

电子设备热设计技术概述*

钱吉裕, 王锐

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要:随着电子设备性能不断提升,热设计已成为制约其发展的关键因素。文中系统概述了电子设备热设计技术的现状与面临的主要挑战,从热传导、热对流、热辐射、储热及微系统冷却等关键技术方向,详细介绍了当前主要的技术方法、研究进展及发展趋势。文中重点分析了高功率、高集成度和高可靠性电子设备的热设计需求,并提出了相应的技术选型建议,可为电子设备的热管理提供有效的解决方案。热设计技术的不断创新将为电子设备的高效、可靠和安全运行提供重要支撑。

关键词:电子设备;热传导;热对流;热辐射;储热;微系统冷却

中图分类号:TK124 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2025)05-0001-26

引用格式:钱吉裕,王锐.电子设备热设计技术概述[J].电子机械工程,2025,41(5):1-26.

QIAN J Y, WANG R. An overview of thermal design technologies for electronic device[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2025, 41(5): 1-26.

An Overview of Thermal Design Technologies for Electronic Device

QIAN Jiyu, WANG Rui

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: As electronic devices continue to advance in performance, thermal design has emerged as a critical bottleneck in their development. A systematic overview of the current status and challenges in thermal design technologies for electronic devices is presented in this paper. It explores key technical directions, including heat conduction, heat convection, heat radiation, thermal energy storage and microsystem cooling, and provides insights into current technical approaches, research progress and future trends. The thermal design requirements of high-power, high-integration and high-reliability electronic devices are particularly focused on in this paper, and corresponding technology selection suggestions are provided, which can provide effective solutions to electronic device thermal management. Continuous innovation in thermal design technologies will provide crucial support for the efficient, reliable and safe operation of electronic devices.

Key words: electronic device; heat conduction; heat convection; heat radiation; thermal energy storage; microsystem cooling

引言

电子设备的能量转换效率普遍较低。以雷达为代表的微波电子设备的电能转换为电磁能输出的效率通常在20%左右,意味着近80%的能量转换为了废热^[1],如美国舰载SPY-6雷达在4 m×4 m阵面口径范围内的废热为1 MW量级,而更高频段雷达的废热甚至可达到其数倍。电力电子设备的电能转换效率通常超过90%,然而在较高输出功率下仍有较多电能转换为废热,如某新能源车的绝缘栅双极型晶体管模块仅手掌大小,但输出功率为200 kW,产生的热耗约为3 kW,与家用热水器相当^[2]。信息通信技术设备的电

能几乎全部转换为废热,如用于超算中心的曙光C8000液冷机柜的单柜功率可达750 kW。国际能源署相关数据显示,2026年全球数据中心耗电量预计突破1 000 TW·h(相当于日本当年的全国用电量)^[3]。如此巨量的电能最终几乎全部成为废热。与此同时,电子设备的耐温普遍不高,若废热处理不当,将影响设备正常工作。

合理有效的热设计方法对电子设备的工作性能、可靠性、安全性至关重要。因热设计不当导致的电子设备事故时有发生,从危害类别来看,主要有三个方面。

(1) 造成过温损毁

电子设备热设计失效会导致过温引起的热效应,

* 收稿日期:2025-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52206214)

严重时甚至引发火灾,直接威胁设备与人员的安全。新能源汽车上锂电池的最佳工作温度为 20 ℃~40 ℃,超过 50 ℃ 的热量聚集将直接影响电池寿命,而超过 80 ℃ 就可能引起电池组内部的电解液分解、膜分解反应、正负极与电解液反应等异常化学变化,导致热击穿与爆炸^[4]。统计数据表明,2022 年第一季度共发生 640 起新能源车火灾事故^[5]。某旗舰级显卡曾发生多起自燃事件,起火原因判断为显卡的功率较高,供电接口处接触不佳导致接触电阻和接触热阻过大,进而产生过高的焦耳热,引发电源线熔断及后续起火事件。

(2) 制约性能提升

芯片的性能与功耗通常直接相关。随着氮化镓等第三代半导体材料的成熟应用,输出功率数量级提升已成为可能,而散热能力同样实现数量级提升的难度极大,热设计已成为电子设备性能提升的主要限制因素之一。例如,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)为了应对反隐身作战等场景的散热需求,于 2022 年提出了器件级电子散热技术(Technologies for Heat Removal in Electronics at the Device Scale, THREADS)的专项研究计划,希望于 2027 年实现散热能力提升至现有水平的 8 倍,以支撑新一代雷达实现探测距离翻倍的目标^[6]。又如,绝大部分星载相控阵雷达在一个轨道周期内的开机时间通常不超过总时长的 1/3,其余时间必须停机冷却,以满足下一个任务周期的温度条件,可见散热能力直接制约着星载雷达的性能和工作时间。

(3) 降低设备可靠性

随着温度的上升,电子元器件的失效率一般呈指数增长趋势,热设计不当将直接导致电子设备的可靠性降低。统计数据表明,约 55% 的电子设备失效问题与温度相关^[7]。例如,俄罗斯 Express-AM6 电信卫星的预计服役寿命为 15 年,但运行不足 6 年即发生通信卫星温度异常,迫使 Ka 波段应答器关机,最终卫星上的 72 个应答器中有 30 个无法正常工作,通信功能失灵并暂停服务。日常生活中的电子设备热宕机现象不胜枚举,即使当前新兴的人形机器人也面临热失效问题。如在 2025 年 4 月举办的人形机器人马拉松赛上,有机器人因散热问题导致关节过热,触发保护机制而被迫退赛,可见散热同样是影响机器人可靠性的关键因素。

综上所述,电子设备的能量转换效率不高是产生

巨量废热的首因。不当的热管理不仅会直接导致器件损毁,更在系统层面严重制约性能提升,并可能指数级地降低设备的可靠性和使用寿命。由此可见,热设计已成为电子设备性能提升与安全可靠运行的关键制约因素,其技术瓶颈已经成为电子技术高速发展的“拦路虎”。

1 热设计面临的挑战

随着微电子技术的飞速发展,电子元器件通过材料改进、封装集成工艺等措施,在结构尺寸基本不变甚至缩小的条件下,实现了功率的数量级提升。然而,受物理机制的限制,鲜有技术能在不增加资源消耗的条件下实现散热能力的数量级提升,导致冷却性能不满足需求以及资源消耗过高的双重问题。与此同时,电子设备的应用环境日益复杂,极端温度、强振动等严苛条件对热设计提出了更高的要求。归纳起来,热设计面临的挑战主要有五个方面。

(1) 器件功率密度激增引发过温风险

电子元器件的尺寸正在不断缩小,如今数字芯片的特征尺寸已向 3 nm、2 nm 等更微小量级持续迈进,单芯片内集成的晶体管数量已达到几十亿个。在尺寸缩减演进过程中,芯片功率也在不断增大。从 20 世纪 80 年代单个芯片的功率只有几瓦,到 21 世纪 10 年代主流中央处理器(如 Intel i7)的功耗不到 100 W,芯片功耗曾长期徘徊在几十瓦量级,直到 2020 年后芯片功率呈现指数级突增。如图 1 所示,英伟达图形处理器芯片功耗近期已突破 1 kW 量级,预计很快突破 2 kW,更有激进者预测人工智能的图形处理器功耗在 2035 年可增至约 15 360 W^[8]。

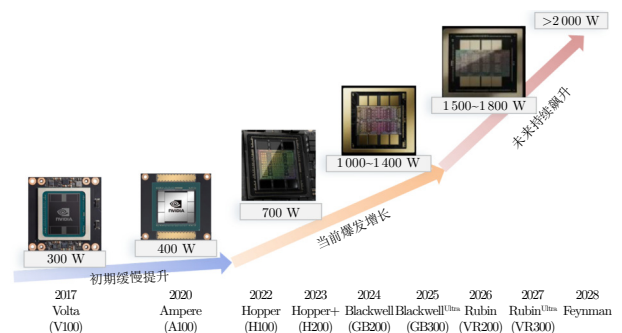


图 1 英伟达图形处理器芯片功耗发展趋势

高性能数字芯片持续保持热流密度高速增长的趋势^[9],如图 2 所示。然而,散热技术近年来并未出现与之匹配的飞跃式提升趋势,已骤然升级为芯片发展的“卡脖子”问题。

同理,持续提升功率密度也是微波功率芯片追

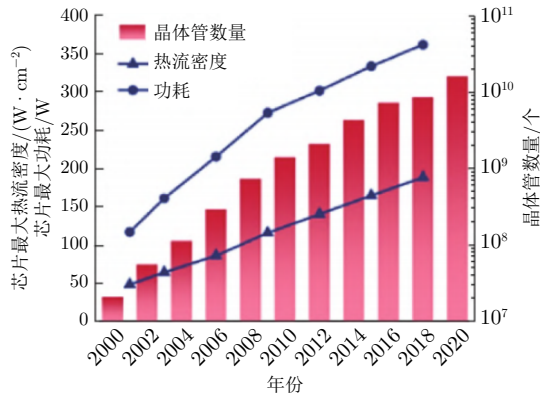


图2 数字芯片热流密度的发展趋势^[9]

求的主要目标。以军用雷达为例,其功率越大,探测距离就越远^[10]。如图3所示,DARPA于2022年启动THREADS项目,希望通过散热技术的提升消除器件内部晶体管的局部热点,将输出的线功率密度提升至81 W/mm(为当前功率密度的16倍),支持雷达探测范围提升至原来的2~3倍^[6]。与此同时,对于相控阵雷达等系统,成千上万个器件具有温度一致性要求,对电子设备热设计提出了更高的挑战。

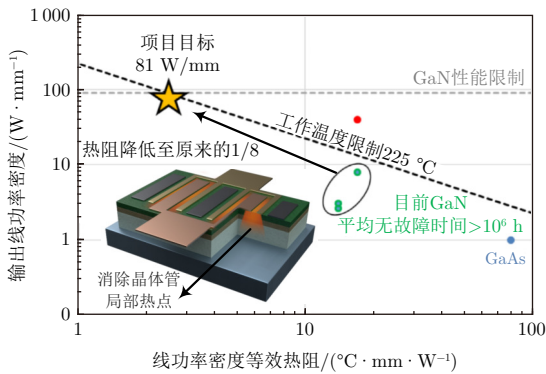


图3 DARPA关于功率芯片的发展目标^[6]

(2) 高密度封装加剧内部散热难题

高性能与小型化是所有电子设备持续不断的追求,如今芯片互连密度越来越大,电子封装结构由早期的单一芯片封装逐步向2D多芯片封装、高密度2.5D/3D封装形态发展^[11]。通过将承担射频、信号处理、存储、传感等功能的电子元器件集成在一起,在有限尺寸下增强功能密度,为电子技术在后摩尔时代的发展带来了新机遇,也给热管理技术提出了更新、更高的要求。

独立封装芯片的传热路径较简单,以顶部散热的封装形式为例,如图4所示(图中TIM为热界面材料),通常的传热路径为芯片→封装壳体→散热器。当发展至3D封装形式时,从电气角度看,其优势非常显

