果中得到验证。与脉冲 1 相比, 脉冲 2 注入下的最大温度和应力都更高, 原因是焦耳热效应作用的时间更长。图 7(a) 和 (b) 展示了在不同幅度脉冲注入下键合线阵列的最大温度和应力随时间的变化, 脉冲幅度的变化对多物理场响应的影响更为显著。

在高功率脉冲 3 的作用下, 键合线阵列的最大温度超过 1 000 K, 会导致结构材料的损伤。此外, 更高功率的脉冲上升沿更加陡峭, 应力增加更为迅速, 可能会引发电子系统性能的降级。为指导键合线阵列结构的设计, 捕捉其最大温度和应力出现的位置, 文献 [12] 给出了三维物理场分布图, 图 8 为脉冲 1 注入 15 μs 时键合线阵列温度和应力分布情况。温度最大值出现在键合线的线体部分, 而最大应力则出现在连接两排键合线的铜电极表面, 具体细节如图 9 所示。造成应力最大值出现在该位置的原因, 一是几何结构和材料属性的突变, 二是键合线两端与铜电极之间存在较大的温度差。该工作提出的求解方法对于优化设计具有重要的指导意义。

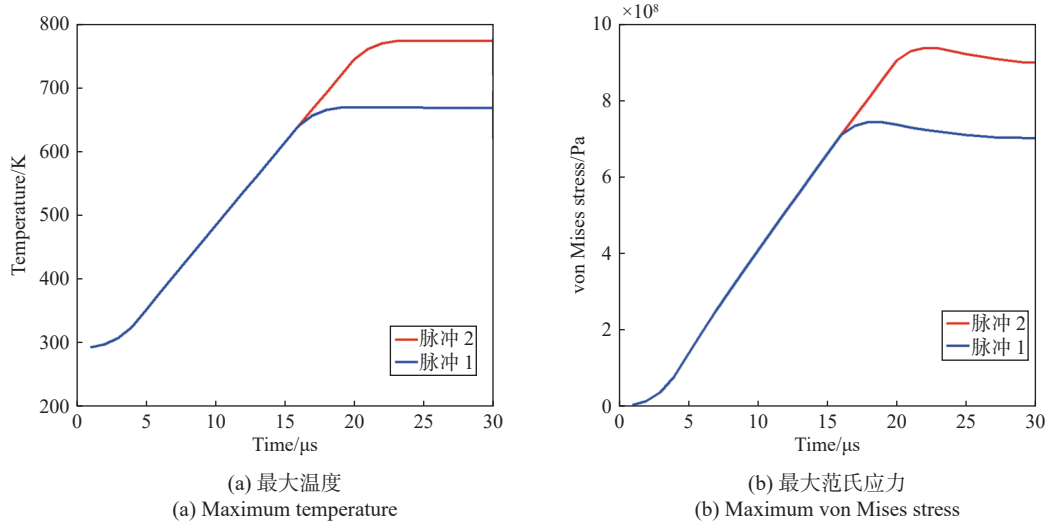


图 6 不同宽度脉冲注入下键合线阵列最大温度和范氏应力^[12]

Fig. 6 Maximum temperature and stress of bonding wire array under pulse injection with different pulse widths^[12]

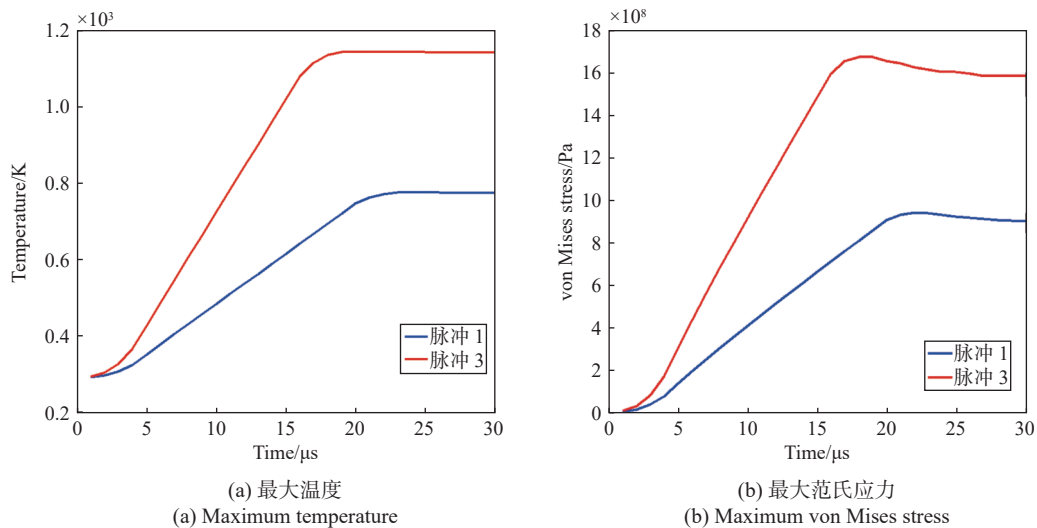


图 7 不同幅度脉冲注入下键合线阵列最大温度和范氏应力^[12]

Fig. 7 Maximum temperature and von Mises stress of bonding wire array under pulse injection of different amplitudes^[12]

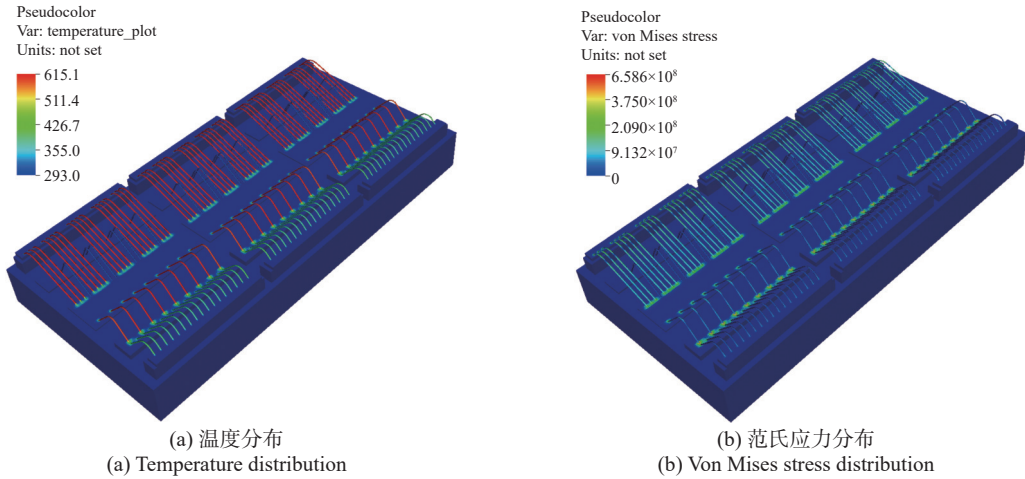


图 8 脉冲 1 注入 15 μs 时键合线阵列温度和范氏应力分布^[12]

Fig. 8 Temperature and von Mises stress distribution when pulse 1 is injected for 15 μs^[12]

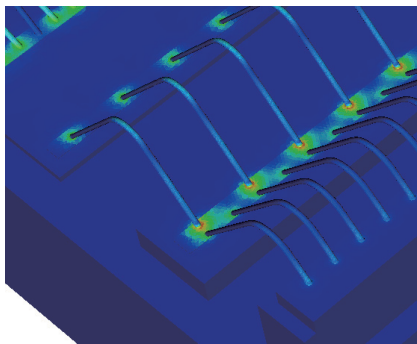


图 9 键合线阵列最大范氏应力出现位置^[12]

Fig. 9 The location of maximum von Mises stress in the bonding wire array^[12]

2.1.2 SiP 在脉冲注入下的电-热-应力响应

在文献 [12] 中,以图 10 所示的 SiP 为算例,完成了多物理场效应的仿真研究。该结构由四层硅基底构成,每两层之间嵌入一层材质为金的金属板。D 层有多个端口,允许 SiP 与外部电路进行连接;A 层为接地层;B 层和 C 层嵌入了多个射频组件,包括滤波器、功率分配器和耦合器等。该仿真研究聚焦于封装系统中功耗最高的高功率芯片部分,如图 11 所示。仿真模型的几何尺寸为 7.203 mm×6.946 mm×2.204 mm,其中绿色部分为硅基底,红色部分为热沉的钼铜载板,蓝色部分为芯片,而绿色圆柱体为通孔。具体的参数设置见文献 [12]。

注入的梯形脉冲如图 12 所示。通过离散化后的电-热-应力响应系统自由度达到了 2 487 999。如图 13 所示,脉冲注入期间 SiP 的最大温度和应力都经历了显著的升高和下降。在一个脉冲周期内,最大温度和最大应力发生了急剧变化。经过四个脉冲周期后,最大温度的峰值仅增加了 30 K,而最大应力则呈现出逐步上升的阶梯状趋势。表明在周期性的脉冲作用下, SiP 结构内部可能累积较大的应力残

