

电子器件热管理材料体系及其在功率电子中的应用分析

姜至杰

(山东华利电气设备有限公司, 济南 250000)

摘要:本文围绕电子器件热管理材料体系及其在功率电子中的应用展开系统研究。首先分析了电子管、晶体管及功率放大器等典型电子器件的热产生机理;其次基于傅里叶热传导定律建立了热传导控制方程与热阻网络模型;在此基础上,系统研究了高导热金属材料、陶瓷材料、碳基材料及热界面材料的热物理特性及其在电子封装中的应用机制;进一步结合有限元数值仿真方法,对电子器件的温度场分布进行了分析;最后探讨了典型散热结构设计及热失效机理,并对未来高性能热管理材料与多物理场耦合设计的发展方向进行了展望。研究表明,电子器件热管理的核心在于降低界面热阻、优化热传导路径以及构建多尺度协同散热体系。本文研究成果可为高功率电子器件的热设计与材料优化提供理论依据与工程参考。

关键词:电子器件;热管理;热传导;热界面材料;功率电子;有限元仿真;热阻模型;散热结构

Thermal Management Materials for Electronic Devices and Their Applications in Power Electronics

JIANG Zhijie

(Shandong Huali Electric Equipment Co., Ltd., Ji'nan 250000, China)

Abstract:This paper systematically investigates the thermal management material system of electronic devices and its applications in power electronics. First, the heat generation mechanisms of typical devices such as vacuum tubes, transistors, and power amplifiers are analyzed. Based on Fourier's law of heat conduction, the heat transfer governing equations and thermal resistance network models are established. Subsequently, the thermal properties and application mechanisms of high-thermal-conductivity metals, ceramics, carbon-based materials, and thermal interface materials are studied in detail. Finite element simulation methods are then employed to analyze the temperature distribution in electronic devices. Finally, typical heat dissipation structures and thermal failure mechanisms are discussed, and future development trends of advanced thermal management materials and multiphysics coupled design are presented. The results indicate that the core of thermal management in electronic devices lies in reducing interface thermal resistance, optimizing heat conduction paths, and constructing multiscale synergistic thermal dissipation systems. This work provides theoretical guidance and engineering references for thermal design and material optimization of high-power electronic devices.

Key words:Electronic devices; thermal management; heat conduction; thermal interface materials; power electronics; finite element simulation; thermal resistance model; heat dissipation structure

1 引言

1.1 研究背景

随着信息技术与电力电子技术的快速发展,电子器件正朝着高频化、高功率密度化以及高度集成化方向不断演进。在现代电力转换系统、通信基站、航空航天电子设备以及新能源发电装置中,功率电子器件承担着能量变换与信号处理的核心功能,其性能直接决定整个系统的效率与可靠性。

在这一发展过程中,电子器件的结构尺度不断缩小,而单位体积内的功率密度却显著提升。这一矛盾导致器件内部的热生成速率急剧增加,使得热管理问题逐渐从传统的辅助工程问题转变为制约器件性能的核心瓶颈之一。尤其是在高频开关与大电流工作条件下,器件内部的局部温升现象愈发显著,形成严重的热集中区域,进而影响器件

的电学性能与使用寿命。

从发展历程来看,电子器件经历了电子管、晶体管以及现代宽禁带半导体器件三个主要阶段。电子管器件虽然体积较大,但其热源分布相对均匀,主要依赖结构尺度实现自然散热;晶体管的出现标志着电子器件进入微型化时代,其热源集中于PN结区域,导致局部热流密度大幅增加;进入功率放大器与射频微波器件阶段后,由于高频信号与大功率耦合效应,热损耗进一步复杂化,呈现出多物理场耦合特征。

在此背景下,热管理材料体系的重要性日益凸显。通过优化材料的热导率、界面热阻以及结构匹配性,可以有效改善器件内部热传导路径,从而降低结温并提升整体可靠性。因此,从材料体系角度研究电子器件的热管理问题具有重要的理论意义与工程应用价值。

1.2 研究意义

电子器件中的热问题本质上是电能向热能不可逆转化的过程。在实际工程应用中,过高的工作温度不仅会导致器件性能退化,还会引发一系列失效模式,包括热击穿、电迁移、材料老化以及封装失效等问题。

研究表明,在电子器件失效模式中,约50%至60%的失效与热相关因素直接相关。因此,降低器件结温成为提升系统可靠性与延长使用寿命的关键路径。

从材料科学角度来看,热管理的核心在于构建高效的热传导网络,包括:高导热路径材料(如铜、铝及金刚石复合材料),电绝缘高导热陶瓷材料(如AlN),碳基高导热各向异性材料(如石墨片、碳纳米管)和降低界面热阻的热界面材料(Thermal Interface Materials, TIM)。

这些材料在电子封装与功率模块中的合理配置,直接决定热流的传递效率。因此,对热管理材料体系进行系统分析,不仅可以揭示热传导的内在机理,还能够为新一代高功率电子器件设计提供理论依据。[1-3]

1.3 国内外研究现状

近年来,国内外学者围绕电子器件热管理问题开展了大量研究,主要集中在以下几个方向:

(1) 高导热材料研究

在传统金属材料方面,铜与铝仍然是应用最广泛的导热材料。然而,由于其热膨胀系数较高,在高功率密度封装中容易引发热应力失配问题。因此,研究者逐渐将目光转向金属基复合材料(MMC)以及超高导热材料体系,如金刚石增强铜复合材料。

此外,碳基材料由于其优异的声子导热特性,成为近年来的研究热点。其中石墨烯、碳纳米管以及高度取向石墨片在导热界面增强方面表现出优异性能。

(2) 陶瓷封装材料发展

陶瓷材料在电子封装中的应用主要体现在高导热与电绝缘兼顾方面。氮化铝(AlN)由于其较高热导率(可达170-220 W/m·K)以及良好的电绝缘性能,被广泛应用于高功率模块封装。

相比之下,氧化铝(Al₂O₃)虽然成本较低,但热导率较低,通常用于中低功率器件封装。

(3) 热界面材料研究进展

热界面材料(TIM)是连接芯片与散热结构之间的重要桥梁,其性能直接影响整体热阻水平。目前研究主要集中在以下方向:纳米颗粒增强型导热硅脂,相变材料(PCM),金属焊料型TIM和液态金属TIM(如Ga-In-Sn体系)。其中液态金属因其极低接触热阻而受到广泛关注,但其腐蚀性与稳定性问题仍需进一步研究。

(4) 系统级热管理技术

在系统层面,热管理技术已从单一材料优化发展为结构与材料协同设计,包括:微通道液冷技术,两相流沸腾冷却,热管与均热板技术和多尺度热仿真优化设计。这些方法显著提升了高功率电子系统的散热能力。

1.4 研究内容与技术路线

本文围绕电子器件热管理材料体系展开系统研究,主要包括以下几个方面:

- (1) 分析电子管、晶体管及功率放大器的热产生机理与热分布特征;
- (2) 建立基于傅里叶热传导理论的热阻网络模型;
- (3) 系统研究高导热金属、陶瓷及碳基材料的热性能特点;
- (4) 分析热界面材料对整体热阻的影响机制;
- (5) 结合有限元仿真方法,对典型功率电子模块进行热场分析;
- (6) 探讨未来高性能热管理材料的发展方向。

2. 电子器件热产生机理

电子器件中的热问题本质上来源于电能在非理想条件下向热能的不可逆转化过程。在不同类型的电子器件中,由于其工作原理、结构尺度及载流机制的差异,其热产生机制呈现出显著不同的特征。本章从电子管、晶体管以及功率放大器三个典型类别出发,系统分析其热源形成机制及热分布规律,为后续热管理材料与结构设计提供理论基础。[4,5]

2.1 电子管的热产生机理

电子管(Vacuum Tube)是一种基于真空环境中电子发射与加速原理工作的电子器件,其结构通常包括阴极、阳极(板极)以及控制栅极等部分。在电子管工作过程中,热能的产生主要来源于以下三个方面:

(1) 阴极加热功耗

电子管需要通过加热阴极使其达到热电子发射条件,该过程依赖外加电流对阴极进行持续加热。阴极加热功耗可以表示为:

$$P_{heater} = I_h^2 R_h \quad (1)$$

其中:

I_h : 灯丝电流

R_h : 灯丝电阻

该部分功耗通常占电子管总功耗的较大比例,是电子管系统中最主要的初始热源。

(2) 热电子发射损耗

在高温条件下,阴极表面电子获得足够能量克服逸出功,从而形成热电子发射过程。该过程可由热电子发射描述,其电流密度满足理查森-杜什曼方程:

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (2)$$

其中:

J : 发射电流密度

A : 理查森常数

ϕ : 逸出功

k : 玻尔兹曼常数

T : 绝对温度

该过程本身伴随着能量损耗,并在阴极区域形成持续

热负荷。

(3) 阳极轰击热

电子在电场作用下从阴极加速飞向阳极，在碰撞阳极材料时动能转化为热能，从而产生阳极轰击热。其功率可表示为：

$$P_a = V_a I_a \quad (3)$$

其中：

V_a ：阳极电压

I_a ：阳极电流

由于电子获得高能量后集中撞击阳极表面，该部分热量高度集中，是电子管局部过热的重要来源。

(4) 电子管热特性总结

电子管的热特征可以概括为：体热源分布（阴极+阳极整体发热），真空环境导致对流散热缺失，主要依赖辐射与结构传导散热，热惯性大但温度梯度相对平缓。因此，电子管在热设计中通常依赖大尺度金属结构与水冷系统进行散热控制。[6,7]

2.2 晶体管的热产生机理

晶体管（Transistor）是现代电子系统的核心器件，包括BJT、MOSFET以及IGBT等多种结构形式。与电子管不同，晶体管的热源高度集中于微观半导体结区域，具有典型的微尺度热源特征。

(1) 导通损耗与焦耳热

晶体管在导通状态下，电流通过导电沟道或PN结区域时产生焦耳热效应，其基本表达式为：

$$P_{cond} = I^2 R_{on} \quad (4)$$

其中：

I ：导通电流

R_{on} ：导通电阻

在功率MOSFET中，导通电阻随温度升高而增大，从而形成正反馈效应，加剧热积累。

(2) 开关损耗

在开关过程中，晶体管并非理想瞬时导通或关断，而是存在电压与电流重叠区域，产生显著能量损耗。其开关损耗可表示为：

$$P_{sw} = \frac{1}{2} V I (t_r + t_f) f \quad (5)$$

其中：

t_r ：上升时间

t_f ：下降时间

f ：开关频率

随着功率电子器件向高频方向发展，该部分损耗占比显著上升。

(3) 漏电流损耗

在高温或高电压条件下，半导体器件存在反向漏电流：

$$P_{leak} = V \cdot I_{leak} \quad (6)$$

该部分损耗虽然较小，但在高温环境下呈指数增长，是热失控的重要诱因之一。[8]

(4) 晶体管热分布特征

晶体管的热分布具有以下特点：热源集中于PN结或沟道区域，热流呈三维扩散，存在明显“热点效应”，热-电耦合显著（温度影响电阻与载流能力）。因此晶体管的热设计必须采用多尺度建模方法。

2.3 功率放大器的热产生机理

功率放大器（Power Amplifier, PA）广泛应用于通信、雷达及射频系统，其工作频率通常处于MHz至GHz范围。在该类器件中，热损耗机制更为复杂，表现为电磁场与热场的强耦合系统。[9]

(1) 导通与饱和损耗

功率放大器中的晶体管通常工作在线性区间，其损耗包括导通损耗与饱和损耗：

$$P_{total} = P_{cond} + P_{sat} \quad (7)$$

由于输出信号幅度较大，器件长期工作在线性区间，导致效率下降并产生额外热量。

(2) 高频趋肤效应

在高频电流作用下，电流趋于导体表面分布，该现象称为趋肤效应。

其有效导电截面积减少，等效电阻增加：

$$R_{eff} \propto \frac{1}{\delta} \quad (8)$$

其中：

δ ：趋肤深度

因此在高频条件下，额外焦耳热显著增加。

(3) 电磁损耗

功率放大器中还存在由电磁场辐射与寄生电容/电感引起的损耗，包括：介质损耗，互连损耗，辐射损耗。这些损耗最终均以热形式释放。

(4) 功率放大器热特点

其热特征总结如下：面热源分布（非点热源），高频损耗显著，热-电-磁多物理耦合，热密度高（可达W/mm²级）。

2.4 三类器件热机理对比分析

表1 热机理对比

特性	电子管	晶体管	功率放大器
热源类型	体热源	点热源	面热源
主要机制	阴极加热/阳极轰击	焦耳热/开关损耗	高频损耗/趋肤效应
热分布	均匀	局部热点	非均匀分布
散热方式	辐射+水冷	传导+散热片	液冷+微通道
热复杂度	低	中	高

3 基于傅里叶热传导理论的热阻网络模型构建

3.1 傅里叶热传导核心理论

稳态导热工况下，电子器件内部的热量传递遵循傅里叶热传导定律，该定律是电子热管理、热阻建模的核心理论基础，精准描述了均质介质中热量的传导规律。其核心公式为：

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

式中： Q 为热传导功率（W）； λ 为材料导热系数（W/

($\text{m} \cdot \text{K}$)； A 为导热截面积(m^2)； dT/dx 为沿导热方向的温度梯度(K/m)；负号表示热量由高温区域向低温区域传递。[10]

在电子器件多层结构导热体系中，热量由芯片产热区出发，依次通过芯片基体、封装层、热界面材料、散热基板、散热器等多层介质，完成热量传递与耗散。结合热传导基本规律，可将多层导热结构等效为串联热阻网络，通过量化各层级热阻，实现系统整体传热特性的精准表征。[11]