著(互连距离更短,信息传输更快,延迟更低,能效比更高)^[12];然而从散热角度看,这种发展形式几乎是灾难,中间层或底层的芯片需在封装内部经历冗长的传热路径才能将热量传递至封装壳体,且传热路径上经历的印刷电路板、中介层玻璃基板等热导率较低^[13]。封装内部热阻高已成为必须解决的问题,封装的散热架构设计成为重中之重。

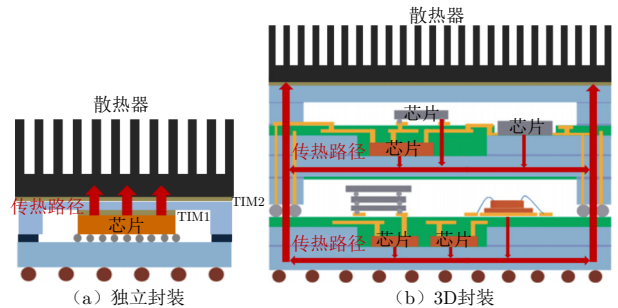


图4 独立封装与3D封装芯片的传热路径示意图

同时,不同类型的芯片耐温显著不同,却可能由于高集成需求被封装在同一个基板上,面临封装内部热串扰的挑战。以某SiP封装芯片为例,温度指标为160 °C的氮化镓功率芯片与温度指标为105 °C的硅基数字信号处理芯片集成在同一个基板上,如图5所示。单独封装时,满足其耐温指标的热设计非常容易实现。然而在封装集成后,功率芯片由于氮化镓材质耐温较高,并不超温,但其热量通过基板的热传导提升了附近数字芯片的温度,导致后者超温;为了满足低功耗数字芯片的散热,往往需消耗过多的冷却资源,造成整体过设计。同理,高集成设计后,功率芯片附近的阻容元件也面临严重的热串扰问题。因此,封装芯片必须从基板内无序热传导的传统热管理方式逐步向导热与隔热协同优化的定向热管理方式转变。

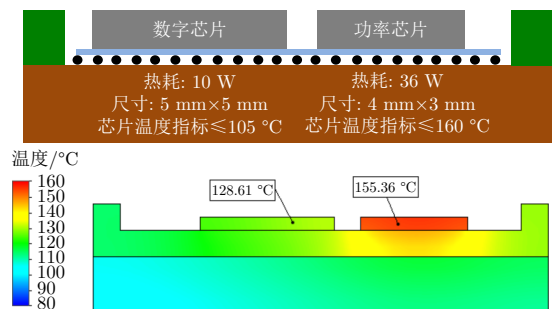


图5 封装集成多芯片的热串扰问题

此外,异质异构高密度封装条件下的“热-力-电”耦合效应无法忽视。例如,电子设备封装的陶瓷基板与印制板通过焊柱形式焊接互连,在使用过程中可能频繁经历电子设备工作与关闭状态下的高低温循环,

内部膨胀和收缩产生热应力, 相邻异质材料热膨胀系数不同会加剧热应力, 可能对存在潜在缺陷的地方产生破坏。如图 6 所示, 某电子设备在数百次温度循环后, 多处焊柱出现颈缩以及基板侧开裂现象。互连器件的电特性呈现与温度相关的函数关系, 高密度器件产生的热会改变互连结构中的电特性, 形成热电耦合^[14]。因此, 对芯片进行热、力、电的协同分析与设计是高密度封装的必然选择。

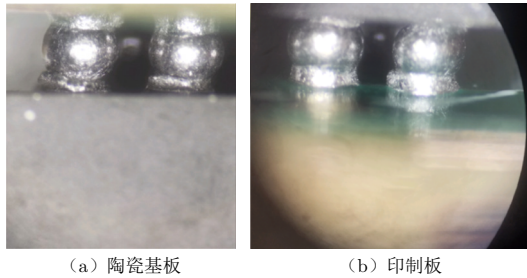


图 6 温度循环导致焊接处力学失效

(3) 功率显著提升凸显热设计资源挑战

随着第三代半导体技术的成熟, 器件功率提升一个数量级已成为可能, 但器件的工作效率未显著改善, 导致装备的废热呈现数量级增加。然而, 在有限的结构资源条件下, 散热能力无法同步实现数量级的提升, 导致冷却设备尺寸和质量激增的结构资源难题愈发突出。以美国的低空防空反导雷达为例, 新一代基于氮化镓技术的有源相控阵雷达的性能已超越“爱国者”系列雷达, 如图 7 所示。然而, 受限于冷却设备较低的散热效率, 雷达尾部巨大的冷却设备与前部的高集成阵面设备形成了鲜明对比。



图 7 美国雷神公司的防空反导雷达

此外, 能耗限制也是制约电子设备功率提升的关键瓶颈。数据显示, 信息技术设备能耗约占数据中心总能耗的 50%, 而对应的冷却系统能耗占比高达 37%^[15]。热设计能力不足可能导致系统能耗异常升高, 加剧数据中心的高能耗问题。对于高算力应用场景(如 Google 的数据中心, 如图 8 所示), 采用液冷技术并推动行业标准化, 将供液温度由目前的 30 °C 提升至 40 °C 或更高, 可实现冷源侧的全年自然冷却, 消

除压缩制冷需求, 大幅降低冷却系统的能耗和成本。当前, 全球因电力资源不足而待审批的数据中心容量已达到 2 600 MW, “人工智能发展的尽头是缺电”成为行业共识, 数据中心节能降耗成为热设计专业必须解决的严峻挑战。



图 8 Google 数据中心的液冷系统

(4) 严苛的控温需求提升设备热设计难度

一些特殊的电子设备(如相控阵雷达、新能源电池、光刻机、航天探测器)对电子元器件的控温精度、均温性等要求极为严苛。

在有源相控阵雷达系统中, 阵面由数万个砷化镓或氮化镓收发组件组成, 高频率状态下对温度均匀性要求极高^[16], 具体如表 1 所示。对于美国海基 X 波段雷达(图 9), 为保证其远距离探测的波束指向精度, 需将阵面口径 12.5 m 范围内的近七万个 T/R 模块的温度均匀性保持在±5 °C 以内。若采用的热设计措施无法满足控温要求, 则雷达的指向精度与威力将直接受到影响。

表 1 美国雷神公司对雷达组件温度均匀性要求

雷达工作频率/GHz	组件允许温差/°C
10	10.0
20	5.0
40	2.5
80	1.3



图 9 美国海基 X 波段雷达

在电动汽车电池中, 电池内部材料热导率的差异以及表面散热速率的差异, 可导致电池内部及表面温度的不均匀分布, 温度梯度较大时会严重影响电池的性能, 如电池容量衰减、诱导极片局部析锂、不均匀老

化等。保持电动车电池良好的均温性非常重要,如特斯拉的高能量密度电池组要求所有单体间的温差控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

相比而言,光刻机具有更高精度的温度控制需求,如极紫外线光刻机为保证较高的光源分辨率,物镜温度的稳态误差常需控制在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。航天探测领域甚至会出现 mK 量级的温度控制需求,如我国主导的空间引力波探测项目“天琴计划”,为捕捉极其微弱的引力波信号,必须精确控制探测卫星内的光学模块、激光干涉仪、惯性传感器等核心器件的温度稳定性,这是对当前热控技术的极限挑战^[17]。

(5) 极端工况暴露传统热设计方法的局限性

电子设备面临的极端应用场合不断增多,特别是军用电子设备可能需在极端环境温度、高马赫数等特殊条件下工作,因而面临严峻的热设计技术挑战。

部分特殊场合要求电子设备在极高或极低的环境温度下工作。如“玉兔二号”月球探测车需适应 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的月昼极高温,即使经过严格筛选,电子器件也无法在此极端温度下正常工作,目前仅能通过关闭设备以休眠方式度过极端环境的考验,急需有效的热设计技术支撑电子设备在极端环境温度下的全天候正常工作。再如未来“天问四号”将开展木星系探测任务,需长期承受 $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境,急需发展新型热控技术以提供良好的热边界环境,满足探测器光学仪器的热控制要求^[18]。

高马赫数飞行器对电子设备热设计提出了特殊的挑战,如美国“黑鸟”飞机的飞行马赫数 Ma 约为 3.5,高超音速导弹的飞行马赫数更是超过 10,且新一代飞行器的飞行速度仍在持续提升。随着飞行器功能复杂度的增加,其内部电子设备的热耗显著增加。同时,飞行器外部的气动加热量随着飞行速度的提升而急剧上升,如在 $Ma=10$ 的气动热条件下,飞行器的外部温度可达 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,由于飞行器所处的临近空间缺乏合适的热沉条件,传统热设计技术对此基本束手无策。

综上所述,电子设备的高功率、高集成、高热流密度、严苛的控温精度、环境适应性等发展趋势,为热设计带来了一系列挑战,相关的技术创新与工程优化迫在眉睫。

2 常用热设计方法及发展趋势

2.1 热设计流程及技术分类

电子设备热设计的典型流程如图 10 所示,从目标

分析与指标定义开始,分别开展概念设计、详细设计、部件验证、集成验证、可靠性验证、量产质量监控、可靠性数据分析等一系列活动。其中,电子设备热设计的目标包括产品尺寸和质量、能效比、可靠性、维修性、电磁兼容、环境适应性、材料兼容性、力学性能、成本等,可根据应用场景进行目标参数的权重分析,依据目标分析结果选择热控技术开展设计^[2]。

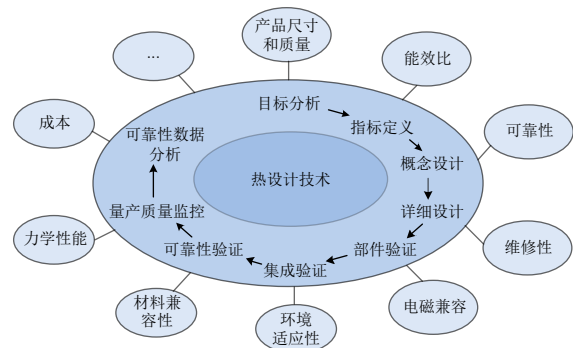


图 10 典型热设计流程示意图^[2]

电子设备热量从发热器件转移到最终热沉,一般会经过三个环节:一是电子元器件封装内的传热;二是封装到散热器或冷板的传热;三是散热器或冷板到最终热沉的传热。

每个环节采用的热转移方式各不相同,可以单独或联合使用一种或几种热设计技术。电子设备热设计技术的分类如图 11 所示,主要包括热传导、热对流、热辐射、储热以及其他特殊的冷却方式。例如,由于其研究对象、研究范围、研究方法等有别于常规系统冷却,微系统冷却也常被单独视为一类冷却方式。