留。如果脉冲功率太高,这种应力残留有可能导致系统性能下降和寿命减短。

图 14 和 15 给出了 120 ms 时 SiP 的温度、应力和各层应力分布情况。可以看到,通孔周围区域应力分布最为密集,表明这些区域在 SiP 中承受了较高的应力水平。这种详细的分布图能够清楚地揭示电-热-应力相互作用下的复杂响应,可为 SiP 设计提供准确的指导。

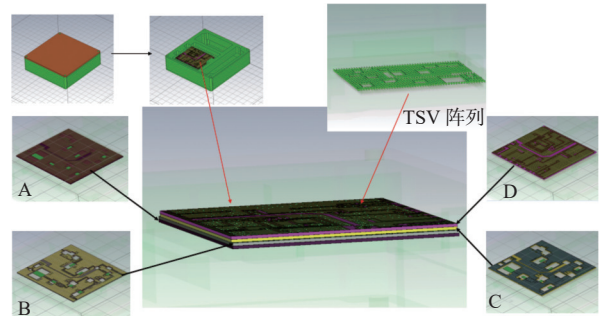


图 10 SiP 三维模型^[12]

Fig. 10 SiP 3D model^[12]

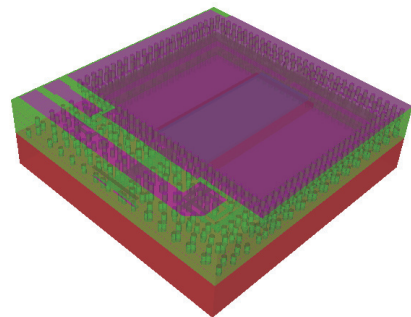


图 11 SiP 中典型高功率芯片模型^[12]

Fig. 11 Typical high power chip model in SiP^[12]

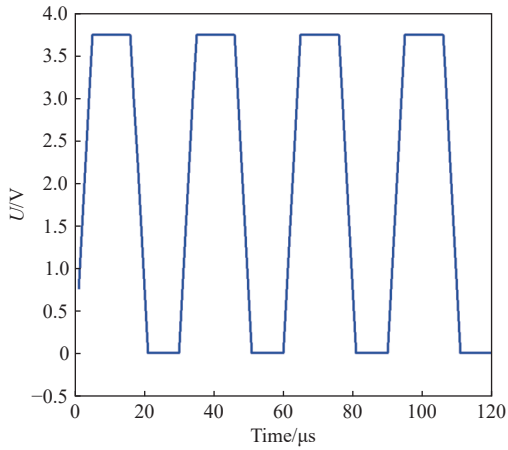
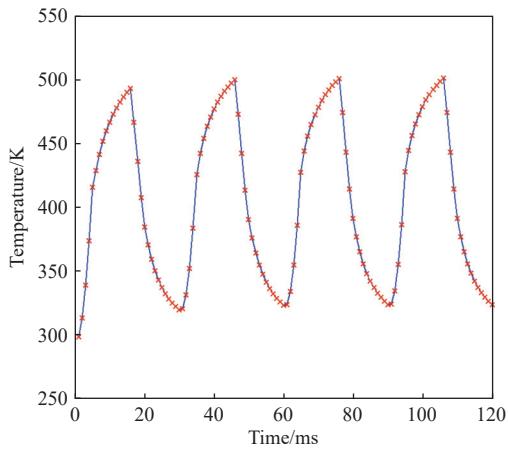


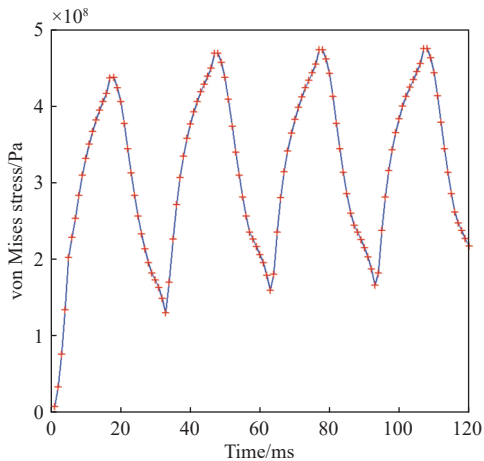
图 12 SiP 仿真中使用的梯形脉冲波形^[12]

Fig. 12 Injection pulse waveform in SiP simulation^[12]



(a) 最大温度

(a) Maximum temperature

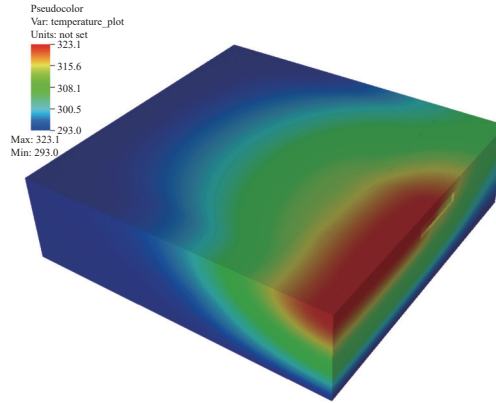


(b) 最大范氏应力

(b) Maximum von Mises stress

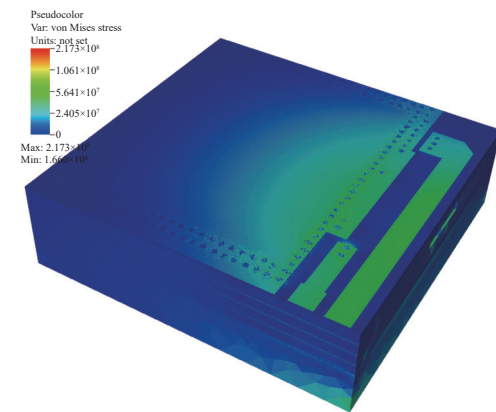
图 13 脉冲注入期间 SiP 的最大温度和范氏应力^[12]

Fig. 13 Maximum temperature and von Mises stress of SiP vs. time under pulse injection^[12]



(a) 温度分布

(a) Temperature distribution

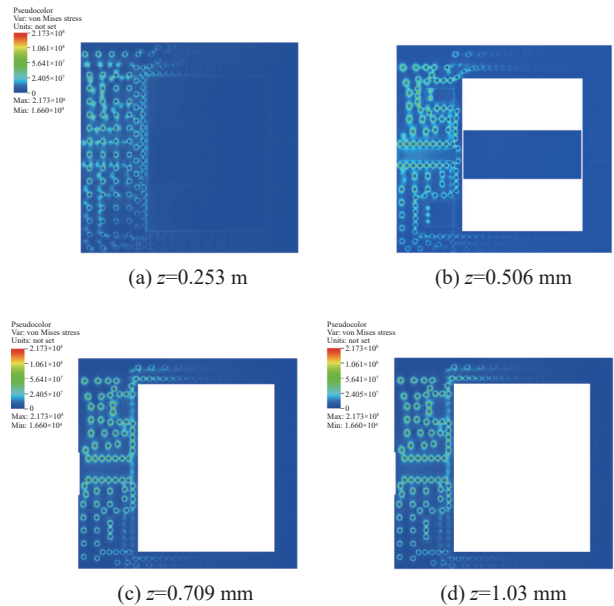


(b) 范氏应力分布

(b) von Mises stress distribution

图 14 120 ms 时 SiP 的温度分布和范氏应力分布^[12]

Fig. 14 Temperature and von Mises stress distribution of SiP at 120 ms^[12]



(a) $z=0.253$ mm

(b) $z=0.506$ mm

(c) $z=0.709$ mm

(d) $z=1.03$ mm

图 15 120 ms 时 SiP 不同层的切面范氏应力分布 (z 为高度)^[12]

Fig. 15 Von Mises stress distribution of SiP with different layers (z is height) at 120 ms^[12]

2.1.3 并行性能测试

文献 [12] 使用天河 II 号超级计算机, 对其自研电-热-应力耦合求解器进行了强扩展并行测试, 测试模型为图 11 所示的高功率芯片, 表 1 给出了强扩展并行测试的结果数据。以 64 核为参考, 扩展到 1 024 核时, 该并程序仍然能保持 30% 以上的强扩展并行效率。

表 1 电-热-应力耦合求解强扩展测试结果^[12]

Tab. 1 Strong scalability test result of electric-thermal-stress coupling solution^[12]

| 核数 | 单步时间/s | 加速比 | 并行效率/% |
|-------|---------|-------|--------|
| 64 | 1 143.8 | 1.000 | 100.0 |
| 128 | 906.6 | 1.261 | 63.1 |
| 256 | 502.8 | 2.275 | 56.9 |
| 512 | 312.5 | 3.660 | 45.8 |
| 1 024 | 231.3 | 4.945 | 30.9 |