3.2 热阻网络模型参数定义

热阻是表征介质阻碍热量传递能力的核心参数，定义为热量传递过程中的温度差与热流功率的比值，单位为 K/W 。对于均质平板介质，稳态导热热阻计算公式为：

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (10)$$

式中： R 为介质导热热阻(K/W)； δ 为介质厚度(m)； λ 为介质导热系数($\text{W/(m} \cdot \text{K)}$)； A 为有效导热面积(m^2)。

功率电子器件散热系统为典型多层串联结构，整体热阻由各层级体热阻与界面接触热阻共同组成，主要包括芯片体热阻、封装介质热阻、热界面材料热阻、基板热阻、界面接触热阻、散热器对流热阻等。多层串联体系的整体热阻满足叠加原理，总热阻为各分项热阻之和。[12]

3.3 功率器件热阻网络模型搭建

结合功率电子器件的实际散热路径，构建标准化串联热阻网络模型，完整散热路径为：芯片产热区→芯片基体→芯片与封装界面→封装层→封装与热界面材料界面→热界面材料→散热基板→基板与散热器界面→散热器→空气对流散热。[13]

基于该路径，建立系统总热阻模型：

$$R_{\text{total}} = R_{\text{chip}} + R_{\text{pack}} + R_{\text{tim}} + R_{\text{sub}} + R_{\text{conv}} + \sum R_{\text{int}} \quad (11)$$

式中： R_{total} 为系统总热阻； R_{chip} 为芯片体热阻； R_{pack} 为封装层热阻； R_{tim} 为热界面材料热阻； R_{sub} 为散热基板热阻； R_{conv} 为散热器对流换热热阻； $\sum R_{\text{int}}$ 为各层级界面接触热阻总和。

该模型可精准量化不同结构、不同材料对系统散热性能的影响，通过代入各类热管理材料的导热系数、厚度、接触面积等参数，可实现热阻的定量计算，为材料选型、结构优化、散热性能预判提供数学支撑。模型核心特征为：体热阻由材料本身导热性能与结构尺寸决定，界面热阻由界面贴合度、热界面材料性能主导，是系统热阻优化的核心突破口。

4. 主流热管理材料热性能特点及适配性研究

功率电子系统的散热性能核心取决于热管理材料体系的综合性能，不同类型热管理材料的导热机制、微观结构、热学稳定性、力学特性及工艺适配性存在本质差异。当前工程应用中已形成高导热金属材料、绝缘陶瓷材料、碳基超高导热材料三大核心体系，三类材料各司其职、

性能互补，分别适配散热结构承载、绝缘导热封装、超高热流密度散热等不同工况场景。为实现高功率电子器件精准热设计、解决差异化散热痛点，本章从材料微观导热机理、关键热学参数、力学性能、温度稳定性、工艺特性及工程适配场景等维度，对三类主流热管理材料进行全方位系统性分析，明确各类材料的应用优势、短板及优化空间，为功率电子热管理材料的精准选型与体系化搭配提供理论与工程依据。[14,15]

4.1 高导热金属材料

高导热金属材料是功率电子热管理领域产业化最成熟、应用范围最广的基础结构型导热材料，核心包含纯铜、纯铝及铜铝基合金复合材料。金属材料依靠自由电子运动实现热量快速传导，具备导热速率稳定、各向同性、力学承载性强、机械加工性能优异、成本可控、规模化生产成熟等核心优势，主要用于制备散热基板、整体式散热器、导热均温板、散热骨架等核心散热结构，是中低功率通用功率电子设备、消费电子、新能源工控设备的主流散热基材。相较于陶瓷与碳基材料，金属材料的核心特点是兼顾导热性能与结构力学性能，可同时承担器件承载、固定、导热、均温多重功能，是热管理体系中不可或缺的基础材料。

纯铜作为高端金属导热基材，室温下导热系数可达 $380 \sim 401 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，仅次于金刚石、石墨烯等超高导热碳基材料，热传导效率极高。铜材晶体结构致密，自由电子密度大，热量传递无明显各向异性，稳态与瞬态导热稳定性优异，可快速疏导器件局部高热流密度热量，抑制热点积聚。同时纯铜拉伸强度高、刚性好、耐高温、抗蠕变性能优异，在长期高温、高频振动的功率电子工况下，不易发生变形、开裂失效，适配轨道交通、工业变频、高压逆变等大功率、高可靠应用场景。但纯铜存在显著短板，材料密度高达 8.9 g/cm^3 ，自重较大，不利于航空航天、便携式功率设备等轻量化场景应用；同时铜材高温环境下易氧化生成氧化铜钝化层，氧化层导热系数极低，长期服役会导致界面热阻升高，散热性能衰减，需通过电镀、抗氧化涂层改性等工艺提升稳定性。

纯铝及铝合金是轻量化热管理的核心金属材料，纯铝室温导热系数为 $200 \sim 237 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，虽导热性能仅为纯铜的60%左右，但完全满足中低功率电子器件的散热需求。铝材核心优势为轻量化，密度仅 2.7 g/cm^3 ，为铜材的1/3，可大幅降低散热结构整体重量；同时铝材塑性极佳，可通过挤压、压铸、折弯、冲压等多种工艺制备异形、多孔、鳍片式复杂散热结构，成型精度高、生产效率高、成本低廉，适配批量产业化应用。纯铝短板在于力学性能偏弱，硬度低、抗变形能力差，高温工况下易发生塑性变形，且耐腐蚀性、抗氧化性不足，长期湿热、高温环境下易出现表面腐蚀，影响界面贴合精度与散热稳定性。为弥补纯铝性能缺陷，工程中广泛采用6063、7075等改性铝合金，通过添加镁、硅、锌等微量元素，在保留铝材优异导热性与成型性的基础上，大幅提升材料硬度、抗变形能力与耐腐蚀

性,广泛应用于新能源汽车车载功率模块、光伏逆变器、民用功率放大器等设备。[16]

铜铝复合金属材料是近年来快速普及的新型导热结构材料,通过真空扩散焊、钎焊复合工艺将铜与铝结合为整体结构,兼顾铜材高导热、高可靠与铝材轻量化、低成本的优势,规避单一金属材料性能短板。复合结构中,铜层贴合器件发热核心区域,保障高热流密度快速导热,铝层作为主体散热结构实现轻量化散热,整体散热效率接近纯铜结构,重量与成本大幅降低,完美适配新能源、工控设备的轻量化、高散热需求。从工程适配性角度总结,金属导热材料整体产业化成熟度高、导热均匀稳定、无各向异性缺陷、力学可靠性强,但固有绝缘性能缺失,无法直接贴合半导体芯片实现绝缘导热,必须搭配绝缘陶瓷垫层、热界面绝缘材料使用,仅适用于非绝缘散热结构场景,这也是金属材料在高端精密功率封装中无法单独应用的核心短板。[17]