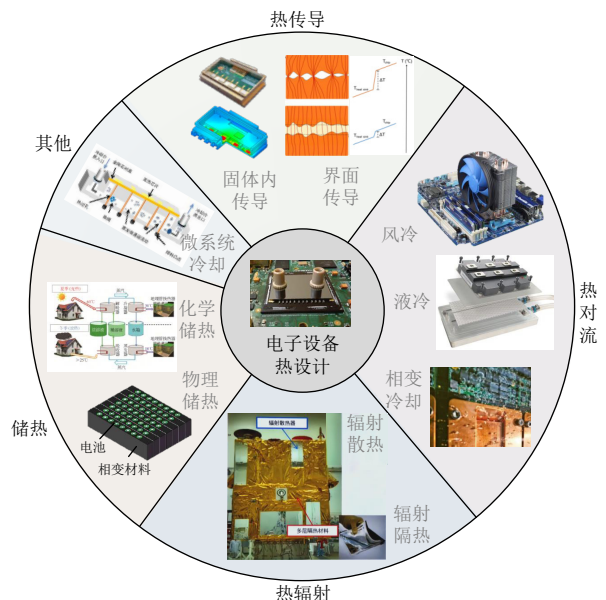


图 11 电子设备热设计技术分类

2.2 热传导技术

2.2.1 封装材料的热传导及增强技术

封装材料的热传导通常是电子器件热量导出的首要环节。由于封装材料直接靠近热源且处于热流密度最高的热点区域,因此提升其热传导性能对整个系统的散热效率具有决定性作用。通过优化封装材料的热导率,可以有效降低热阻,提升热量的快速导出能力,从而显著改善电子器件的热管理性能。

封装材料的选择范围受半导体材料线胀性匹配的制约,存在较大限制。从材料的导热性能来看,通常可分为三代,如图12所示。第一代以Invar和Kovar合金为代表^[19],具有与半导体器件相匹配的热膨胀系数及良好的焊接性能,但其热导率较低,仅适用于小功率密度器件。第二代材料以钎-铜、铝-硅、碳化硅/铝等为代表^[20],在热导率、热膨胀系数、密度等方面实现了优化,热导率可达到200 W/(m·K),成为目前大功率器件的主流封装材料。第三代封装材料以金刚石颗粒等为增强相^[21],热导率进一步提升,达到400~1 000 W/(m·K)。金刚石/金属复合材料应用于电子封装的概念早已存在,然而受限于工艺能力与成本,其工程化应用只在一些特殊场合出现。近年来,随着器件功率密度快速增长的强力牵引以及低成本净成型工艺的突破,金刚石/铜^[22]、金刚石/铝^[23]复合材料逐步在激光器、射频器件等大功率、高热流密度领域得到了应用。图13所示为某大功率射频器件应用的金刚石/铝封装壳体。

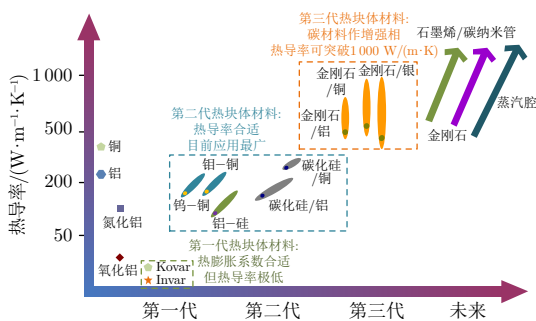


图12 电子设备热传导材料发展代次

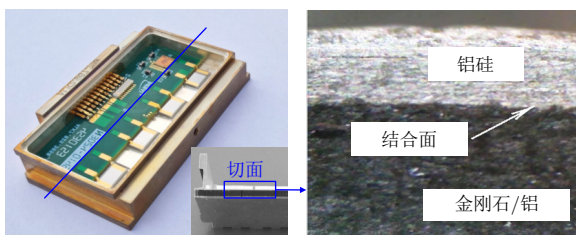


图13 高导热金刚石/铝封装壳体

石墨/金属复合材料同样具有超高的面内热导率,能够实现热量的快速二维扩散,并且成本较低,加工性能好,也是具有一定潜力的封装热管理材料^[24]。但石墨热导率具有各向异性特征,在厚度方向的热导率仅为3~10 W/(m·K),这种取向性可能会限制石墨/金属复合材料的应用。

随着电子器件高功率化的发展,单纯提升金属封装材料的本征热导率已难以满足高热流密度点热源的散热需求。基于石墨烯、碳纳米管、金刚石等新型碳基高导热材料的复合封装材料,不仅热导率有望突破1 000 W/(m·K),还具有热膨胀系数可调、轻量化等优势,是未来封装材料的发展方向,但成本控制与工艺性提升仍待进一步突破。此外,将热管及其衍生物与低热膨胀系数的封装材料复合,可实现等效热导率的数量级提升,这被认为是突破材料导热极限的关键技术之一,也是封装材料导热增强最主要的技术发展方向。

2.2.2 基础材料的导热增强技术

铜、铝等基础材料是电子设备导热与散热的最常用材料,但这些材料的导热性能越来越无法满足电子器件持续增长的散热需求。基础材料与热管的复合,是其导热增强的关键技术方向之一。集成镍纤维吸液芯的新型微型环路热管(图14),在实现超薄结构(厚度为0.7 mm)的同时,等效热导率超过24 kW/(m·K),是商用石墨烯散热片的15倍^[25]。

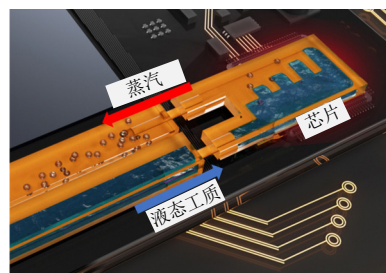


图14 电子器件用新型微型环路热管^[25]

热管沿一维方向高效传热,而蒸汽腔可视为一种二维热管,在二维平面内传输热量,具有优异的热扩展性能。目前在二维热管的基础上,已发展出三维的一体化均温技术,即三维蒸汽腔(3D Vapor Chamber, 3D VC)散热技术,如图15所示。通过焊接工艺将基板空腔与翅片内腔相连,形成一体式腔体。腔体内充注工质并封口,工质在靠近芯片端的基板内腔蒸发,在远热源端的翅片内腔冷凝,通过重力驱动及回路设计形成两相循环,可实现优异的均温效果。在不引入外部运动部件强化散热的情况下,3D VC通过基

板和散热翅片的一体化设计与三维结构的热扩散,更高效地将芯片热量传递至翅片远端散热,增强了基板和散热翅片的均温性,进一步降低了传热温差,具有

高效散热、温度分布均匀、减少热点等优势,可满足大功率器件散热、高热流密度区域均温的需求,为电子设备的小型化、轻量化设计提供了可能。

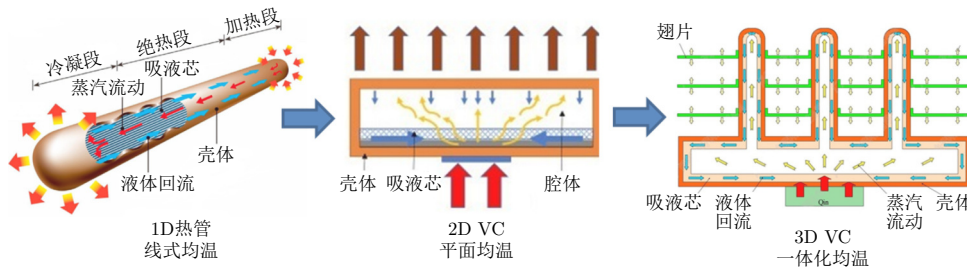


图 15 蒸汽腔技术发展趋势 [2]

3D VC 散热器在高性能工作站和人工智能服务器上得到了应用。如 Cool Master 公司发售带 3D VC 的风冷散热器用于中央处理器散热,如图 16 所示,在均温板散热器顶部加工有 4 根 3D VC 热管,均温板底部产生的蒸汽流向热管顶部,再借助高密度、大面积散热鳍片以及 4 根 U 型热管,可以实现 250 W 的散热需求。与 3D VC 类似,还有一种不带毛细芯的 3D 蒸汽腔结构,基于热虹吸原理,仅利用重力驱动工质相变循环,其通过消除毛细结构降低了工艺复杂度与制造成本,但应用上要充分考虑重力的影响。

间成本)等方向不断发展,才能在实际应用中获得更广泛的推广和应用 [26]。

2.2.3 热界面材料的传热及增强技术

热界面材料(Thermal Interface Material, TIM)在电子设备热控技术中扮演着“热桥”的关键角色,特别是在具有高热流密度器件的设备中,界面热阻甚至可占到器件热沉整体热阻的 1/3 以上。因此,提升 TIM 性能对优化整体散热效率具有重要意义。与改进其他散热环节相比,优化 TIM 通常更经济,在整体热管理性能的提升方面具有较高性价比。

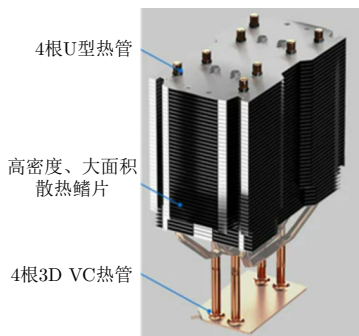


图 16 3D VC 风冷散热器

热界面材料在两个接触的固态表面之间扩展热传输路径中的热通道,抑制界面间的热阻,如图 17 所示。

界面位置的有效热阻可表示为

$$R_{TIM} = d_{BLT}/k + R_{c1} + R_{c2} \quad (1)$$

式中: d_{BLT} 和 k 分别为 TIM 的粘接厚度 and 热导率; R_{c1} 和 R_{c2} 为 TIM 相接触表面的接触热阻。热设计的重要目标是减少有效界面热阻,减小 d_{BLT} 、提升 k 和增加 TIM 的填隙能力均是可行方向 [27]。

铜、铝等基础材料与高导热非金属材料的复合,是增强导热性能的另一个可行方向。石墨或石墨烯增强铝复合材料近年来成为研究热门,有两种常用研制方法:一种是通过层压法将不同层状材料混合;另一种是将少量石墨或石墨烯掺杂入铝材料内。两种方法都可以获得高于纯铝的热导率,而后者因更适合复杂结构形状加工,在工程应用上更受欢迎。尽管该复合材料的热导率远低于内嵌热管,但其消除了重力影响及泄漏失效风险,可靠性与使用寿命均大幅提升,在星载电子设备等特殊应用场合更具优势。未来,石墨烯增强铝等复合材料应朝优异的使用性能、良好的成型性能、更低的综合成本(包括材料成本、制造成本和时

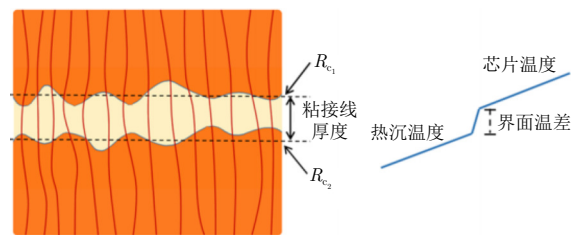


图 17 TIM 界面热阻原理图 [27]

常用的热界面材料可以分为有机、无机非金属及金属三类。

(1) 有机 TIM

有机 TIM 是目前市场份额较大、商业应用较成

熟的 TIM 材料,使用较多的是图 18 所示的导热脂和导热弹性体。导热脂具有一定的流动性,在一定压强下(通常为 $100\sim 400\text{ Pa}$)可在两个固体表面形成薄膜,其有效界面热阻较低(通常为 $0.2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$),但存在不易清洁、长期使用可能溢油失效等缺陷。导热弹性体包括导热衬垫、导热凝胶等,相比导热脂,降低了溢出的材料污染电路板和环境的概率,使用和处理更方便,但其有效界面热阻相对较高(通常为 $0.5\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$)。