2.1.4 焊球阵列仿真

美国伊利诺伊大学香槟分校 Lu 等人^[5] 结合 FETI 和并行计算技术, 成功实现了多物理场大规模并行分析。该工作中的一个典型算例是一个焊球阵列模型, 该模型由 96 个焊球组成, 并分为 16 列, 如图 16 所示。图 17 所示的梯形脉冲串通过电源端子注入, 焊球阵列内的最大温度随时间阶跃上升, 温度在 5.5 ms 时稳定在 375 K。图 18 给出了脉冲注入 1 和 5.5 ms 时的温度分布, 焊球及其附近区域出现了局部过热。由于温度梯度过大并且热膨胀系数不匹配, 结构中的不同材料的膨胀速率差异很大, 将会产生很大的应力。图 19 为焊球阵列范氏应力的分布图, 在不同材料的分界面处可以观察到较高应力值。

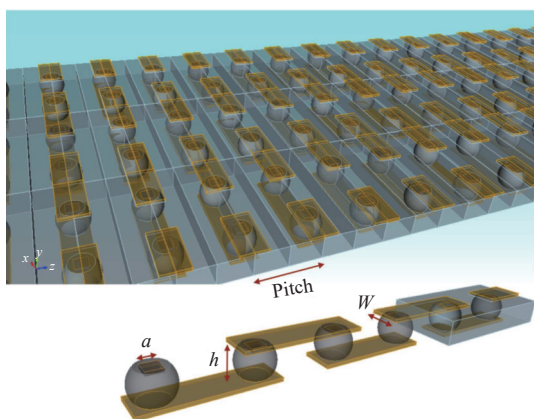


图 16 焊球阵列几何结构^[5]

Fig. 16 Geometry of a solder bump array^[5]

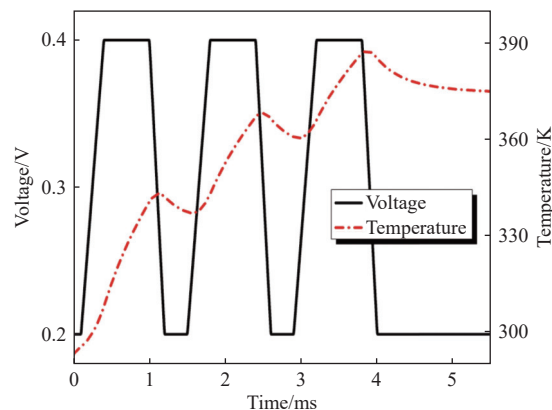


图 17 焊球阵列在梯形脉冲串注入下的最大温度^[5]

Fig. 17 Maximum temperature of the solder bump array under the injection of a trapezoidal pulse train^[5]

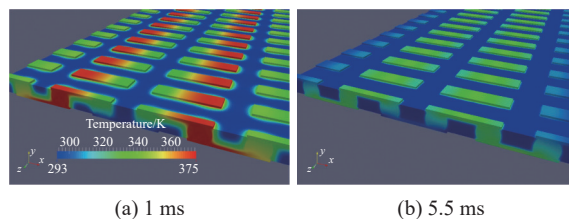
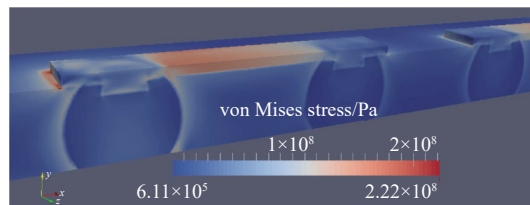
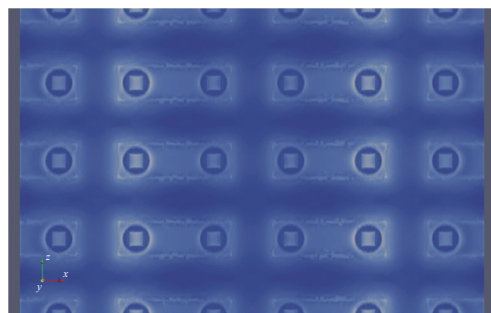


图 18 脉冲注入 1 ms 和 5.5 ms 时焊球阵列的温度分布^[5]

Fig. 18 Temperature distribution of the solder bump array at (a) 1 and (b) 5.5 ms^[5]



(a) 三维视图
(a) 3D view



(b) 俯视图
(b) Top view

图 19 焊球阵列的范氏应力分布^[5]

Fig. 19 Distribution of von Mises stresses within the solder bump array^[5]

2.1.5 高功率集成电路多物理场分析

美国俄亥俄州立大学 Shao 等人结合 DDM, 对高功率集成电路实现了电热耦合分析^[22]。图 20 给出了该团队计算得到的电源分配网络 (power delivery

network, PDN) 的电压分布, 图 21 比较了三维 SiP 模块在有/无风冷情况下的温度分布, 结果表明, 强制对流散热可显著降低 SiP 模块的温度。该仿真实验证明了散热片和风冷在高性能芯片热管理中的关键作用。

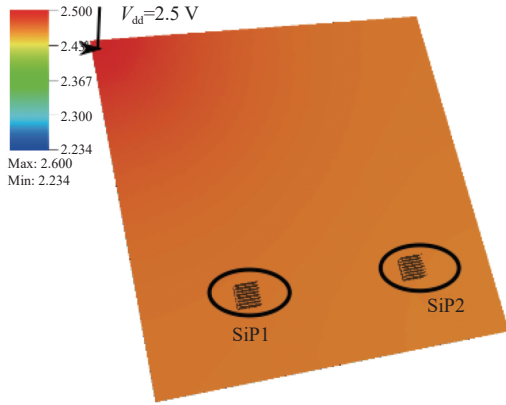


图 20 PDN 的电压分布^[22]
Fig. 20 The voltage distribution of PDN^[22]

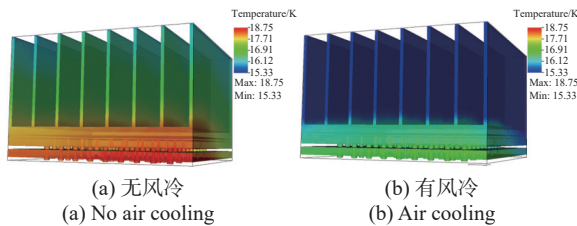


图 21 三维 SiP 的温度分布^[22]
Fig. 21 Temperature distribution of 3D SiP^[22]

2.2 电磁-热-应力耦合数值模拟

2.2.1 微带滤波器电磁-热特性仿真^[23]

文献 [23] 采用多物理场耦合仿真自研程序, 对图 22 所示的 S 波段微带线滤波器进行电磁-热耦合效应研究。图 23 展示了该工作得到的常温条件下滤波器的 S 参数, 图 24 给出了环境温度分别为 300 K、400 K 和 500 K 时的 S 参数, 可以看出随着环境温度的升高, S 参数曲线向高频段发生漂移。文献 [23] 进一步探讨了 HPM 注入条件下微带滤波器内部的多物理场效应, 图 25 所示的模拟结果表明, 在通带右侧附近, 滤波器的 S 参数出现了最大约 0.02 GHz 的偏移。这主要归因于该频率范围内自热效应较大, 和图 26(a) 所示的最大温度随频率变化关系对应。图 26(b) 是该工作得到的不同功率注入下器件内部热功率随频率的变化。文献 [23] 得到的结果为理解和优化滤波器在不同工作条件下的性能提供了重要指导。为清晰展示不同频率下微带滤波器中多物理场的分布情况, 给出了输入功率 400 W, 频率设置为 2.6 GHz、3.0 GHz 和 3.4 GHz 时器件中的电场和温度分布, 如图 27 所示。可以看出, 电磁场的传输路径

上温度更高, 这是因为导体和介质的损耗集中在波的传输路径上。

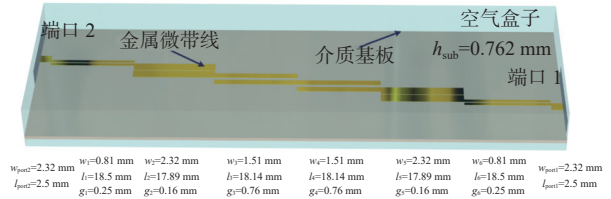


图 22 S 波段微带线滤波器结构示意图^[23]

Fig. 22 Schematic of S-band microstrip line filter structure^[23]