4.2 陶瓷材料

陶瓷热管理材料是功率电子封装领域专用的绝缘导热功能材料,完美弥补了金属材料绝缘性能不足的核心缺陷,是连接半导体芯片与散热结构的核心封装基材。主流商用导热陶瓷材料包括氧化铝(Al_2O_3)、氮化铝(AlN)、氮化硅(Si_3N_4)三类,均具备高绝缘电阻率、高击穿电压、耐高温、低热膨胀系数、化学稳定性强、无氧化失效风险等优势,可直接贴合功率芯片实现绝缘、导热、承载一体化功能,是IGBT、MOSFET、SiC/GaN宽禁带功率器件高端封装的核心材料。陶瓷材料的导热机制区别于金属材料,依靠晶格声子振动传递热量,无自由电子导热,因此兼具绝缘与导热双重特性,且导热性能不受电场干扰,适配高压、高频功率电子工况,力学稳定性与热稳定性远优于高分子材料,是高可靠功率电子热管理体系的核心绝缘导热基材。

氧化铝陶瓷是产业化时间最早、应用最普及、性价比最高的导热陶瓷材料,制备工艺成熟、原料成本低廉、批量生产稳定性极强。常规高纯氧化铝陶瓷室温导热系数为 $20\sim 35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,绝缘击穿电压 $\geq 15\text{ kV}/\text{mm}$,体积电阻率 $\geq 10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$,绝缘性能优异,力学硬度高、耐磨耐腐蚀、化学稳定性好,可长期在 $-40^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 的常规功率工况下稳定服役,完全满足消费电子、普通工控、低压功率器件的绝缘散热需求。但其核心短板为导热性能偏低,声子散射效应显著,高温工况下导热系数进一步衰减,无法疏导超高热流密度热量,易出现器件热点积聚,因此仅适用于中低功率、低电压、常规工况的通用功率电子设备,难以适配高压、高频、高功率密度的高端器件。

氮化铝陶瓷是中高端功率封装的主流绝缘导热材料,通过高纯氮化铝粉体烧结制备,晶格结构规整、声子传导效率高,室温导热系数可达 $180\sim 220\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,导热性能接近铝合金材料,同时保留了陶瓷材料超高绝缘的核心优势。氮化铝陶瓷热膨胀系数仅 $4.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,与硅基、碳化硅基半导体芯片热膨胀匹配度极高,可大幅降低温度循环

工况下的界面热应力,避免封装脱层、开裂失效,器件长期服役可靠性显著提升。该材料击穿电压高、耐高温、无热老化失效问题,适配工业高频逆变、光伏风电变流器、电动汽车电控模块等中高功率、高可靠工况。其短板主要体现在制备成本较高、烧结工艺难度大、成品脆性大、抗冲击性能弱,无法制备异形结构,仅能作为平板封装基板使用,且规模化良品率低于氧化铝陶瓷,限制了其大规模普及应用。

氮化硅陶瓷是目前综合性能最优的高端结构功能一体化陶瓷材料,也是极端工况功率电子封装的核心基材。氮化硅陶瓷内部晶格致密、声子传导损耗低,室温导热系数可达 $150\sim 200\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,同时具备超高力学性能,弯曲强度可达 $800\sim 1000\text{ MPa}$,断裂韧性远高于氧化铝与氮化铝陶瓷,抗热震、抗冲击、抗疲劳性能优异,可承受高频温度循环、瞬时高热冲击、机械振动等极端复杂工况。其热膨胀系数与宽禁带半导体匹配性极佳,高温下导热性能衰减幅度小,绝缘稳定性、化学稳定性极强,无老化失效风险,广泛应用于轨道交通牵引变流器、航空航天功率电源、军工高端功率模块等超高可靠、极端工况领域。现阶段氮化硅陶瓷的核心瓶颈为制备工艺复杂、生产成本极高、加工难度大,仅适配高端特种场景,难以在民用通用功率设备中普及。整体而言,陶瓷材料体系解决了功率芯片绝缘导热的核心痛点,性能梯度分明,可覆盖中低端至高端全场景封装需求,但受限于脆性大、成型性差、成本分层明显的问题,仅能作为平板基板与绝缘垫层使用,无法替代金属结构散热材料。[18,19]

4.3 碳基材料

碳基热管理材料是新一代超高导热前沿功能材料,突破了传统金属、陶瓷材料的导热性能上限,主要包括人造石墨、天然石墨、石墨烯、碳纳米管、单晶金刚石及各类碳基复合材料。碳基材料依靠碳原子共价键晶格振动与自由电子协同导热,具备超高导热系数、轻质、超低热膨胀系数、耐高温、耐腐蚀、无热老化等突出优势,是超高功率密度、高热流密度、极端工况功率电子器件的核心散热材料,也是未来高性能热管理材料的核心发展方向。相较于金属与陶瓷材料,碳基材料的导热性能具备数量级优势,可解决传统材料无法适配的超高热流密度散热瓶颈,尤其适配SiC、GaN等第三代宽禁带功率器件的高频、高温、高热流散热需求。

石墨材料是目前产业化应用最成熟的碳基导热材料,分为天然石墨与人造石墨两类,均具备显著的各向异性导热特征。人造石墨经高温石墨化处理,晶格排列规整、缺陷少,面内导热系数可达 $800\sim 1500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,远高于纯铜材料,而垂直导热系数仅 $10\sim 30\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,各向异性特征显著;天然石墨成本更低,面内导热系数为 $300\sim 800\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,性能略低于人造石墨。石墨材料密度仅 $1.9\sim 2.2\text{ g}/\text{cm}^3$,轻量化优势极为突出,同时具备良好的柔韧性与可加工性,可制备超薄柔性导热膜、均温片,适配智能手机、轻薄工控设备、柔性电子等小型化、轻量化器件的均温散

热需求。其核心短板为垂直导热能力极差，热量仅能在平面内快速扩散，无法实现纵向高效导热，且材料力学脆性大、易碎裂、防潮性差，单独使用可靠性不足，通常需要与高分子、金属材料复合使用，优化结构稳定性。

石墨烯与碳纳米管属于纳米尺度新型碳基导热材料，是高端复合热管理材料的核心改性填料。单层石墨烯理论导热系数高达 $5300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，是已知导热性能最优的二维材料，宏观石墨烯宏观薄膜与复合材料导热系数可达 $800 \sim 1200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，兼具超薄、轻质、高柔性的优势，可制备超薄导热薄膜、界面导热涂层，大幅优化器件局部散热与界面传热效果。碳纳米管轴向导热性能优异，轴向导热系数可达 $3000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，可作为微观填料填充高分子、陶瓷基体的微观孔隙，构建连续导热通路，大幅提升基体材料的导热性能。但两类纳米碳材料存在规模化制备成本高、易团聚、分散性差、界面结合力弱等问题，纯膜结构力学稳定性差、易破损，目前多作为改性填料复合使用，难以单独作为结构散热材料规模化应用。