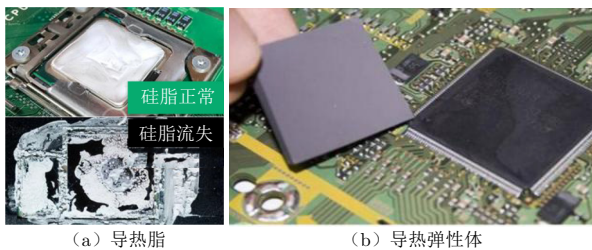


图 18 导热脂和导热弹性体

有机 TIM 的特点是材料本体的热导率普遍不高(通常在 $10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下),因此体积热阻偏高,但其具有硬度低、填充效果好的优势,因此接触热阻 R_{c1} 和 R_{c2} 通常较低。在保持低接触热阻的前提下,考虑到减小 d_{BLT} 在多数应用场景下会受到限制,提升 k 往往是该类别材料的主流思路,如在有机硅基体中添加氮化物或金属氧化物,是提升导热衬垫性能的可行研究方向^[28]。然而这些填充物会增加衬垫硬度,必然会导致 d_{BLT} 、 R_{c1} 和 R_{c2} 增高,必须充分考量填充物的配比、微观组织结构等对界面热阻的综合影响。

(2) 无机非金属 TIM

无机非金属 TIM 的发展主要得益于石墨、石墨烯等碳材料的工程化应用,碳材料通常具有较高热导率、较低成本和聚合物基体中的良好分散性,通常可获得 $0.2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ 的较低界面热阻,具有解决高热流密度器件界面问题的工程应用潜力。

石墨膜作为一种典型的无机非金属 TIM,已在雷达大功率组件散热中实现工程应用^[29]。然而,石墨类材料作为 TIM 有两个明显缺陷,限制了界面热阻的进一步降低:一是其低维结构特征的热导率表现出各向异性(垂直方向远低于层片方向),导致横向排布的石墨类 TIM 等效热导率通常低于 $10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;二是其硬度较大且表现出不可压缩特性,导致接触热阻 R_{c1} 和 R_{c2} 较高。

为了提升等效热导率,改变石墨或石墨烯的排布方向是有效研究方向。如有研究提出通过快速过滤

技术获得两种不同尺寸的分层定向石墨烯片,如图 19 所示。通过大尺寸石墨烯片横向布置、小尺寸石墨烯片垂直取向布置形成导热网络,其垂直热导率达到 $12.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,可作为高热流密度器件的界面材料^[30]。

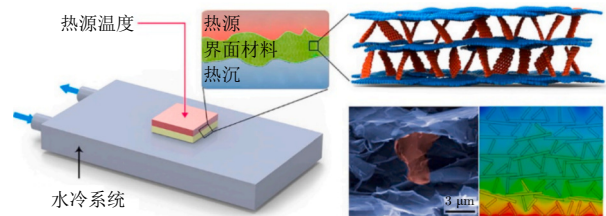


图 19 分层定向石墨烯片作为界面材料^[30]

进一步将层片状的石墨或石墨烯材料调整为纵向排布,如图 20 所示,形成高效连续的热传导路径,可制备出更低热阻的 TIM 材料^[31]。如有研究通过外部机械力作用堆叠石墨烯条,并将其用作增强体来增强环氧树脂复合材料,制备的纵向石墨烯衬垫的垂直热导率超过 $100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[32]。

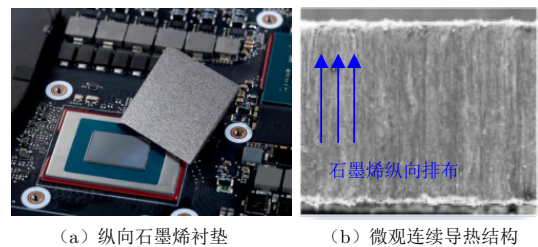


图 20 纵向石墨烯衬垫及其微观连续导热结构^[31]

为了降低接触热阻,有研究提出褶皱石墨烯的概念,如图 21 所示,对层状石墨烯施加周向剪切力形成褶皱结构,再通过横向压缩获得致密块体。褶皱形态的石墨烯表现出较好的回弹性,可降低接触热阻,结合纵向排布特征可增加等效热导率,作为界面材料在实验室条件下实测获得了 $0.0118\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ 的超低界面热阻^[33]。

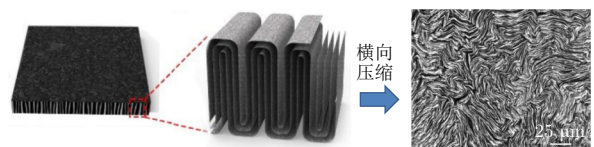


图 21 褶皱石墨烯形态示意图^[33]

改进后的石墨类衬垫作为 TIM 材料,目前可基本满足高等效热导率($>100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)和极低界面热阻($<0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$)要求,未来需在增强填隙能力、提升机械性能、提高工艺稳定性、降低成本等方面持续突破,实现从实验室研制到工程量产的跨越。

(3) 金属 TIM

金属 TIM 通常包含焊料、液态金属、软金属等。在商用金属 TIM 中较为典型的应用是焊料。焊料被加热融化后将界面黏结起来,其中含铋的脆性合金通常不适用于高温元器件对 TIM 产生挤压力的场景,推荐使用钢或钢合金作为 TIM 焊料。这类金属具有高热导率和充分润湿界面的柔软度,界面热阻通常可低至 $0.01 \sim 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$, 适合高导热、不可拆卸的应用场景。

液态金属主要包括钢、铋、镓、锡、银合金等,其性能优势在于本征热导率是水的数十倍,兼具出色的流动性和填隙能力,可同时满足低 d_{BLT} 和较低的 R_{c1} 和 R_{c2} 要求,界面热阻与焊料焊接相当(低至 $0.01 \sim 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$)。为了防止液态金属泄漏,索尼 PS5 Pro 在主处理器应用液态金属作为界面材料时增加了细小的凹槽,使散热效果更加稳定,如图 22 所示。然而,目前常用的镓基液态金属不能与铝冷板共存,铋基液态金属的相变温度相对较高(通常高于 $60 \text{ } ^\circ\text{C}$),且由于溶解侵蚀、晶界腐蚀等影响,液态金属容易对其他固态金属产生腐蚀作用,并且成本通常较高,这些均限制了其大范围的推广应用。

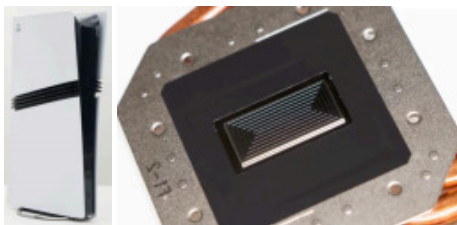


图 22 索尼 PS5 Pro 在使用液态金属处增加凹槽

固态的金属材料虽然热导率显著高于有机 TIM 材料,但金属材料本身较硬,导致接触热阻 R_{c1} 和 R_{c2} 相对较高。通过开发微纹理等措施改善填隙性能通常是此类材料降低界面热阻的关键。如钢基复合热界面材料在表面设置小尺寸的凸起纹理(通常为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mm}$),该小尺寸纹理装配在界面时,会提供塑性变形以适配接触界面^[34]。实验研究和工程应用测试结果显示,采用钢基微纹理金属材料能够显著降低界面热阻(约为纯钢箔的 $1/3$)及电子设备的运行温度^[35]。某种微纹理钢基合金及其表面特征如图 23 所示。微纹理金属压缩后,微纹理受到压缩形变,填充界面间隙。

金属 TIM 的特点是热导率相对较高(接近甚至大于 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), d_{BLT} 通常较低,可保证低体积热阻。然而,金属 TIM 在大尺寸条件下的填充性较差,需要较高的压强,通常适用于小尺寸的安装界面。显然,

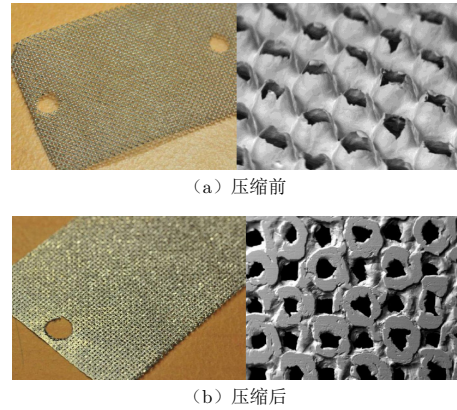


图 23 微纹理钢基合金及其表面特征^[35]

保留低体积热阻,同步降低接触热阻 R_{c1} 和 R_{c2} 并提升适配性是金属 TIM 的重要研究方向。例如有研究在一个双面铜纳米线阵列支架内注入液态金属作为热桥(图 24),形成的复合材料可同时保持高热导率和低接触热阻,在界面处表现出小于 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ 的超低热阻,在高功率密度的电子设备热管理方面展现出了应用潜力^[36]。

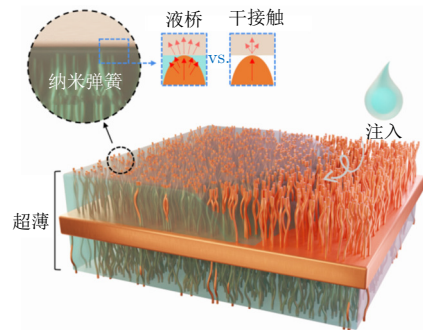
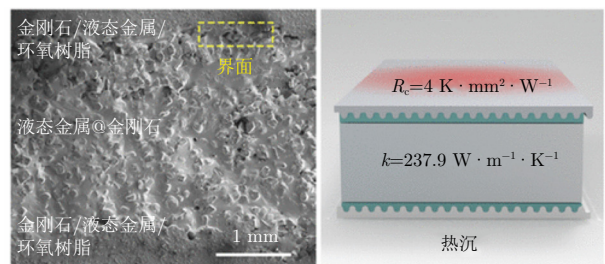


图 24 注入液态金属的纳米结构复合材料^[36]

面对持续增高的高热流密度电子设备散热需求,可重点关注无机非金属 TIM 和金属 TIM,多种材料也可复合使用,在满足高导热应用需求的同时改善填隙性能,进一步降低界面热阻。如图 25 所示,通过“界面涂覆-主体填充-表层封装”的三明治结构设计制备的金刚石/液态金属界面材料,既降低了液态金属的泄漏风险,又通过低热阻界面与高热导率实现热量



(a) 三明治结构的电镜图 (b) 界面材料示意图

图 25 金刚石/液态金属界面材料的三明治结构^[37]

的快速传导^[37]。

另一方面,面对阵列多芯片的散热场景(图26),针对阵列的发热器件与散热器之间高差范围较大、传统配高/测高方式工序复杂、流转周期长等问题,亟须发展低应力(如典型的压紧力 ≤ 275 kPa,压缩量为20%~50%)、高回弹(如回弹量 $\geq 80\%$)的界面材料,无需配高即可用同型号TIM保证阵列排布的多个器件与散热凸台间均良好接触。