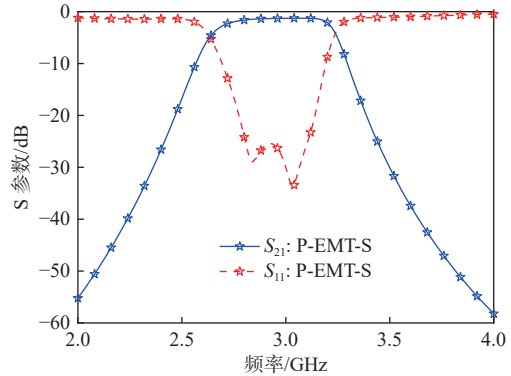


图 23 S 波段微带线滤波器的 S 参数^[23]

Fig. 23 S-parameters of S-band microstrip line filter^[23]

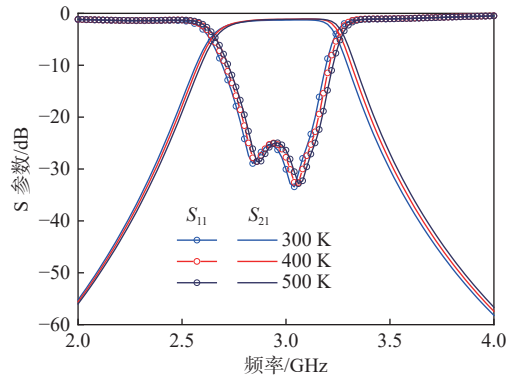


图 24 不同环境温度下 S 波段微带线滤波器的 S 参数^[23]
Fig. 24 S-parameter of S-band microstrip line filter changes with ambient temperatures^[23]

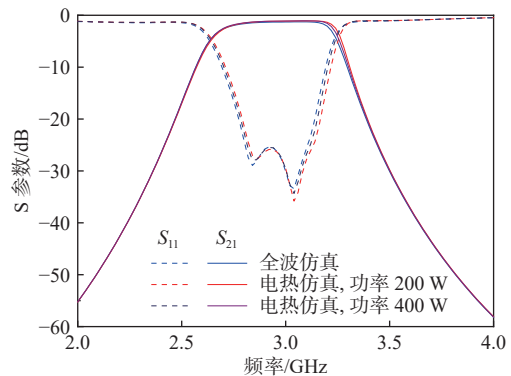
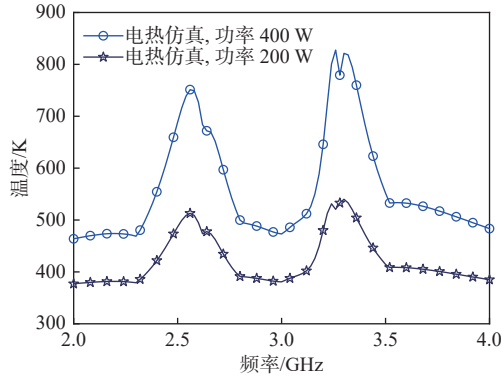
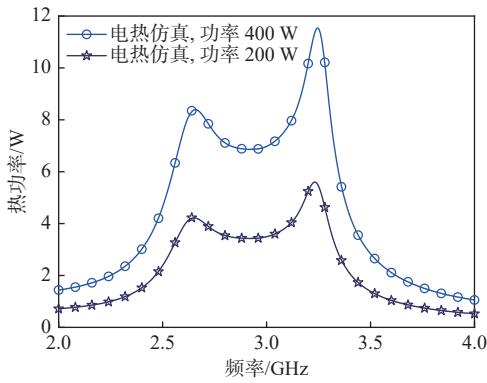


图 25 不同功率 HPM 注入下 S 波段微带线滤波器 S 参数的漂移^[23]
Fig. 25 Drift of S-parameters of microstrip line filter under different power HPM injection at S band^[23]



(a) 最大温度
(a) Maximum temperature



(b) 热功率
(b) Thermal power

图 26 不同功率 HPM 注入下滤波器内部最大温度和热功率随频率的变化^[23]

Fig. 26 The maximum temperature and thermal power inside the filter vs. frequency with different HPM injection powers^[23]

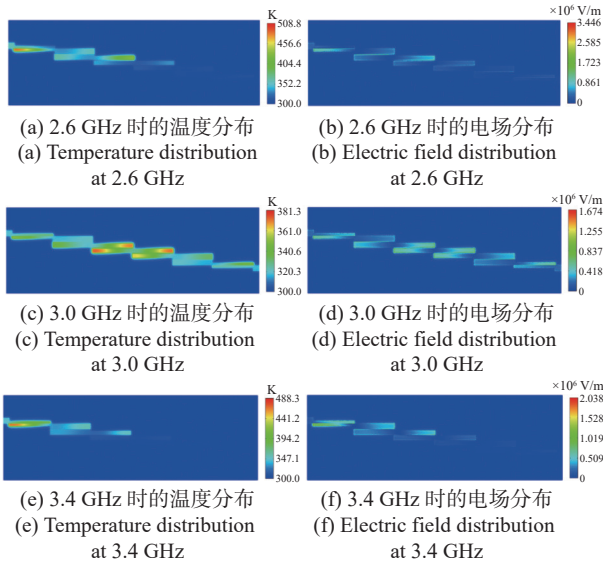


图 27 微带线滤波器中温度和电场分布

Fig. 27 Temperature and electric field distribution in microstrip line filter

2.2.2 C 波段 SIW 滤波器电磁-热特性仿真^[23]

文献 [23] 也对图 28 所示 C 波段基板集成波导 (substrate integrated waveguide, SIW) 滤波器的电磁-

热特性进行了仿真研究, 该滤波器的介质材料为 Arlon AD270, 其相对介电常数温度系数为 $-110 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。在室温条件下, 图 29 给出了使用自研程序得到的 S 参数仿真结果、HFSS 软件的仿真结果及实测结果对比, 其自研求解器展现了较高置信度。

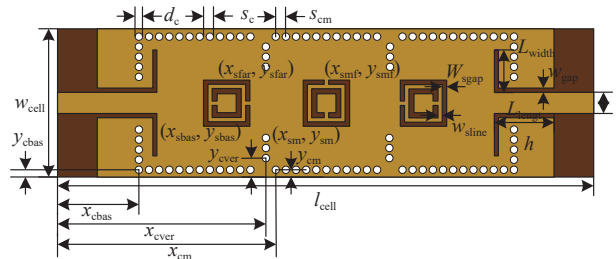
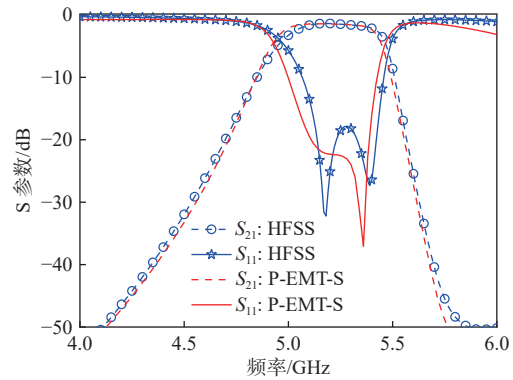


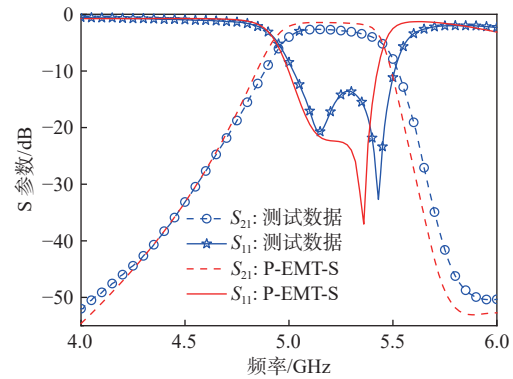
图 28 典型 C 波段 SIW 滤波器结构示意图^[23]

Fig. 28 Schematic diagram of a typical C-band SIW filter structure^[23]



(a) 自研程序模拟结果和 HFSS 仿真对比

(a) Comparison of self-developed program simulation results and HFSS simulation



(b) 自研程序模拟结果和实测数据对比

(b) Comparison of self-developed program simulation results and measured data

图 29 C 波段 SIW 滤波器的 S 参数^[23]

Fig. 29 S-parameters of SIW filter at C band^[23]

在进行复杂的多物理场耦合模拟前, 首先对不同环境温度下的 S 参数进行仿真, 如图 30 所示。环境温度从 300 K 增加到 500 K 时, SIW 滤波器的 S 参数整体向高频段偏移了约 0.06 GHz。与微带线滤波器相比, SIW 滤波器对温度的变化更敏感。在高功

率脉冲注入下, SIW 滤波器内多物理场效应引起的温升对 S 参数的影响更为显著。为深入研究这些多物理效应对滤波器传输特性的具体影响, 在分别注入 40 W 和 80 W 功率的脉冲下进行电磁-热耦合仿真。图 31 给出了在这些不同注入功率条件下 S 参数的漂移情况, 而图 32 则给出了在不同功率注入下滤波器内部的最大温度随频率的变化趋势。