金刚石材料是目前宏观导热性能最优的固态热管理材料，高纯单晶金刚石室温导热系数可达 $2000 \sim 2300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，远超所有金属与陶瓷材料，同时具备热膨胀系数极低、耐高温、化学惰性强、无热疲劳失效的优势，可承受 $1000 \text{ W}/\text{cm}^2$ 以上的超高热流密度冲击，是航空航天、军工雷达、高端射频功率器件等极端工况的专属散热材料。但金刚石材料加工难度极大、制备成本极高、成型性极差，无法制备复杂结构，仅能作为小型超高导热基板、导热垫块使用，产业化普及难度极大。为兼顾导热性能与工程实用性，现阶段行业重点研发碳基复合改性材料，通过石墨、石墨烯、金刚石与金属、陶瓷、高分子材料复合，弥补单一碳材料的各向异性、力学薄弱、稳定性差等短板，实现超高导热、结构稳定、低成本的综合性能，是未来碳基材料产业化落地的核心路径。

5. 热界面材料对整体热阻的影响机制分析

在功率电子多层级散热系统中，除各类基材的体热阻外，界面接触热阻是决定系统整体散热效率的核心瓶颈，也是热管理优化中最容易被忽视、影响最显著的关键参数。功率器件的芯片、封装基板、散热基材、散热器均为机械贴合装配，固体材料表面微观尺度下存在大量微米级凹凸粗糙度与孔隙，两种固体直接接触时，仅微观凸起区域可实现有效贴合传热，其余孔隙区域被空气填充。空气静态导热系数仅 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，属于极差导热介质，会在界面处形成显著的传热壁垒，导致热量无法快速跨层级传递，大量热量在芯片内部积聚，引发器件温升过高、热场不均、热疲劳失效等问题。相关试验数据表明，无热界面材料的装配工况下，多层散热结构的界面接触热阻占系统总热阻的 $50\% \sim 70\%$ ，是制约高功率器件散热性能的核心因素。热界面材料（TIM）作为填充界面微观孔隙、替代空气介质、构建连续导热通路的专用功能材料，可显著降低界面热阻、优化跨界面传热效率，同时具备缓冲热应力、减

震防护、绝缘密封等附加功能。本章系统阐述热界面材料的分类、核心性能指标、减阻传热机制，深入分析材料参数、工艺参数对系统整体热阻的影响规律，明确界面材料的选型适配原则。[20]

5.1 热界面材料的核心功能与分类

热界面材料的核心功能为填充固体贴合界面的微米级孔隙、排出界面滞留空气、搭建连续稳定的跨界面导热通道，降低界面接触热阻，强化多层结构的热量传递效率；次要功能为补偿不同基材间的热膨胀系数差异，缓冲温度循环工况下的界面热应力，避免界面脱层、开裂、翘曲失效，同时可实现器件减震、防潮、绝缘密封，提升功率模块长期服役可靠性。经过多年技术迭代，目前工程常用热界面材料已形成完整体系，根据形态、工艺、性能可分为导热硅脂、导热垫片、导热凝胶、相变导热材料、纳米复合界面材料五大类，各类材料的适配工况、性能参数、应用场景差异显著。

导热硅脂是应用最广泛的液态界面材料，由有机硅基础油掺杂氧化铝、氧化锌、氮化硼等陶瓷高导热填料复配而成，具备流动性好、填充性优异、贴合精度高、成本低廉的优势。硅脂可充分填充 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的微观界面孔隙，界面贴合率可达 95% 以上，超薄涂覆厚度可控制在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ ，界面热阻极低，稳态导热性能稳定，广泛应用于各类中高端功率器件、CPU、功率放大器的界面散热场景。但其短板为长期高温工况下易出现基础油挥发、填料沉降、干裂粉化等问题，服役寿命有限，长期使用会导致界面热阻逐年升高，散热性能衰减。[21]

导热垫片是固态柔性界面材料，由硅胶基体掺杂高导热填料压制固化而成，具备固定厚度、柔性可压缩、绝缘性好、装配便捷、无挥发失效的优势。垫片可适配大间隙、凹凸不平的粗糙界面，通过压缩形变实现紧密贴合，减震防护效果优异，无需复杂涂覆工艺，适合批量工业化装配。常规导热垫片导热系数为 $3 \sim 10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，高端改性垫片可达 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上，主要应用于大间隙、多器件集成的功率模块。其短板为最小装配厚度受限，无法实现超薄贴合，固有材料热阻高于硅脂，散热精度略低。

导热凝胶是介于硅脂与垫片之间的半固态界面材料，兼具硅脂的高填充性与垫片的稳定性，无流淌、低挥发、抗老化性能优异，可适配精密功率模块的长期稳定散热场景，是现阶段高端功率电子设备的主流界面材料。相变导热材料可在器件工作温度下发生固液相变，软化填充界面孔隙，低温固态可保障装配稳定性，高温液态强化传热，适配变工况、周期性工作的功率器件。纳米复合界面材料是前沿新型材料，通过掺杂石墨烯、碳纳米管、纳米金属填料，突破传统界面材料导热上限，实现超低界面热阻，适配超高热流密度高端器件。

5.2 热界面材料对系统热阻的调控机制

结合前文构建的多层串联热阻网络模型可知，界面接触热阻是系统总热阻的核心变量，也是热管理优化的核心突破口。热界面材料对系统散热性能的优化，主要通过孔

隙填充替代机制与高导热通路强化机制双重作用实现,同时辅以热应力缓冲机制保障长期散热稳定性,多维度调控系统整体热阻。

孔隙填充替代机制是界面材料的核心减阻原理。在无界面材料的干接触工况下,固体界面仅凸起点位有效接触,大面积孔隙被低导热空气填充,空气的极低导热系数导致界面传热受阻,形成极大的接触热阻。填充适配的热界面材料后,液态、半固态柔性材料可充分浸润、填充界面所有微观孔隙,完全替代空气介质,消除空气传热壁垒,将原本离散的点状接触转化为连续的面状接触,大幅提升界面有效传热面积,从根源上降低界面接触热阻。试验测试表明,干接触状态下功率模块界面有效接触率仅20%~30%,填充优质热界面材料后,有效接触率可提升至90%以上,界面基础传热能力大幅提升。

高导热通路强化机制进一步优化界面传热效率。传统空气介质无有效导热通路,而改性热界面材料通过掺杂高导热陶瓷、碳基、金属填料,在材料内部构建密集、连续的三维导热网络,材料自身导热系数较空气提升两个数量级以上。常规导热硅脂、凝胶导热系数可达3~12 W/(m·K),高端纳米复合界面材料可达20 W/(m·K)以上,远高于空气的0.026 W/(m·K),可实现热量在界面层的快速传导,大幅降低界面层级的热损耗,显著降低系统分项热阻。[22]

热应力缓冲机制保障系统热阻长期稳定。不同层级散热基材的热膨胀系数存在差异,温度循环工况下各结构形变程度不同,会在界面处产生周期性热应力,导致界面贴合松动、出现微间隙,引发热阻激增。热界面材料具备良好的柔性与形变能力,可缓冲不同基材的形变差异,吸收界面热应力,避免界面脱层、开裂、间隙扩大,保障界面接触状态长期稳定,防止系统热阻随服役时间增加而升高,提升功率模块长期散热可靠性。实测数据显示,优化后的热界面材料体系可使系统界面热阻降低60%~85%,整体总热阻降低40%~60%,器件稳态工作温度可降低20~40℃,散热优化效果极为显著。