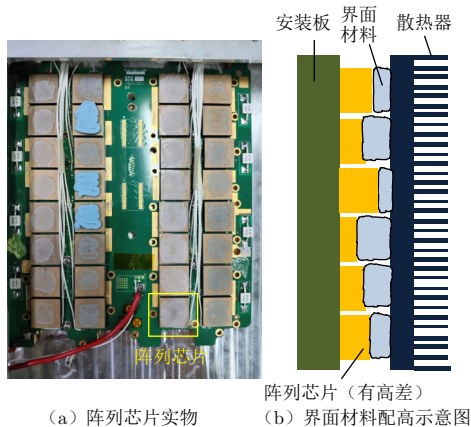


图26 阵列芯片高差引起的TIM配高问题

此外,电子设备面临越来越极端的工作环境,如极端的振动条件会使固-固界面接触传热产生显著的热波动特性,从而大幅影响散热性能^[38]。对于强烈的振动、冲击、颠簸等力学环境特殊的应用场景,或者温度交变循环频繁的场景,需充分考虑环境条件对界面材料选型及可靠性的影响。

2.3 热对流技术

2.3.1 风冷技术及强化方法

风冷技术是目前电子设备应用最广泛的热控技术之一,包括自然冷却和强迫风冷,通常适用于热耗、热流密度较低,空间尺寸较宽松的场合。然而,电子设备的功率密度持续提升,已接近或突破风冷技术的散热能力极限,特别是在高热流密度和空间受限的应用场景中,传统风冷技术的散热能力难以满足需求。因此,风冷技术发展的主要目标是强化散热,具体可分为三个主要研究方向。

(1) 增大有效散热面积

电子设备中的发热芯片属于典型的点热源,风冷散热器面积通常显著大于芯片面积。受材料导热系数的限制,较高的热量通常难以在散热器底板上有效扩展,呈现出中间高、四周低的温度分布,限制了散热器的有效散热面积。散热器可应用石墨、石墨烯复合材料等高导热材料或热管、均温板等相变传热元件,增

大有效散热面积,消除局部热点。

一种方法是利用均温板作为风冷散热器底板,其热导率可达到铝合金的几十倍,扩展了散热器底板的有效散热面积。如图27所示,对于 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的40 W热源及 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的散热器,均温板与普通铝合金相比,底板的热扩展效率由63%提高至95%,起到显著的“削峰填谷”效果,在同等条件下降温 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 。

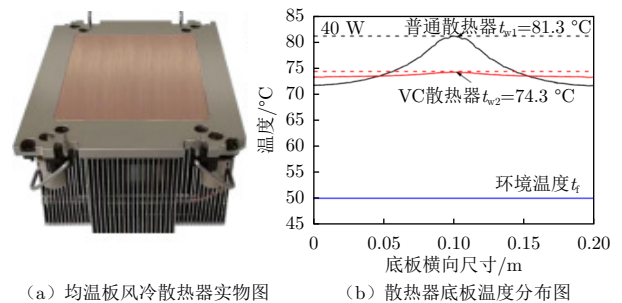


图27 均温板风冷散热器的“削峰填谷”效果^[2]

还有一种常用方法是将高导热均温板作为散热器翅片。用于基站自然冷却的高导热均温板如图28所示,通过均温板内的工质相变实现热源与翅片间的换热,扩展散热器翅片的有效散热面积,大幅提升散热能力。该方法已被广泛应用于5G基站等电子设备的自然冷却。

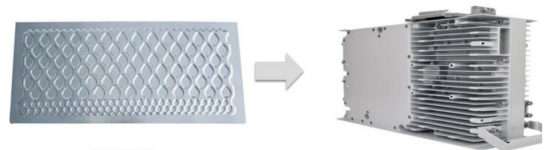


图28 用于基站自然冷却的高导热均温板

(2) 提升对流换热系数

对于强迫风冷,提高风冷流速、减小特征尺寸、打破风冷边界层等均是较为常用的提升对流换热系数的手段,然而这些强化方式带来的高流阻需要配合更强劲的风机,导致系统功耗与噪声的显著增大,需根据工程实际统筹优化换热系数与流阻。

提高流速对于自然风冷同样适用,如在自然风冷翅片顶端加盖板形成封闭通道,限制延程的新风补充,利用烟囱效应提升浮升力,如图29所示。在该案例中,空气流速提升达到26%,增大对流换热系数后,热源处降温 $> 3\text{ }^\circ\text{C}$ ^[39]。

(3) 协同强化

风冷优化时需综合考虑换热面积和对流换热系数的影响,持续增大换热面积可能导致流阻增大,反而

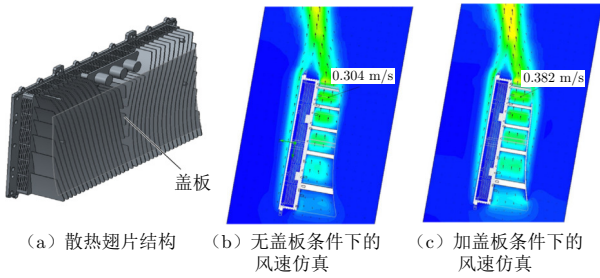


图 29 利用烟囱效应的自然风冷强化示意图^[39]

减小对流换热系数。二者的耦合效应可通过场协同理论寻优,即速度矢量与温度梯度之间的夹角越小,换热效果越好^[40]。

基于场协同理论开展翅形设计,将速度与温度梯度的局部夹角 θ 作为反映局部协同性的指标,如图 30 所示。对不同结构形式翅片的协同角分布进行分析,树叶形翅片可比平直翅片的平均协同角降低 4.6°,平均温度也相应降低 2.2 °C,显示出更优的风冷效果^[41]。

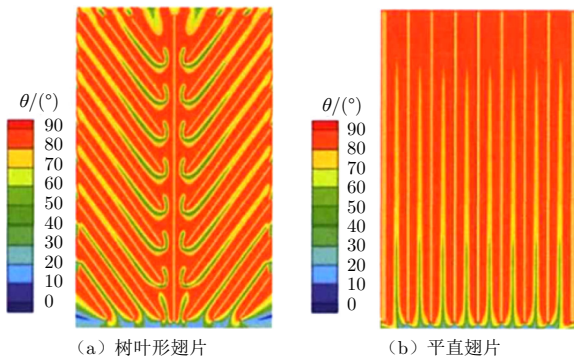


图 30 不同翅片的协同角分布^[41]

除了以上通过结构设计实现的无源强化散热,将外界能量输出至换热位置的有源强化散热方法也是可行选择。如 Frore Systems 公司开发的主动散热器 AirJet,利用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术制造微小压电薄膜,以超声波频率振动,产生的气流沿法向冲击热源表面,速度与温度梯度的协同性最好,具有高换热效率。采用相似原理的 MEMS 冷却器(图 31)可产生 3.4 m/s 的风速,全负载功耗仅 69 mW,整体封装尺寸为 6.0 mm×6.7 mm×2.1 mm,契合当前智能设备微型化、长续航的应用需求^[42]。该类型散热器在微小功率、高集成的应用场景中具有一定的优势,但在开放环境下的适应性仍需进行针对性的验证。

此外,除了提升散热能力,风冷流场的气流组织也是工程应用时的关注点,主要通过风道结构优化设计减少流阻、降低能耗、防止气流短路,通过风量的合理分配满足不同器件的散热需求。

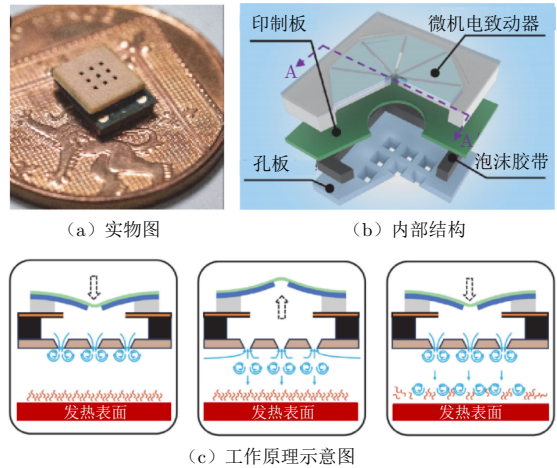


图 31 使用压电薄膜的 MEMS 冷却器^[42]

综上所述,风冷技术应用广泛,尤其在热管、均温板等技术结合后,其散热能力边界仍在不断提升。然而,随之而来的噪声大、能耗高等问题也成为关键工程挑战。尽管如此,由于风冷技术的结构简单、成本低、可靠性高以及故障后的次生危害小,目前仍是大部分中小功率电子设备的首选冷却方式。

2.3.2 液冷技术及强化方法

液冷技术是大功率、高集成、高热流密度电子设备散热的必然选择,其凭借散热能力强、噪声小、能耗低等优势,已成为解决电子设备高热流密度散热问题的重要手段。然而,液冷技术的潜力尚未完全释放,只有通过强化设计,才能充分挖掘其技术优势并满足日益增长的散热需求。当前液冷技术最主要的研究热点包括对流换热强化和流动路径优化。

(1) 对流换热强化

与风冷相似,增加换热面积 A 、提升对流换热系数 h 以及协同提升 A 和 h 是强化的三个方向。

增加 A 的主要方法是在流道内加工出面积扩展结构,如矩形直肋可以增大比表面积,且设计相对简单、易于加工。除了矩形直肋外,还可采用错列排布的间断翅片设计,如菱形肋、圆柱肋、椭圆肋等(图 32),在增大对流换热面积的同时还可以减小特征长度,破

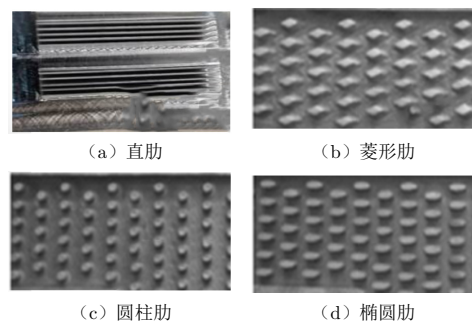


图 32 冷板流道内增加换热面积的扩展结构

坏边界层, 进一步提升换热能力。然而在高功率高集成的限制条件下, 间断数量的增加或特征长度的减小导致流阻增大, 强化的边际效应凸显, 难以适应器件热流密度持续增长的液冷强化换热需求。

提升 h 的通常手段是提高流速或增加绕流破坏边界层, 较为极端的方法之一是采取冲击射流。射流的速度矢量与温度梯度之间的夹角趋近于零, 符合增强换热的场协同理论, 是提升对流换热系数、解决高热流密度芯片散热瓶颈的热门方向^[43-44]。为了更进一步提升换热能力, 有研究将阵列射流与微肋翅片相结合设计^[45], 如图 33 所示, 在测试条件下可实现平均热流密度为 330 W/cm^2 、总功率为 2500 W 时的芯片温度低于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冲击射流在提升换热性能上有显著优势, 但其工程应用仍需重点解决系统可靠性、流动阻力降低、流道集成度优化等关键问题。