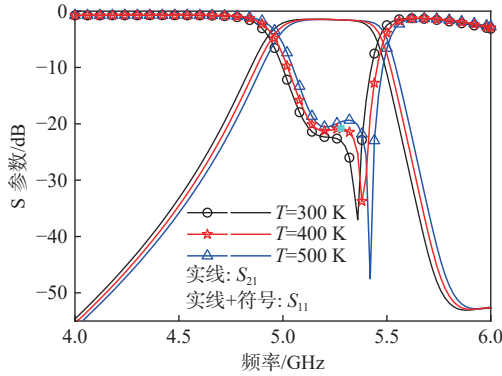


图 30 不同环境温度下 C 波段 SIW 滤波器的 S 参数^[23]

Fig. 30 S-parameter of C-band SIW filter at different ambient temperatures^[23]

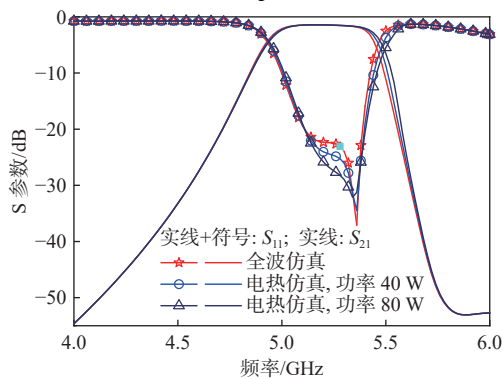


图 31 不同功率脉冲注入下 C 波段 SIW 滤波器的 S 参数的漂移^[23]

Fig. 31 S-parameter drift of C-band SIW filter with different pulse injection powers^[23]

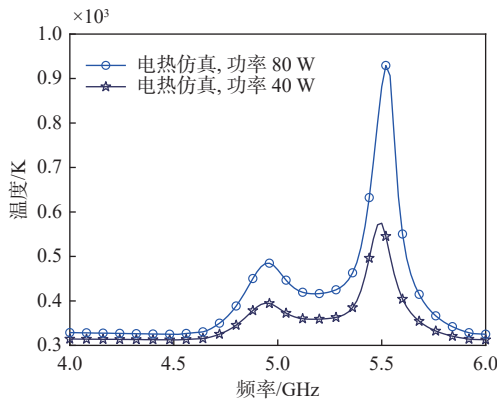


图 32 不同功率脉冲注入下 C 波段 SIW 滤波器中最大温度随频率的变化^[23]

Fig. 32 Maximum temperature vs. frequency in C-band SIW filter with different pulse injection powers^[23]

2.2.3 94 GHz 封装 BCB 滤波器电磁-热-应力特性仿真^[11,24]

如图 33 所示, 文献 [11] 以五模 W 波段封装滤波器为算例, 该滤波器的具体几何形状和详细参数信息见文献 [25]。该滤波器通过光刻工艺制造, 采用的基材是光敏聚合物苯并环丁烯 (benzocyclobutene, BCB)^[26]。首先测试了其自研程序的强扩展并行效率, 如图 34 所示, 以 140 个 CPU 核为参考, 当在 Pluto2 集群上调用到 840 个 CPU 核时, 该程序依然能保持 40% 以上的并行效率。室温条件下的 S 参数仿真结果如图 35 所示, 可以看出其自研程序与商业软件计算得到的结果有较好的一致性。由于加工工艺和测试手段的局限, 仿真结果与实际测量值之间存在一定的偏差。图 36 为 0.1 s、0.5 s 和 5 s 时刻的温度和应力变化, 输入功率为 2.5 W, 频率为 94 GHz。图 37 为不同注入功率条件下最高温度随时间的变化。滤波器大约在 2 s 内达到热稳态, 且输入功率每增加 2.5 W, 滤波器的稳态最高温度约增加 50 K。仿真结果为理解和评估 W 波段封装滤波器在实际应用中的热性能和结构稳定性提供了宝贵信息。

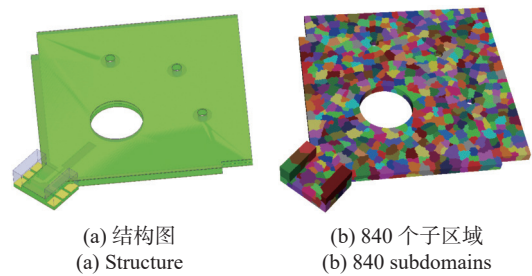


图 33 五模 W 波段封装滤波器结构图及 840 个子区域^[11]

Fig. 33 Five-mode W-band package filter structure and 840 subdomains^[11]

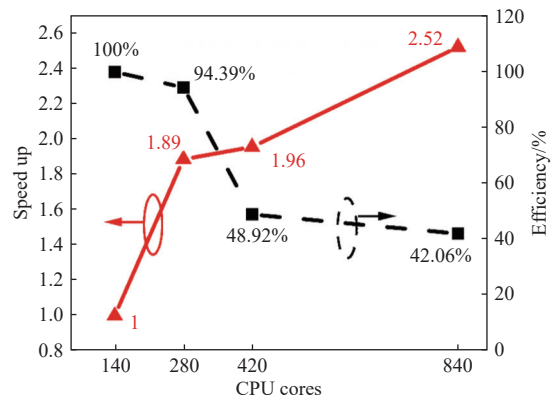


图 34 强扩展并行实验^[11]

Fig. 34 Strong scalability experiment^[11]

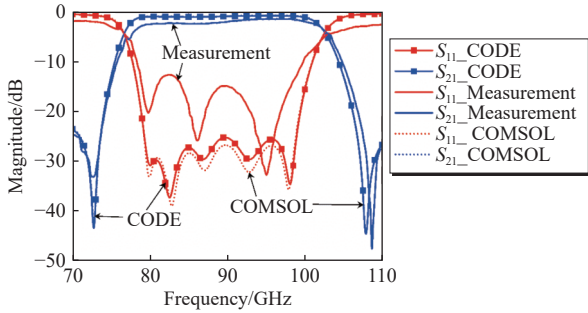


图 35 室温下 W 波段滤波器 S 参数的测量和仿真结果^[11]
 Fig. 35 Measured and simulated S-parameters of W-band filter at room temperature^[11]

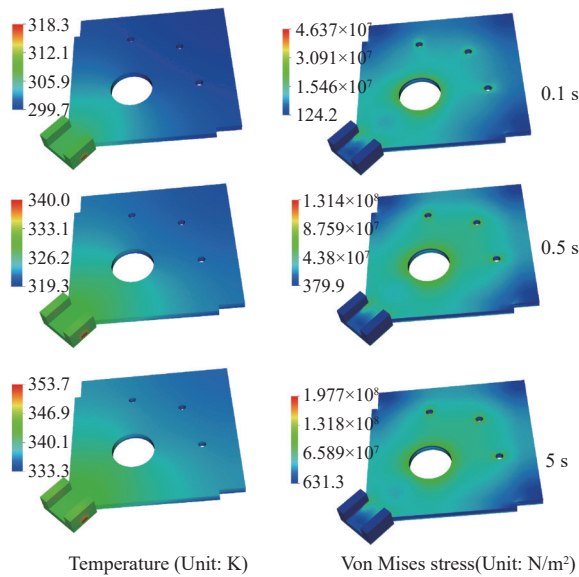


图 36 W 波段滤波器在不同时刻处的温度和范氏应力分布^[11]
 Fig. 36 Temperature and von Mises stress distribution of the W-band filter at different times^[11]

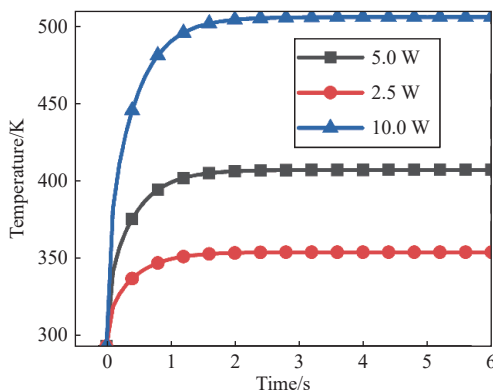


图 37 不同注入功率条件下 W 波段滤波器最高温度随时间的变化^[11]
 Fig. 37 The maximum temperature of W-band filter vs. time with different input powers^[11]

2.2.4 K 波段低温共烧陶瓷 (LTCC) 滤波器电磁-热-应力特性仿真^[11,24]

文献 [11] 中另一典型算例是一个 K 波段三层低

温共烧陶瓷 (low-temperature cofired ceramic, LTCC) 滤波器, 如图 38 所示。该滤波器包含 138 个通孔, 使用 Ferro A6M 标准 LTCC 工艺加工, 具体参数可参阅文献 [11] 和 [24], 电磁仿真自由度为 1 313 309, 热仿真自由度为 191 542, 应力仿真自由度为 574 626。滤波器底部设有热对流边界和固定约束。