5.3 热界面材料减阻效果的关键影响因素分析

热界面材料的热阻调控效果并非固定不变,受材料自身性能、结构参数、装配工艺、服役工况多重因素影响,不同参数组合下的减阻效果差异极大。明确各类影响因素的作用规律,是实现界面材料精准选型、工艺优化、热阻最优调控的关键。

材料本征导热性能是决定减阻效果的核心基础。界面材料填料种类、填充率、基体结构直接决定其导热系数,碳基、纳米填料改性的界面材料导热性能远优于传统陶瓷填料材料,高导热系数材料可构建更密集的导热通路,界面传热效率更高、热阻更低。但填料填充率并非越高越好,过高的填充率会导致材料柔性、浸润性下降,孔隙填充能力变差,反而增大界面接触热阻,存在最优填充配比区间。

界面材料厚度是影响整体热阻的关键结构参数。

根据热阻计算公式,材料体热阻与厚度成正比,在材料导热系数固定的前提下,涂覆厚度越薄,材料固有热阻越小,散热效果越好。工程应用中需在保障完全填充孔隙的前提下,尽量控制超薄厚度,常规最优厚度区间为20~100 μm,过厚会增大体热阻,过薄则无法完全填充孔隙,残留空气间隙。同时装配压力直接影响材料厚度与贴合精度,适度加压可挤压材料变薄、提升浸润性,降低总热阻;过度加压会导致材料溢出、填料挤压团聚、局部缺料,造成热阻不均、散热失效。

材料耐温性与抗老化性决定长期减阻稳定性。短期工况下各类优质界面材料均可实现良好减阻效果,但长期高温、湿热、温度循环工况下,普通硅脂易出现油分挥发、干裂粉化,垫片易出现老化硬化、形变失效,导致界面孔隙再生、热阻持续升高。而改性凝胶、相变材料、纳米复合材料抗老化、耐高温性能优异,长期服役热阻稳定性更强,适配高可靠、长寿命功率电子场景。此外,界面表面粗糙度、清洁度、材料润湿性也会影响填充效果,表面越平整、清洁度越高,材料浸润填充效果越好,界面热阻越低。[23,24]

6 基于有限元仿真的典型功率电子模块热场分析

前文通过理论建模、材料性能表征、界面机制分析,明确了热管理材料体系与界面参数对功率器件散热性能的影响规律,属于理论层面的定性分析与定量分析。为进一步验证理论研究的准确性,量化不同材料体系的实际散热优化效果,直观呈现器件热场分布、热点温度、热梯度、热应力分布特征,本文采用有限元仿真分析方法,以工业应用最广泛的IGBT功率模块为典型研究对象,建立多物理场仿真模型,开展稳态热场与瞬态热场仿真对比分析。通过设置多组差异化材料体系对照工况,模拟传统、中端、高端三类热管理方案的实际散热效果,精准量化材料升级、界面优化对器件热性能的提升幅度,为功率电子热管理材料体系的工程选型与结构优化提供仿真数据支撑。

6.1 仿真模型与参数设置

本次仿真基于ANSYS Workbench有限元仿真平台的Steady-State Thermal与Transient Thermal模块开展,仿真对象为商用600V/200A典型IGBT功率模块,该模块广泛应用于光伏逆变、工业变频、新能源汽车电控等领域,具备代表性强、工况典型、结构标准化的特点。基于模块实际物理结构建立三维仿真模型,完整保留核心传热结构,从上至下依次为IGBT芯片、续流二极管芯片、锡银铜焊料层、陶瓷绝缘基板、铜导电层、热界面材料层、铝制散热器,忽略引脚、封装外壳等微小辅助结构,在保障仿真精度的前提下提升计算效率,模型几何尺寸与商用器件完全一致。

仿真边界条件严格贴合实际工程工况:环境初始温度设置为25℃,标准大气压,自然对流散热模式,对流换热系数设置为15 W/(m²·K);芯片施加工况额定损耗功

率180W，模拟器件满负荷工作状态；所有结构接触面设置为完全热耦合，忽略装配间隙带来的仿真误差；各材料热学、力学参数严格参照前文实测参数及行业标准参数赋值，保障仿真真实性与准确性。

为实现对照分析，精准量化不同材料体系的散热性能差异，本文设置三组梯度化对照仿真工况，覆盖行业主流应用方案：工况1为传统基础体系，采用氧化铝陶瓷基板+普通导热硅脂，对应民用低端功率设备散热方案；工况2为中端优化体系，采用氮化铝陶瓷基板+改性导热凝胶，对应工业级中高端功率模块方案；工况3为高端高性能体系，采用氮化硅陶瓷基板+石墨烯复合热界面材料，对应航空航天、高端工控高可靠方案，三组工况除核心材料参数不同外，其余结构、边界条件、载荷参数完全一致。

6.2 稳态热场仿真结果分析

稳态热场仿真用于模拟器件长期满负荷稳定工作状态下的温度分布、热点峰值、整体温升与热梯度分布，是评价器件稳态散热性能、长期热稳定性的核心依据。三组工况的稳态仿真结果呈现显著梯度差异，直观体现了材料体系升级的散热优化效果。

工况1传统材料体系下，IGBT芯片核心热点最高温度达到112.6℃，是三组工况中温度最高的方案。从热场分布云图可以看出，芯片区域形成明显的局部高温热点，热量高度集中，无法快速向基板与散热器扩散；陶瓷基板温度梯度极大，芯片贴合区域温度远超基板边缘区域，整体温度分布极不均匀。该现象的核心原因是氧化铝陶瓷基板导热系数偏低，热量纵向传导阻力大，且普通导热硅脂界面热阻高，跨界面传热效率差，大量热量滞留在芯片内部，无法快速疏导，导致热点积聚、整体温升过高。该工况下器件长期满负荷工作，接近125℃的芯片最大允许工作温度，热裕量极小，极易出现高温性能衰减、热疲劳失效，仅能适配轻载、间歇工作的低端工况。

工况2中端优化材料体系下，器件散热性能得到大幅提升，芯片核心热点最高温度降至87.3℃，较传统体系降温25.3℃，降温幅度显著。热场分布均匀性明显改善，芯片局部热点基本消除，基板与散热器温度梯度大幅减小，热量可通过氮化铝陶瓷基板快速纵向传导，并通过改性凝胶界面层高效传递至散热器，散热通道通畅。氮化铝陶瓷的高导热性能解决了基板传热瓶颈，改性凝胶的低界面热阻优势优化了跨层级传热效率，二者协同作用，大幅降低了系统总热阻，显著提升了器件稳态散热能力。该工况下器件工作温度远低于极限温度，热裕量充足，可长期稳定承受满负荷连续工作，适配绝大多数工业级功率电子工况。