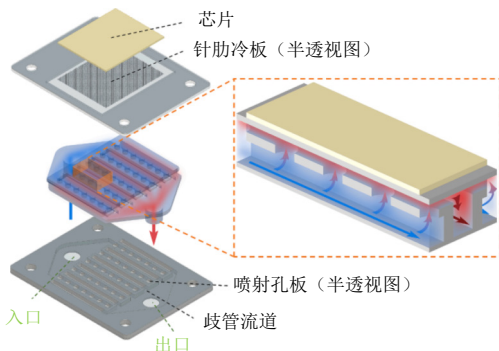


图 33 阵列射流与微肋翅片的结合设计^[45]

上述提升 A 和 h 的代价均是流动阻力的大幅增加。然而, 受系统能效及动力源性能的限制, 不能为了强化换热而一味地提升流阻。换热提升与流阻控制协同性较好的案例是瑞士洛桑联邦理工学院研究人员发表于《Nature》的多歧管微流道设计成果^[46], 如图 34 所示。该设计仅使用 0.57 W/cm^2 的泵送功率, 就可输送超过 1.7 kW/cm^2 的热通量。该研究掀起了多歧管微流道设计的研究热潮, 后续衍生出 Z 型、C 型、H 型、U 型等多种歧管形式研究^[47], 如图 35 所示。其基本思路均是将冷板中长距离的流体平行流动转变为短距离的冲击射流, 在有限空间内实现高换热能力与

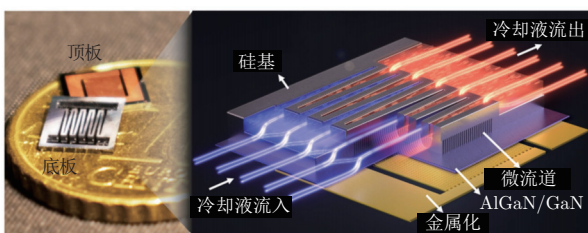


图 34 用于芯片冷却的歧管微流道设计^[46]

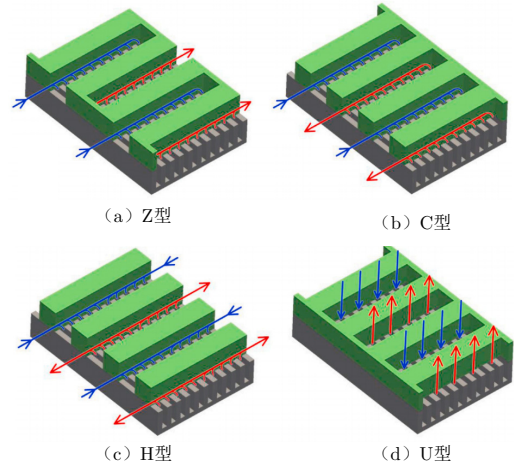


图 35 多型歧管微流道设计^[47]

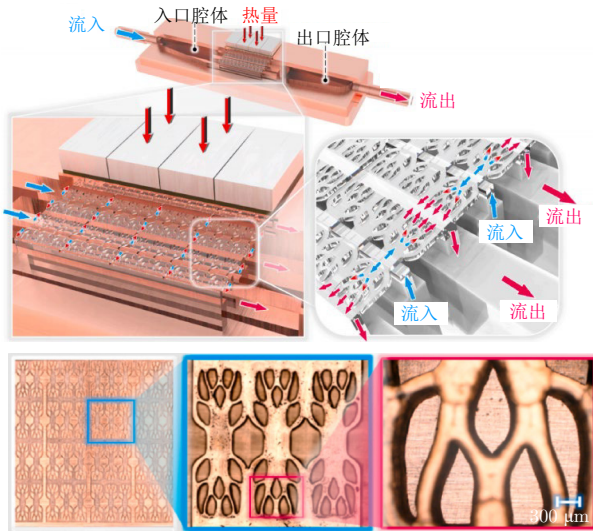
低流阻的协同。

(2) 流动路径优化

对于多芯片热源分布的电子设备冷却系统, 开展流动路径优化设计, 实现系统低流阻以及流量按需分配, 对降低冷却系统能耗及提升设备可靠性均有重要意义。

仿生设计是流道路径优化的方法之一, 如借鉴自然界中的生物结构, 形成仿叶脉、仿肺部气管、仿蜘蛛网等微流动结构, 具有较大的换热面积、较低的阻力和较高的流量分配均匀性^[48]。拓扑优化是流道路径的另一种有效设计方法, 其将流道结构转化为拓扑设计变量, 选取最小化平均温升、最小化压降、最小化能量耗散、最大化换热量等单因素或多因素加权作为目标函数, 建立明确的数学寻优方法, 如基于梯度、遗传算法、神经网络等优化算法, 在满足散热的前提下改善流阻等性能。有研究对阵列芯片的液冷板开展流道拓扑优化设计, 如图 36 所示, 以流阻和热阻最小化为目标, 形成热点位置密布、外围区域稀疏的流道布置特征, 相比直通流道, 它在满足芯片温度指标的同时具有更低的流阻^[49]。3D 打印技术的发展使仿生、拓扑等设计的实现成为可能, 然而受工程布局等约束, 目前实际拓扑优化后的冷板在工程上并未体现出显著的强化换热优势, 应用仍然受限, 值得进一步深入研究。

此外, 对于大型相控阵雷达、数据中心等具有超多并联支路的液冷系统, 管网设计也是工程应用的关注点。设计时优选同程式管网, 通过各分支流量的阻力匹配保证每个支路的流量分配精度。在保障系统散热满足要求的前提下, 需要保证连接可靠、维护方便、使用规范, 并通过简化设计实现体积小、质量轻、成本低, 以期达成管网的最佳综合性能。

图 36 流道拓扑优化设计^[49]

液冷技术按照液冷工质是否与电子设备直接接触,可分为间接液冷与直接液冷两种。其中,冷板式间接液冷技术是目前应用的主流,前述的强化方法均适用于此类方案。在特定场景下,如浸没式机箱(图 37),也会采用直接液冷技术。相较于冷板式液冷,浸没式直接液冷在局部热点的散热能力上稍逊一筹,但其能够全面覆盖设备内部所有元器件的散热需求,更易于实现全液冷设计^[50]。这种设计可避免使用内部风机,从而充分展现低噪声、低能耗等优势,尤其适用于高节能需求的场景,已在微软、亚马逊、阿里巴巴等企业的数据中心得到广泛应用。此外,直接液冷完全消除了界面热阻对散热性能的影响,降低了对器件安装布局、压紧力等的要求,增强了设备设计的灵活性^[51]。

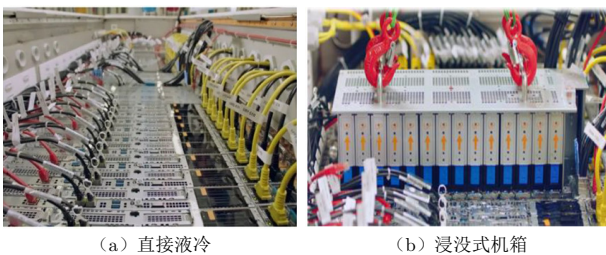


图 37 阿里数据中心应用浸没式直接液冷

然而,直接液冷技术也存在一定局限性,包括工质与器件的长期相容性要求较高、当前工质成本相对较高、设备维修维护过程相对复杂等问题,仍需通过工程优化实现更广泛的应用。此外,直接液冷并非适用于所有电子设备散热领域,例如在军工电子行业,目前的浸没式液冷难以满足装备轻量化与高机动性的要求,其应用场景仍存在一定的限制。

液冷技术在高功率军用电子装备领域的应用较为普遍,并累积了一定的工程经验,其重点关注方向是

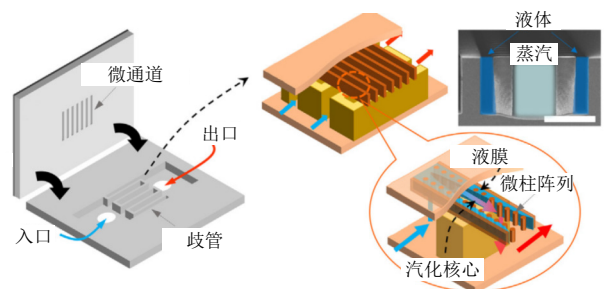
更强的散热能力、更高的集成度、更可靠的系统设计以及通用化低成本制造工艺的应用。针对数据中心等行业的新需求,液冷技术正处于增长初期,具有非常广阔的发展前景,目前正在建立相关的行业规范和标准。更低的能耗和成本、更高的性能和可靠性、更优的通用性和互换性等都是其工程推广应用的重点关注方向。

2.3.3 相变冷却技术及强化方法

液冷技术受限于显热传热的能力,工程上应对 500 W/cm^2 以上热流密度的难度急剧增加。同时,液冷使用的水基工质通常具有导电性,器件高集成度条件下漏液后的二次危害成为用户始终担心的问题。为此,相变冷却技术应运而生。该技术可利用汽化潜热实现更高效的换热,并且工质的绝缘性和系统的能耗都显著优于单相液冷,可能成为未来更高功率、更高集成度电子设备散热的必然选择。沸腾换热强化、流动稳定性控制以及新型工质研发是相变冷却技术的研究热点。

(1) 沸腾换热强化

单相液冷的各种对流换热强化方法同样适用于相变冷却,如在热源下方的相变冷板内开展多歧管微流道设计,在微流道底部进一步嵌入微柱以增大换热面积与扰动,如图 38 所示,在测试条件下实现了 770 W/cm^2 超高热流密度散热,并且具有极高的能效^[52]。

图 38 相变冷板内的歧管微通道设计^[52]

与单相液冷换热存在显著差异的是,液变气的沸腾过程是相变冷却换热的关键,对沸腾面进行表面处理,增加汽化核心、促进汽泡脱离是提升沸腾换热性能的关键。

常用方法是对沸腾面进行微结构设计。如图 39 所示,在光滑铜表面增加微孔涂层,壁面空腔结构可捕获气体从而促进沸腾成核,增加汽化核心实现强化沸腾,对流热阻可从 $0.39 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 降至 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ^[53]。

另一种方法是对沸腾面进行亲疏水性调控。如图 40 所示,采用混合亲疏水表面,在表面上印制疏水性聚合物点阵列,然后在阵列间隙沉积亲水性纳米结构,利用疏水表面利于快速汽化成核、亲水表面利于

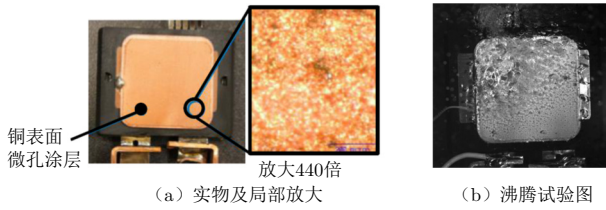


图 39 沸腾面微结构设计^[53]

汽泡脱离的特性,相比未处理表面,核态沸腾的传热系数可提升 3 倍^[54]。另有研究在亲水性基底上布置异质疏水性图案阵列,如图 41 所示,通过调整图案形状与间距获得最优的流动沸腾换热性能,与无疏水图案的亲水表面相比,测试条件下的对流换热系数最高提升 163%,临界热流密度最高提升 43%^[55]。