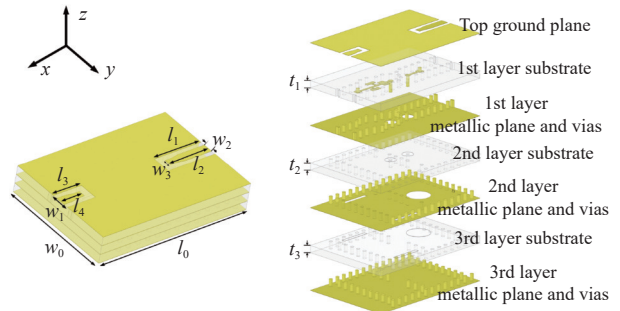


图 38 K 波段 LTCC 滤波器^[11]
 Fig. 38 K-band LTCC filter^[11]

1) 瞬态分析。为模拟滤波器的瞬态多物理场效应, 在输入端口处设置一个功率为 10 W、频率为 28 GHz 的波端口。图 39 为 LTCC 滤波器各层的电场分布情况, 图 40 为滤波器在不同时刻的温度分布, 图 41 为不同时刻各层上的 von Mises 应力分布情况。可以看出, 应力集中在通孔周围。

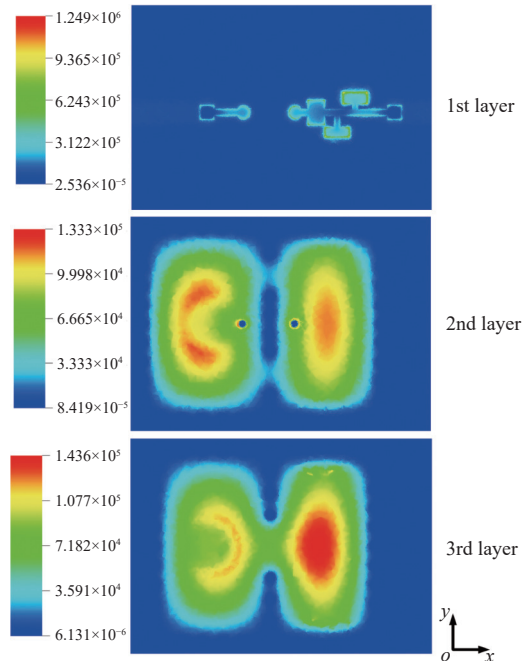


图 39 LTCC 滤波器每层的电场分布 (单位: V/m)^[11]
 Fig. 39 Distributions of the electric field magnitude in each layer of the LTCC filter (Unit: V/m)^[11]

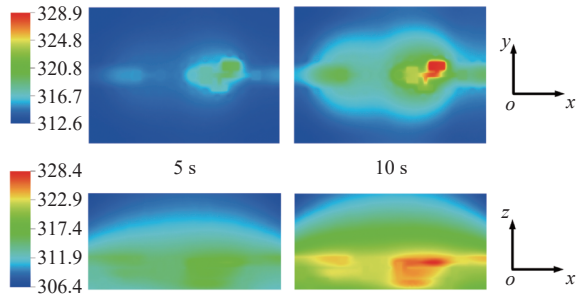


图 40 LTCC 滤波器在不同时刻的横截面(上)和纵截面(下)的温度曲线(单位: K)^[41]

Fig. 40 Temperature profiles (Unit: K) of the LTCC filter on cross section (upper) and longitudinal section (lower) at different times^[41]

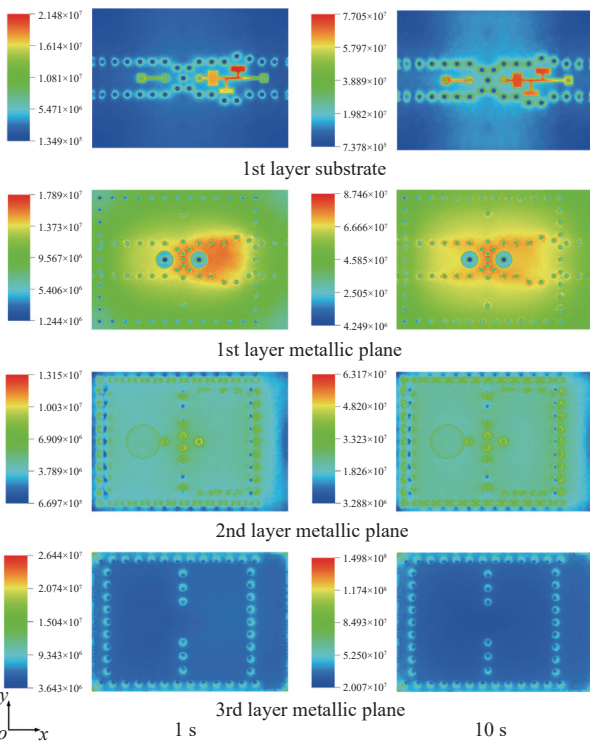


图 41 LTCC 滤波器在 1 s 和 10 s 处不同横截面上的范氏应力分布(单位: N/m²)^[41]

Fig. 41 Von Mises stress profiles (Unit: N/m²) of the LTCC filter on different cross sections at 1 s and 10 s^[41]

2) 热稳态分析: 对 26~30 GHz 区间内均匀分布的 41 个频点进行时域电磁-热-应力耦合仿真, 并记录到达热稳态时的多物理场结果。10 W 功率注入下热稳态下的 S 参数如图 42 所示, 可以看出非线性多物理场效应引发了 LTCC 滤波器通带的不均匀偏移。

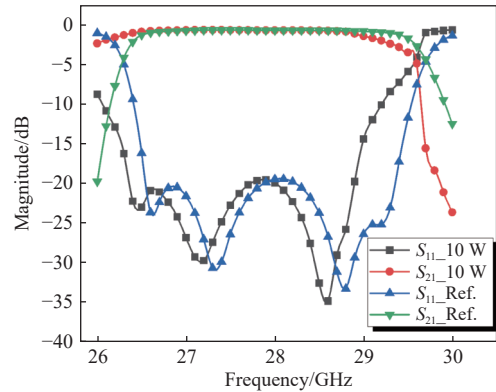


图 42 10 W 输入下 LTCC 滤波器的 S 参数漂移(室温下的 S 参数作为参考)^[41]

Fig. 42 The LTCC filter: S parameter drift with 10 W input (S parameter at room temperature as a reference)^[41]

2.2.5 SIW 滤波器电磁-热耦合分析

文献 [6] 中使用一个 SIW 滤波器作为算例, 结合 FETI 技术, 实现了电磁-热耦合高效模拟。热分析中的热源是滤波器的介电损耗, 由介质基板材料的损耗角正切和工作频率下的场分布决定。图 43 给出了该工作计算得到的滤波器温度分布。同时, 也给出了工作频率为 6.5 GHz、输入功率为 1 W 时的耗散功率分布, 如图 44 所示。而图 45 展示了不同输入功率注入下滤波器最大温度随时间的变化, 输入功率每增加 20 W 时, 温度升高超过 10 K。图 46 给出了滤波器在热稳态时的 S 参数, 在输入功率 100 W、介电常数的温度系数设置为 300 ppm/K 时, 可观察到 40 MHz 的频率偏移, 而当温度系数设为 500 ppm/K 时, 滤波器通带减小了 30 MHz。

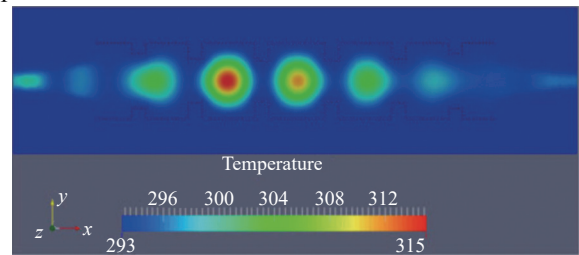


图 43 6.5 GHz 40 W 功率注入 39 s 时 SIW 滤波器温度分布^[6]

Fig. 43 Temperature profiles of the SIW filter with an input power of 40 W and 6.5 GHz at 39 s^[6]

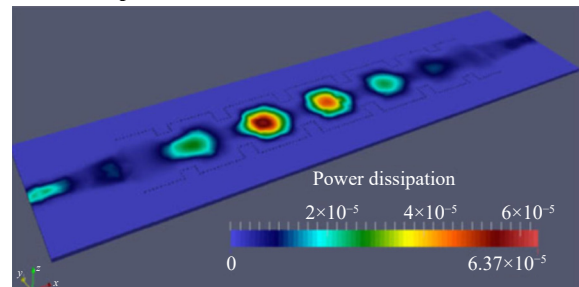


图 44 6.5 GHz 1 W 功率下 SIW 滤波器耗散功率分布^[6]