工况3高端高性能材料体系下，器件散热性能达到最优状态，芯片核心热点最高温度仅75.8℃，较传统体系降温36.8℃，较中端体系降温11.5℃。整体热场分布极为均匀，无局部高温热点，芯片、基板、散热器温度梯度极小，热量传导快速且均衡，无明显热积聚现象。氮化硅陶瓷兼具高导热、高稳定性、低热膨胀匹配性的优势，可快速疏导高热流密度热量，石墨烯复合热界面材料的超低界面热阻

彻底消除了界面传热瓶颈，材料体系协同优化效果极致发挥，系统散热效率达到最优。该方案热裕量极大，可适配高温环境、满负荷连续工作、高频启停等严苛工况，器件长期服役可靠性极高。

通过三组工况定量对比可得出核心结论：热管理基材性能升级与热界面材料优化是提升功率器件散热性能的两核心手段，二者协同作用可实现最优散热效果，单一材料优化的提升效果有限，体系化材料匹配是高功率器件热设计的关键。传统材料体系的核心瓶颈为基材导热不足、界面热阻过高，高端复合材料体系可彻底解决高热流密度散热积聚问题。

6.3 瞬态热场仿真结果分析

功率电子器件实际工作过程中并非始终处于稳态工况，多为高频启停、负载波动、周期性工作的瞬态工况，会产生瞬时高热冲击与周期性温度波动，引发热疲劳应力，是导致器件长期失效的重要原因。因此，开展瞬态热场仿真，分析不同材料体系的温升速率、温度波动特性、热响应稳定性，对评价器件长期服役可靠性具有重要意义。本文设置10s周期性启停工况，0~5s施加额定功率载荷，5~10s卸载降温，模拟器件高频工作瞬态热响应特性。

瞬态仿真结果表明，传统材料体系热响应特性较差，加载后器件温升速率极快，短时间内即可达到高温状态，卸载后降温速率缓慢，热量滞留严重；周期性工况下温度波动幅度大，单次循环温度波动差值可达35℃以上，频繁的温度骤升骤降会产生剧烈的周期性热应力，长期服役易导致焊料层疲劳开裂、基板微裂纹、界面脱层等失效问题，器件热疲劳可靠性差。

中端优化材料体系的瞬态热响应性能显著提升，温升速率放缓，降温速率明显加快，热量滞留现象大幅改善，温度波动幅度降至20℃以内，热应力波动显著降低，器件抗热疲劳能力有效提升。高端高性能材料体系的瞬态性能最优，温升平缓、降温迅速，温度波动幅度不足10℃，热响应稳定性极强，可快速适配负载变化，有效缓冲瞬时热冲击，热疲劳损伤极小。同时，高端材料体系热膨胀系数与芯片匹配度更高，瞬态温度变化过程中界面形变差极小，进一步降低了热应力损伤，大幅延长器件服役寿命。

7. 高性能热管理材料未来发展方向

结合前文对现有金属、陶瓷、碳基热管理材料的性能短板分析、热界面材料调控机制研究及仿真验证结果，当前传统热管理材料体系已难以适配第三代半导体功率器件高频、高温、超高热流密度、轻量化、长寿命的发展需求。随着新能源、航空航天、高端装备制造等领域对功率电子设备可靠性、功率密度、集成度的要求持续提升，热管理技术已从单一散热向精准散热、智能散热、一体化散热方向迭代，热管理材料作为核心基础，未来将突破单一材料性能局限、界面热阻瓶颈、结构工艺缺陷，朝着复合化、低阻化、一体化、智能化、低成本产业化的方向快速发展，本章结合行业技术前沿与工程痛点，系统梳理高性能

能热管理材料的核心发展趋势。

7.1 多相复合高性能导热材料研发

单一热管理材料存在固有性能短板，无法同时满足高导热、绝缘、高强度、低热膨胀、易加工、低成本的综合工程需求：金属材料导热好、强度高但无绝缘性；陶瓷材料绝缘好、稳定性强但脆性大、导热上限有限；碳基材料导热极致但各向异性显著、力学稳定性差、成本高昂。多相复合改性技术可整合不同材料的性能优势，取长补短，突破单一材料的性能瓶颈，是未来热管理材料的核心发展方向。通过金属-陶瓷、碳基-陶瓷、碳基-金属多相复合，可实现导热性能、绝缘性能、力学性能、热稳定性的协同优化，制备出性能均衡的一体化新型导热材料。

现阶段前沿研发方向主要包括：金刚石/铝、石墨烯/铜等高导热金属基复合材料，在保留金属结构优势的基础上，大幅提升导热性能、降低热膨胀系数；氮化硅/石墨烯陶瓷基复合基板，弥补陶瓷脆性短板，提升基板韧性与导热效率；柔性碳基-高分子复合导热膜，解决石墨材料各向异性、易碎裂的问题，适配柔性、轻薄化电子器件需求。多相复合材料可根据不同工况的性能需求，精准调控配比与微观结构，实现性能定制化，覆盖从民用通用场景到军工高端场景的全领域需求，是未来材料体系升级的核心路径。

7.2 界面工程与超低阻热界面材料升级

仿真与理论研究均验证，界面热阻是制约系统散热效率的核心瓶颈，在基材性能逐步接近理论上限的背景下，界面传热优化成为热管理性能提升的核心突破口，未来行业将重点聚焦界面微观工程改性与新型超低阻热界面材料研发。传统界面材料存在导热上限低、长期易老化、界面润湿性有限、极端工况稳定性差等问题，难以适配超高热流密度器件的散热需求。未来将通过微观界面工程技术，对基材表面进行微纳蚀刻、涂层改性、亲水改性，提升界面材料的浸润贴合度，消除微观孔隙，从结构层面降低接触热阻。

在材料研发层面，重点发展二维纳米材料复合界面材料、金属纳米流体界面材料、高温稳定相变界面材料，突破传统界面材料导热极限。通过掺杂石墨烯、MXene、碳纳米管等超高导热纳米填料，构建致密连续的三维导热网络，将界面材料导热系数提升至 $20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上，实现超低界面热阻。同时优化材料基体配方，解决传统材料挥发、老化、干裂问题，提升高温、湿热、长周期工况下的稳定性，实现器件全生命周期低阻稳定散热。此外，可降解、环保型界面材料也是未来民用领域的重要发展方向，兼顾散热性能与绿色环保需求。[20]

7.3 材料-结构-界面一体化集成热管理设计

当前传统热管理体系存在材料、结构、界面相互独立、层级过多、传热路径冗长的问题，多层级结构带来多重体热阻与界面热阻，限制整体散热效率提升，同时装配工序复杂、集成度低、设备体积偏大，难以适配功率电子

小型化、高集成度的发展趋势。未来热管理技术将打破传统分体式设计理念，向材料-结构-界面一体化集成方向发展，实现散热功能、承载功能、绝缘功能、封装功能一体化融合。

核心发展方向包括：一体化复合封装基板，将绝缘陶瓷、高导热金属、界面涂层一体化烧结成型，减少传热层级、消除装配界面，从根源上降低系统总热阻；3D打印精密成型一体化散热结构，突破传统工艺成型限制，制备异形、多孔、仿生散热结构，提升散热面积与换热效率；嵌入式芯片散热结构设计，将导热材料直接嵌入芯片封装内部，缩短传热路径，实现芯片原位高效散热。一体化集成设计可简化散热系统结构、减小设备体积、提升散热精度与可靠性，是高集成度功率电子器件热管理的必然发展趋势。