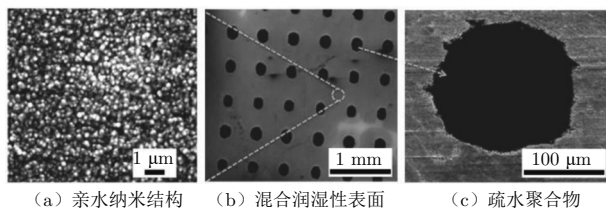


图 40 混合亲疏水表面的电镜扫描图像^[54]

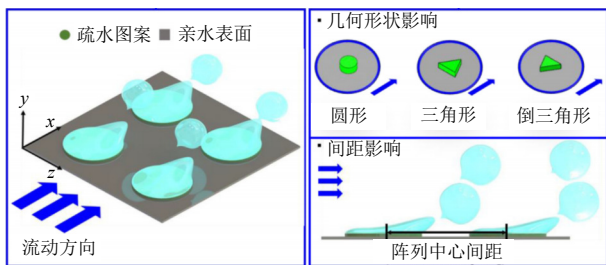


图 41 流动沸腾表面的亲疏水调控^[55]

上述两种方法也可综合应用。如图 42 所示,在超疏水硅表面上,基于激光烧蚀技术和金属辅助化学蚀刻方法,分别制造具有交错微通道和选择性纳米线的微纳表面结构,既有利于液体铺展与汽泡合并,又保留了疏水特性以避免干蒸汽层的扩展,进而同时实现沸腾的对流换热系数与临界热流密度的提升^[56]。

与单相液冷换热的另一个不同点是,单相液冷在固定边界条件下的换热温差与热流密度始终呈正比,

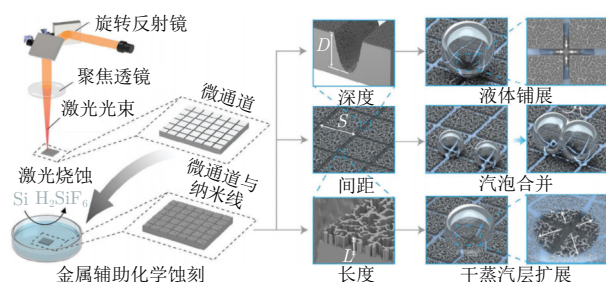


图 42 微结构设计亲疏水调控结合的沸腾强化方法^[56]

而相变冷却存在临界热流密度,超出该最大值后,受热壁面附近会形成蒸汽膜阻隔液态工质与壁面的接触,导致传热系数骤降及壁面温度骤升,引发局部过热甚至器件烧毁。

液膜沸腾是近期提升临界热流密度的研究热点,其在沸腾表面设计毛细结构,液体通过毛细抽吸作用,自发输运至需要散热的高温表面,汽泡则在毛细液膜内部成核并生长。如图 43 所示,该高效液膜沸腾结构利用铜网层间的间隙构成低阻力的液体流道,显著增强毛细输运力;高密度微孔穴作为汽泡成核位点,促进沸腾起始;穿孔则引导汽泡定向脱离,让其快速离开不滞留。通过上述结构,可实现 $978.8 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的传热系数及 $693.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的临界热流密度,获得极佳的被动式散热能力^[57]。

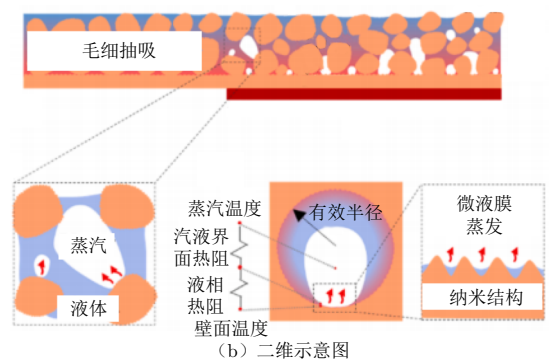
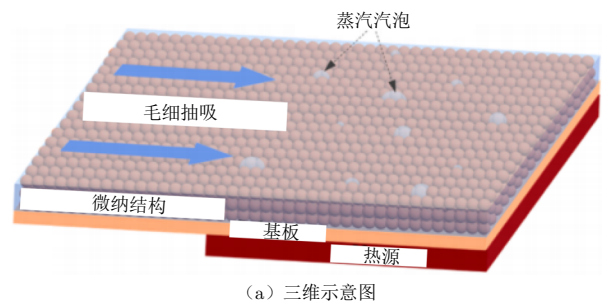


图 43 液膜沸腾原理示意图^[57]

(2) 流动稳定性控制

单相液冷全程保持液态流动,流体状态稳定。相比而言,相变冷却存在流动不稳定现象,在系统设计不当时,可能发生汽液状态的多变性、流体的可压缩性、系统中的可压缩容积变化等导致的流量和压力脉动或周期性振荡,继而恶化传热。

引起两相不稳定的扰动因素较复杂,其中一种是受到微通道尺寸的限制,单个微通道内可能发生两相汽堵,并引发大幅度的非稳定沸腾振荡,微通道内的工质温度、压力、两相流型均可能发生周期性振荡。如图 44 所示,在微尺寸通道内布置针肋等以抑制逆流和局部干涸、提升临界热流密度是该类微通道相变冷

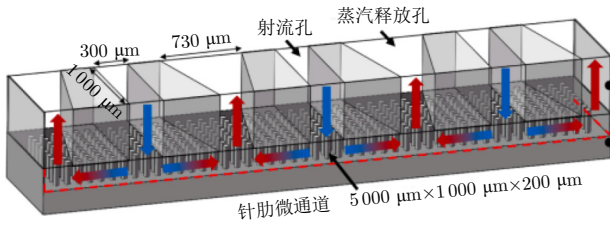


图 44 针肋微通道设计提升相变流动稳定性^[58]

板稳定性设计的关键^[58]。

还有一种常见扰动是多路并联支路的热负载实时变化。并联支路内部的流型随热负荷的转换可能使静力学流动不稳定, 流量、密度和压降之间相互关系的延迟和反馈效应也可能使密度波不稳定。对相变系统稳定性开展定量评价的方法研究有助于预测稳定性边界, 确保两相冷却系统的运行工况在稳定区^[59]。目前, 相变冷却是研究热点, 也有了部分工程应用案例。如图 45 所示, 相变冷却技术应用于大型相控阵雷达, 实现了数千个并联支路上功率捷变条件下的流动稳定性控制, 确保雷达装备长期安全可靠地运行^[60]。

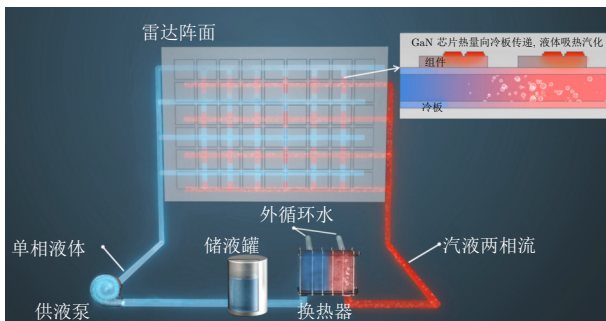


图 45 相变冷却应用于大型相控阵雷达示意图^[60]

(3) 新型工质研发

从机理上看, 相变冷却具有散热能力强、工质流量需求小、均温性好、泄漏后挥发对设备几乎零危害等本质优势, 被普遍认为具有比单相液冷更强的应用潜力, 可应对未来高功率微波电子、电力电子、通信电子等设备的散热需求。然而, 当前相变冷却工质的选型受安全性、物性等约束, 工质的汽化潜热远低于水, 散热能力受到一定的制约, 需重视新型高效的相变冷却工质研发。在电子设备的很多应用场合, 提升相变冷却的技术成熟度, 有望实现对单相液冷技术的全面替代。

2.4 热辐射技术

热辐射是通过电磁波传递热量的物理过程, 广泛存在于电子设备与环境或设备内部各组件之间。在卫星平台、浮空平台等极端环境中, 热辐射是主要的传热方式, 即使在地面户外设备中, 热辐射占比也可达

10% 以上^[61]。随着电子设备热耗的增加及散热难度的提升, 精细化考虑热辐射等多因素影响已成为必然趋势。电子设备用热辐射技术可按功能分为散热类、隔热类和自适应热控类, 如图 46 所示。

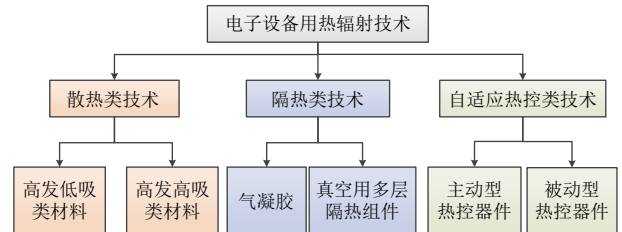


图 46 电子设备用热辐射技术分类

2.4.1 散热类技术

电子设备表面辐射散热通常采用高发射率、低吸收率的热辐射涂层, 如热控白漆、聚酰亚胺镀铝膜、光学太阳发射镜等。近年来, 基于微纳技术的新型辐射制冷材料成为研究热点, 如超材料、光子晶体、光学薄膜等。这些材料在太阳光谱的 0.3~2.5 μm 波段具有高反射率, 可减少热量吸收, 同时在“大气窗口”8~13 μm 波段具有高红外发射率, 将热量以热辐射形式散逸至太空, 实现日间辐射制冷^[62]。例如, 通过聚合物网络引入纳米 ZrO₂ 填料制备辐射冷却薄膜, 在无能耗条件下实现昼夜温降(白天降温 5.8 °C, 夜间降温 6.7 °C)^[63]。此外, 结合低熔点玻璃骨架和氧化铝颗粒的辐射制冷涂层, 在高湿度条件下可实现昼夜温降 3.5 °C 和 4 °C^[64]。

电子设备内部单机表面的辐射散热则采用高发高吸类材料, 如热控黑漆、黑色热控薄膜等, 通过强化内部辐射传热实现散热。此外, 宇航用可展开热辐射器和临近空间用多翅片辐射散热器通过增加辐射面积, 进一步提升了辐射散热量。

2.4.2 隔热类技术

常用的隔热类技术措施有气凝胶、真空用多层隔热组件等。气凝胶通过三维纳米结构的无限长路效应、多孔结构的气流限制以及遮光剂的热辐射抑制, 实现极低的热导率, 在室温下通常可低于静止空气的 0.026 W/(m·K)。针对极端高温环境(如高超音速飞行器的 1 200 °C 以上气动热), 有研究提出碳层封装策略, 如 Al₂O₃-C “核-壳” 纳米棒气凝胶, 利用碳涂层赋予材料超轻质、高强度、耐高温隔热及超疏水特性, 为电子设备隔热防护提供了新思路^[65]。

对于星载电子设备, 多层隔热组件通过真空隔热和镀铝聚酰亚胺薄膜, 可将当量热导率降低至 10⁻⁵ W/(m·K)。例如, 美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的韦