Fig. 44 Power dissipation of the SIW filter with an input power of 1 W and at 6.5 GHz^[6]

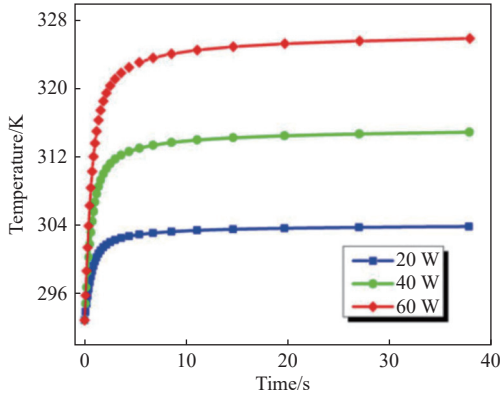


图 45 6.5 GHz 时不同功率注入下最大温度随时间的变化^[6]
 Fig. 45 Maximum temperature vs. time with different power levels at 6.5 GHz^[6]

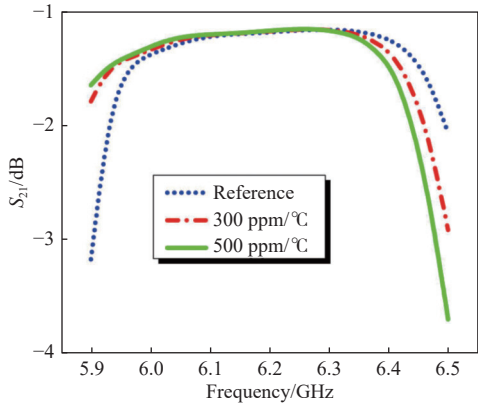


图 46 SIW 滤波器的通带随温度的变化^[6]
 Fig. 46 Passband of the SIW filter vs. temperature^[6]

2.2.6 集成微流道冷却的电子器件多物理场分析

文献 [27] 基于 FEM 开发了一种基于多物理场的联合仿真技术, 用于模拟具有集成微流道冷却的三维高频集成电路。其中涉及的物理场包括全波电磁、流体和热。仿真结构如图 47 所示, 由上一节的 SIW 滤波器和集成微流道组成。

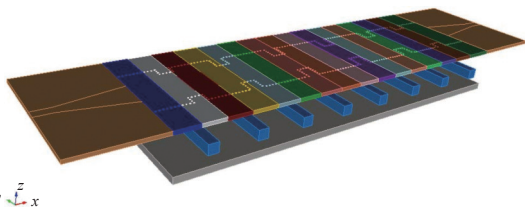
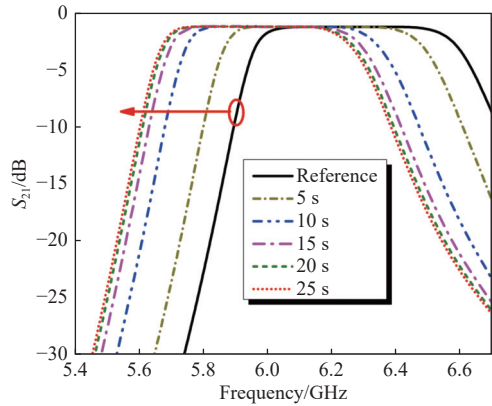


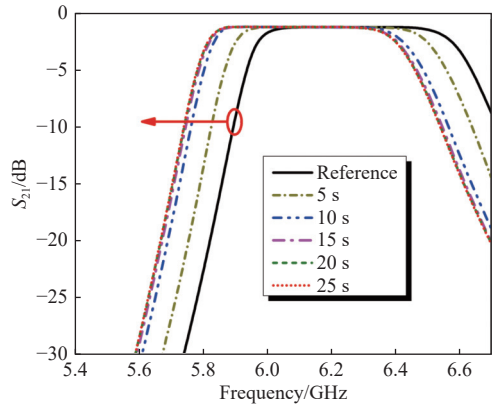
图 47 包含 SIW 滤波器和集成微通道的三维几何结构^[27]
 Fig. 47 Geometry of a 3-D structure including an SIW filter and integrated microchannels^[27]

图 48 (a) 为不加装微流道结构时滤波器的通带漂移, 随着温度升高, 滤波器通带向较低频率移动。在 25 s 时, 滤波器到达热稳态, 最大偏移量为 0.3

GHz。而滤波器集成微通道后, 可改善其散热效果, 如图 48 (b) 所示, 滤波器通带的偏移量减小到 0.15 GHz。



(a) 不加装微流道
 (a) Without integrated microchannels



(b) 集成微流道
 (b) With integrated microchannels

图 48 稳态时 SIW 滤波器的通带漂移^[27]
 Fig. 48 Passing band drift of the SIW filter^[27]

2.2.7 真实 SiP 结构电磁-热-应力特性仿真^[11,24]

文献 [11] 实现了一个真实 SiP 结构的多物理场模拟。该结构由五层 Rogers RO4350 介质板组成, 如图 49 所示, 采用铜材料进行层间互连, 整体包含 1 450 个实体部件。为实现该复杂模型的精确模拟, 借助高性能计算的强大能力, 在 Pluto2 超级计算机上调用 40 个计算节点共 1 120 个 CPU 内核完成。在结构底部设置了热对流边界和固定约束边界, 以反映真实的操作环境。图 50 是计算得到的不同时刻不同层上的应力分布情况, 图 51 为不同时刻 SiP 结构中的温度分布。该工作所提出的仿真方法不仅可以为 SiP 的热管理和机械稳定性分析提供重要支撑, 也具备利用高性能计算资源处理大规模多物理场仿真任务的能力。

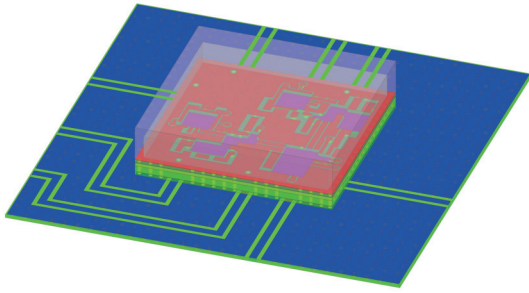


图 49 真实 SiP 示意图^[11]

Fig. 49 Schematic view of the real-world SiP^[11]

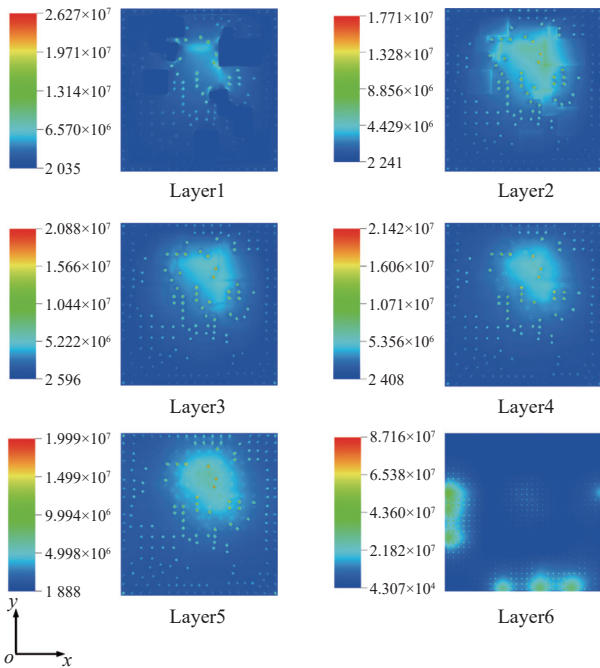


图 50 热稳态时真实 SiP 不同层的范氏应力分布 (单位: N/m^2)^[11]

Fig. 50 Von Mises stress distributions of real SiP at different layers in thermal steady-state (Unit: N/m^2)^[11]

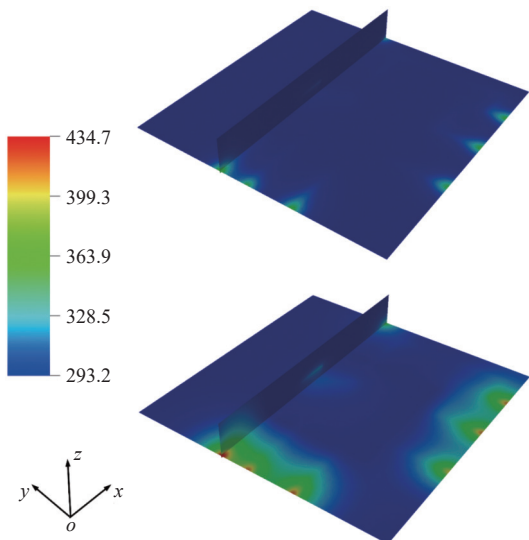


图 51 真实 SiP 5 s (上) 和 18 s (下) 的温度分布 (单位: K)^[11]