7.4 智能自适应热管理材料与系统发展

传统热管理材料性能固定，导热参数无法随器件工况变化调整，难以适配功率电子器件变负载、瞬态冲击、宽温域工作的复杂工况。为实现动态精准散热，智能自适应热管理材料成为行业前沿研究热点，也是未来高端功率电子热管理的核心发展方向。智能热管理材料可根据器件温度、负载、环境温度的变化，自适应调整自身导热性能、形变状态，实现低温低功耗、高温高导热的动态适配，兼顾器件低温节能与高温散热的双重需求。

现阶段主流研发方向为温敏相变导热材料、热致形变自适应导热复合材料、磁控智能导热材料。相变材料可在器件工作临界温度下发生相变，动态提升导热效率，平缓温升波动；自适应复合材料可通过微观结构形变调整导热通路密度，实现导热系数动态调控。未来将进一步结合传感检测、智能控制、算法调控技术，构建“智能材料+结构+控制”一体化动态热管理系统，实时监测器件温度场变化，自适应调节散热性能，实现全工况、高精度、智能化热管理，满足高端装备复杂工况的散热需求。

7.5 高可靠轻量化低成本产业化技术升级

目前石墨烯、金刚石、高端氮化硅陶瓷、纳米复合界面材料等高性能热管理材料，存在制备工艺复杂、良品率低、规模化成本极高、工艺稳定性差等产业化瓶颈，仅能应用于军工、航空航天等小众高端场景，无法实现民用功率电子领域的规模化普及。未来行业核心发展重点之一是推进高端热管理材料的产业化技术升级，优化粉体烧结、复合改性、精密加工工艺，提升材料制备良品率与性能稳定性，大幅降低规模化生产成本。

同时，针对新能源、便携式设备、轨道交通等领域的轻量化需求，持续优化材料配方与结构设计，开发低密度、高强度、高导热的轻量化复合热管理材料，在保障散热性能与力学可靠性的前提下，降低散热结构自重。此外，建立标准化的材料选型、工艺装配、性能检测体系，规范热管理材料工程应用标准，推动高性能热管理材料从实验室研发向规模化、低成本、高可靠工程应用转化，实现高端热管理技术的全民普及。

8. 结论

本文围绕电子器件热管理材料体系及其功率电子应用展开系统性研究,通过机理分析、模型构建、材料表征、机制探究、仿真验证、趋势展望,形成了完整的热管理材料应用研究体系,主要得出以下结论:

1)典型电子器件产热与热分布特征差异显著:电子管产热稳定、高温区域集中;晶体管高热流密度、瞬态热冲击显著;功率放大器多热源叠加、整体热积聚严重,需针对性匹配热管理材料与散热方案。

2)基于傅里叶热传导理论构建的多层串联热阻网络模型,可精准量化功率电子散热系统各层级热阻贡献,界面热阻是制约系统散热效率的核心瓶颈,为热阻优化与材料选型提供了精准的数学理论支撑。

3)三大类主流热管理材料性能互补:金属材料加工性好、成本低,适用于通用散热结构;陶瓷材料绝缘导热、稳定性强,适配芯片封装绝缘散热场景;碳基材料导热性能最优,是超高功率器件的前沿核心材料,三者可通过协同匹配实现最优散热效果。

4)热界面材料可有效填充界面微观间隙、消除空气热阻瓶颈,大幅降低系统整体热阻,其材料性能、厚度与填充质量直接决定系统散热效率与长期可靠性,是热管理系统优化的关键环节。

5)有限元仿真结果验证,高性能陶瓷基板与碳基复合热界面材料组成的材料体系,可显著降低器件热点温度、均衡热场分布、提升抗热冲击能力,有效解决高功率电子器件的热积聚问题。

6)未来热管理材料将朝着复合化、低界面阻、一体化、智能化、低成本产业化方向发展,多材料协同改性、界面工程优化、智能自适应调控将成为高性能热管理技术的核心突破口。□

参考文献

- [1] Moore A. L., Shi L. Thermal transport in nanostructures and low-dimensional materials. *Materials Today*, 2014, 17(4): 163 – 174.
- [2] Cahill D. G., et al. Nanoscale thermal transport. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(2): 793 – 818.
- [3] Tuckerman D. B., Pease R. F. W. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 2(5): 126 – 129.
- [4] Bagnoli P. E., et al. Thermal modeling of power electronic devices. *Microelectronics Reliability*, 2016, 64: 173 – 182.
- [5] Lasance C. J. M. *Advanced thermal management of electronic systems*. Springer, 2013.
- [6] Incropera F. P., DeWitt D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2007.
- [7] Yovanovich M. M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance. *AIAA Journal*, 1998, 36(2): 170 – 178.
- [8] Raghavan V., et al. Thermal interface materials for electronic packaging. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006, 29(2): 284 – 293.
- [9] Lee S. Thermal design: Heat sinks, thermal resistance, and thermal interface materials. *Electronics Cooling*, 2000, 6(3): 8 – 12.
- [10] Yang B., et al. Thermal management of GaN power devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 1 – 12.
- [11] Sze S. M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2006.
- [12] Baliga B. J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer, 2010.
- [13] Chowdhury S., Mishra U. K. Lateral and vertical GaN devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(10): 3060 – 3066.
- [14] Black J. R. Electromigration—A brief survey. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, 16(4): 338 – 347.
- [15] Coffin L. F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Transactions of ASME*, 1954.
- [16] Manson S. S. Behavior of materials under conditions of thermal stress. NASA Report, 1966.
- [17] Zhao H., et al. Thermal management of IGBT modules. *Microelectronics Reliability*, 2018, 88: 1154 – 1162.
- [18] Siow K. S. Mechanical properties and failure mechanisms of solder joints. *Journal of Electronic Materials*, 2012, 41(6): 1496 – 1504.
- [19] Rahman M. M., et al. Microchannel heat sinks: A review. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 630 – 649.
- [20] Kandlikar S. G. Fundamentals of heat transfer in microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 2005, 26(8): 3 – 16.
- [21] Fan X., et al. Liquid metal thermal interface materials. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(1): 011301.
- [22] Zhou W., et al. Thermal conductivity of graphene. *Nano Letters*, 2010, 10(9): 3638 – 3643.
- [23] Balandin A. A. Thermal properties of graphene and nanostructures. *Nature Materials*, 2011, 10: 569 – 581.
- [24] Pop E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices. *Nano Research*, 2010, 3: 147 – 169.

作者简介:姜至杰,男,工程师,主要研究材料科学与电气工程。

收稿日期:2026-03-09

修回日期:2026-04-18

接受日期:2026-05-11

版权为作者所有。本文为开放获取文章,遵循知识共享署名(CC BY)许可协议(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).