Fig. 51 Temperature distributions of real SiP at 5 s (upper) and 18 s (lower) (Unit: K)^[11]

3 总结与展望

本文回顾了电(磁)-热-应力耦合大规模并行仿真方法。国内外研究团队通过集成超大规模并行计算框架和 DDM, 提高了多物理场仿真的效率, 增强了多物理场仿真并行可扩展性, 可支撑复杂电子系统在 HPM 辐照下多物理场效应的精确模拟。在已出现的论文报道中, 各国学者使用自研求解器, 分析了键合线阵列在不同脉冲注入下的多物理场响应; 研究了复杂 SiP 结构在梯形脉冲注入下的电-热-应力耦合效应; 模拟了多种不同波段的微波滤波器在 HPM 注入下的电磁-热-应力耦合效应, 并成功观察到了高功率注入下滤波器产生的频带漂移现象; 仿真获得了真实 SiP 结构在热稳态下的温度和应力分布。

然而, 在多物理场求解中, 各场的分布规律和离散矩阵性质差距极大, 多物理方程计算代价存在“短板效应”, 在未来的工作中亟需研究电(磁)-热-应力“网格级”耦合算法和自适应网格调控技术; 另一方面, 目前已报道的电(磁)诱导的多物理场耦合数值方法, 通常需要分别求解各个物理量, 并反复迭代至稳态, 随着模型复杂度不断提高, 多次求解这类大规模问题需要消耗大量的时间和内存, 亟需开发高效的专用矩阵求解器和耦合迭代加速技术。

参考文献

- [1] PAYNE K, XU K, CHOI J H, et al. Multiphysics analysis of plasma-based tunable absorber for high-power microwave applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(11): 13.
- [2] NEUBER A A, EDMISTON G F, KRILE J T, et al. Interface breakdown during high-power microwave transmission[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2007, 43(1): 496-500.
- [3] SUN B, WANG Y, FENG H, et al. Fast uncertainty quantification by sparse data learning from multiphysics systems[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2023, 71(10): 4267-4281.
- [4] ZHAN Q, FANG Y, ZHUANG M, et al. Stabilized DG-PSTD method with nonconformal meshes for electromagnetic waves[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(6): 4714-4726.
- [5] LU T, JIN J M. Coupled electrical-thermal-mechanical simulation for the reliability analysis of large-scale 3-D interconnects[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2017, 7(2): 229-237.

- [6] LU T, JIN J M. Electrical-thermal co-simulation for analysis of high-power RF/microwave components[J]. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 2017, 59(1): 93-102.
- [7] LU T, JIN J M. Thermal-aware high-frequency characterization of large-scale through-silicon-via structures[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2014, 4(6): 1015-1025.
- [8] XIE J, SWAMINATHAN M. Electrical-thermal co-simulation of 3D integrated systems with micro-fluidic cooling and Joule heating effects[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2011, 1(2): 234-246.
- [9] XIE J, SWAMINATHAN M. Electrical-thermal cosimulation with nonconformal domain decomposition method for multiscale 3-D integrated systems[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2013, 4(4): 588-601.
- [10] XIE J, SWAMINATHAN M. System-level thermal modeling using nonconformal domain decomposition and model-order reduction[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2014, 4(1): 66-76.
- [11] ZHANG H X, ZHAN Q, HUANG L, et al. A scalable HPC-based domain decomposition method for multiphysics modeling of RF devices[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2021, 11(12): 2158-2170.
- [12] 童杰. 先进集成封装中多物理效应的高性能仿真方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- TONG J. Research on high-performance simulation methods for multi-physics effects in advanced integrated packaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [13] NEDELEC J C. Mixed finite elements in \mathbb{R}^3 [J]. *Numerische mathematik*, 1980, 35(3): 315-341.
- [14] ZHANG H X, ZHAN Q, HUANG L, et al. Multiphysics computing of challenging antenna arrays under a supercomputer framework[J]. *IEEE journal on multiscale and multiphysics computational techniques*, 2023, 8: 165-177.
- [15] LIU Q, MO Z, ZHANG A, et al. JAUMIN: a programming framework for large-scale numerical simulation on unstructured meshes[J]. *CCF transactions on high performance computing*, 2019, 1(1): 35-48.
- [16] TONG J, ZHU G D, HU J, et al. Study on electro-thermo-mechanical responses of bonding wires arrays used for the package design of LDMOSFET-based RF amplifier[C]//2016 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems (EDAPS). Honolulu: IEEE, 2016: 211-213.
- [17] ZHU G, TONG J, WANG D, et al. Parallel simulation of electromagnetic and thermal characteristic in RF component[C]//2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS), 2017.
- [18] TONG J, ZHU G D, HU J, et al. Massively parallel simulation of multi-physics effects in sip using high-performance computing scheme[C]//2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS), 2017.
- [19] ZHANG H X, ZHOU L, ZHAO Z G, et al. Parallel multiphysics simulation for characterizing performance degradation of RF components[C]//2019 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). IEEE, 2019: 1-4.
- [20] ZHANG H X, HUANG L, WANG W J, et al. Massively parallel electromagnetic-thermal cosimulation of large antenna arrays[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(9): 1551-1555.
- [21] 王晓鹏. 先进三维集成电路(3D-IC)中硅通孔(TSV)和氮化镓(GaN)场效应管中的电-热-力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- WANG X P. Study on the electro-thermal-mechanical characteristics of through silicon vias (TSV) and gallium nitride (GaN) field effect transistors in advanced three-dimensional integrated circuits (3D-IC) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [22] SHAO Y, PENG Z, LEE J F. Multi-physics analysis of high-power ICs using non-conformal domain decomposition method[C]//2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Torino, Italy: IEEE, 2011: 1058-1061.
- [23] 王大伟. 异质集成结构中多物理耦合过程建模、大规模并行数值模拟方法与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- WANG D W. Modeling and large-scale parallel numerical simulation methods of multiphysics coupling processes in heterogeneous integrated structures and their applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [24] 张浩轩. 射频器件和大型相控阵天线中多物理场高性能计算方法及应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- ZHANG H X. Research on high performance computing methods and applications of multiphysics fields in RF devices and large phased array antennas[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022. (in Chinese)
- [25] HUANG X L, ZHOU L, YUAN Y, et al. Quintuple-mode W-band packaged filter based on a modified quarter-mode

- substrate-integrated waveguide cavity[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2019, 9(11): 2237-2247.
- [26] JIN J, ZHAO W S, WANG D W, et al. Multiphysics characterization of polymer-filled through-silicon vias (PFTSVs) for three-dimensional integration[J]. *International journal of numerical modelling: electronic networks, devices and fields*, 2018, 31(4): e2348.
- [27] LU T, ZHANG F, JIN J M. Multiphysics simulation of 3-D ICs with integrated microchannel cooling[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2016, 6(11): 1620-1629.

作者简介

张浩轩 (1995—), 男, 江西人, 浙江大学信息与电子工程学院博士后, 上海交通大学博士, 研究方向为多物理场数值模拟技术。E-mail: haoxuanzhang@zju.edu.cn

王寅达 (1998—), 男, 安徽人, 浙江大学信息与电子工程学院博士生, 研究方向为多物理计算及其优化技术。E-mail: vwang@zju.edu.cn

詹启伟 (1991—), 男, 福建人, 浙江大学百人计划研究员、博导, 浙江大学信电先进技术研究中心主任、电子工程系副主任, 美国杜克大学电子与计算机工程系博士、中国科学技术大学理学学士、美国Oden 计算工程与科学研究院 O'Donnell Fellow, 研究方向为跨尺度多物理先进计算、智能设计理论与应用、工业仿真软件研发。Email: qwzhan@zju.edu.cn

周海京 (1970—), 男, 江苏人, 北京应用物理与计算数学研究所室主任, 研究员, 中物院高性能数值模拟软件中心首席专家, 研究方向为高功率电磁学及计算电磁学的应用。E-mail: zhou_haijing@iapcm.ac.cn

尹文言 (1961—), 男, 江苏人, 浙江大学求是特聘教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 浙江大学电磁信息与电子集成创新研究所所长, 研究方向包括人工智能与科学机器学习算法及软件开发、电磁与多物理仿真软件开发与应用、电磁兼容与电磁安全设计与应用、新型电磁/电子器件设计与三维集成封装、射频芯片与系统高性能及逆向设计应用等。E-mail: wyyin@zju.edu.cn