伯望远镜使用 5 层网球场大小的遮阳罩, 每层由镀铝聚酰亚胺薄膜制成, 层与层间真空隔热, 将主镜表面温度降至-225 ℃ 以下。

2.4.3 自适应热控类技术

自适应热控类技术为了兼顾散热、保温以及减少热控功耗的多重需求, 需实时调整散热表面的发射率。可变发射率热控器件可分为主动型和被动型两大类[66]。

主动型热控器件强调使用各种驱动信号来调节各项热控参数, 实现快速精确控温, 如基于微机电系统的微型热控百叶窗辐射器、电致变色热控器件等。NASA 的 ST-5 试验卫星上使用的推拉式微型热控百叶窗, 利用静电梳齿电极驱动叶片推拉, 调节散热面积, 开关数千万次无损坏[67]。

被动型热控器件则利用器件自身特殊的物理化学性质, 随着环境温度的变化自主调节发射率(通常为低温低发射率、高温高发射率), 如基于热致变色的智能热控器件、微型热开关等。航天器可采用钙钛矿锰氧化物温控器件, 自主协同调控太阳吸收率和红外发射率, 实现零能耗温控, 解决在轨运行时向阳/背阴面温差巨大的问题[68]。

此外, 微尺度下的近场热辐射也是新兴的研究热点, 当换热系统的特征尺寸与热辐射峰值波长相当时, 辐射换热量可远超黑体辐射极限, 为微型设备的热管理提供全新解决方案[69]。然而, 该技术受限于纳米级间距调控和超材料制备工艺, 需在可靠性、成本和能效间寻找平衡点, 实现从实验室到工程的跨越。

2.5 储热技术

储热技术通过储热材料将电子设备在短时间内产生的热量存储起来, 避免因温度过高影响设备性能, 广泛应用于瞬时或间歇工作的电子设备热设计中。储热材料可分为显热储热、潜热储热和化学储热三类, 如图 47 所示。

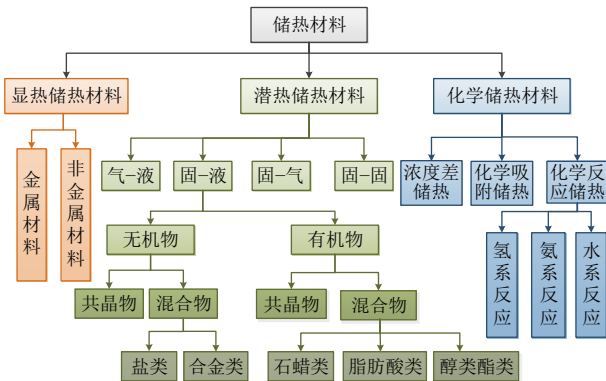


图 47 储热材料分类

2.5.1 显热储热

显热储热利用材料的比热容实现热量存储, 具有较好的稳定性。然而, 显热储热材料的储热密度普遍较低(等效质量储热密度普遍小于 60 kJ/kg, 等效体积储热密度普遍小于 200 kJ/dm³), 通常仅作为储热系统的一项辅助措施, 常用材料的等效储热密度统计如图 48 所示。

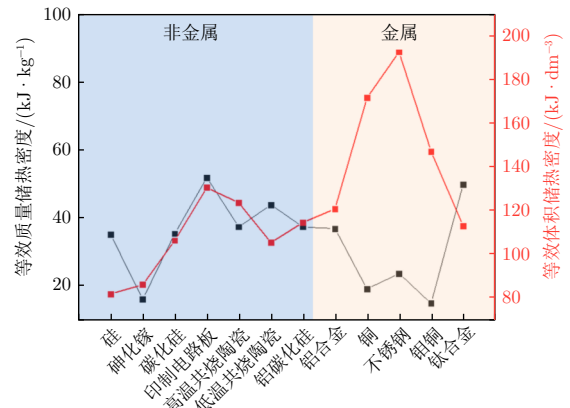


图 48 常用材料的等效储热密度

尽管显热储热密度较低, 在热设计过程中也往往被忽视, 但对于集成度较高的电子设备, 系统中绝大多数材料均为显热材料, 通过优化显热材料选型设计, 可将显热储热能力发挥到极致。

2.5.2 潜热储热

潜热储热利用相变材料在相态变化过程中的吸/放热现象来实现热量的存储与释放。如图 49 所示, 常用材料包括无机类的熔融盐、金属或合金, 有机类的石蜡类、脂肪酸类、醇类等。尽管该类材料在储热密度方面具有显著优势, 但除了金属合金类相变材料外, 其余绝大部分相变储热材料都面临热导率低的问题(普遍小于 1 W/(m·K))。低热导率是制约其大规模应用的重要因素之一, 因此强化潜热储热材料的导热性能、提高储热利用效率一直是该领域的研究重点。

一种导热强化方法是填充高导热材料。如将储热材料灌注至多孔泡沫金属中[70]。如图 50 所示, 高导热泡沫金属骨架将热量快速传递到多孔材料的各部分。该方法应用逐渐成熟, 但在工程应用中需关注泡沫金属与储热装置间的接触热阻, 以防导热增强变为泡沫金属内部的无效热传导。还可在储热材料中添加固定形状的高导热骨架, 如将高导热石墨用作基体与相变材料制备为复合相变材料, 可将热导率提高 5~100 倍。

另一种导热强化方法是提高接触面积。在金属储

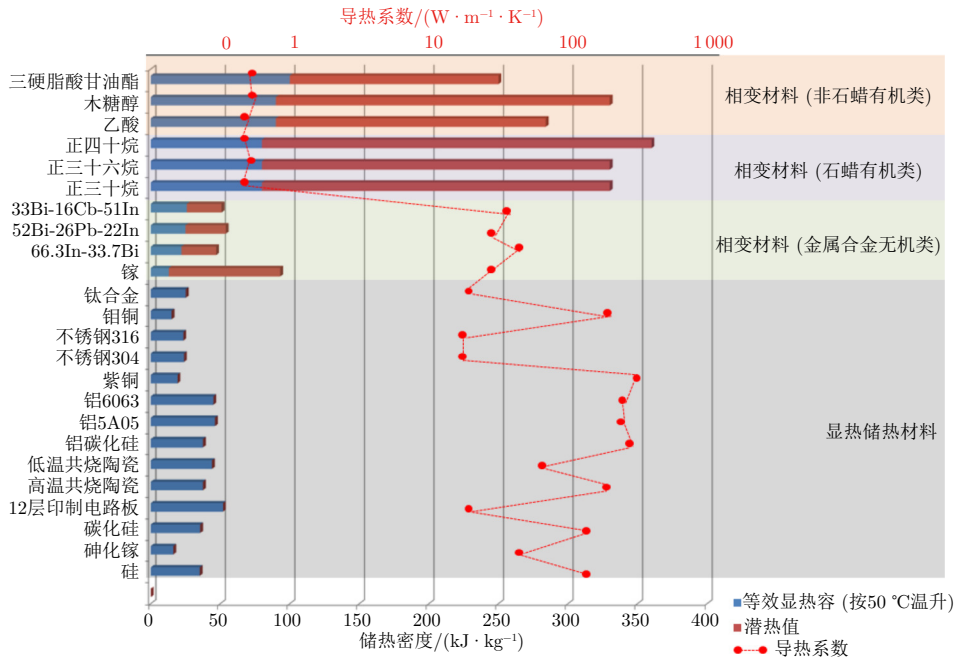
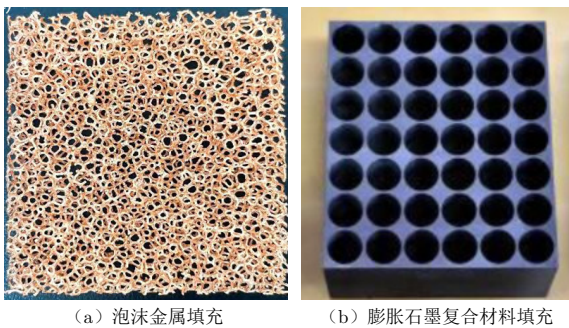


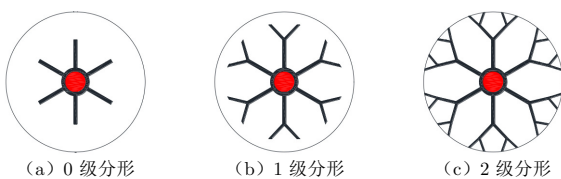
图 49 常用储热材料的储热密度及热导率对比



(a) 泡沫金属填充 (b) 膨胀石墨复合材料填充

图 50 高导热材料填充

热装置内部设计肋片,尤其是分形肋片(图 51),增加传热表面积,提升传热性能。相较于常规肋片,分形肋片具有更合理的空间分布,能更均匀地将热量由点及面地扩散,使相变储热材料具有更快的熔化凝固速率和更好的温度均匀性^[71]。然而,在工程应用时需注意肋片对储热材料对流效应的抑制影响,防止储热性能的降低。



(a) 0 级分形 (b) 1 级分形 (c) 2 级分形

图 51 分形肋片增加导热面积^[71]

显然,相变材料的应用能够有效提高温度的时空均匀性,降低热点温度。为克服其较低热导率的应用瓶颈,材料性能和散热器结构的优化设计均是可持续开展的研究方向。此外,相变材料还可以与其他被动

方式的热管理技术(如辐射制冷技术、发汗冷却技术,尤其是基于吸附贮湿的蒸发冷却)相结合,实现更好的电子设备热管理性能^[72]。

2.5.3 化学储热

化学储热是利用可逆化学反应中热能与化学能的转换来存储和释放热量的技术,通常可分为浓度差储热、化学吸附储热和化学反应储热三类^[73]。

化学储热的储热密度是三种储热技术中最高的,普遍超过 800 kJ/kg,但化学储热原理复杂,仍需开展大量关于反应机理、反应动力学、反应过程与传热过程控制、耐腐蚀性、产物控制等方面的一系列研究。此外,如何提升化学储热技术的循环稳定性以及如何实现化学储热温度范围的控制也是一项关键研究方向。化学储热技术可能是未来实现电子设备储热能力跨代提升的一项重要技术,但目前绝大部分仍处于实验室研究阶段,技术成熟度有待提高。

2.6 微系统冷却技术

随着封装朝着系统集成、高速、高频、三维互连方向发展,电子设备的微系统化特征越加明显,其研究对象、研究范围、研究方法等由于尺度效应均发生巨大变化,传统冷却方法往往无法有效解决微系统内部的散热问题,因此本文将一系列旨在解决微系统内部散热问题的主/被动冷却技术统称为微系统冷却技术。

热设计已从过去主要关注封装外部的散热方案逐步深入到封装内部的源头热管理。当前微系统冷却技术应关注封装架构的热合理性设计,从源头上避免结

壳热阻过高；针对封装材料内部的热量传递挑战，金刚石、石墨烯等芯片近结高导热材料已成为研究者关注的重点；针对封装异质结构间的热量传递挑战，异质界面低热阻技术是目前的研究热点；针对封装内外热量传递的挑战，嵌入式微流体、微冷却控制元件的一体化集成技术是后续的重点突破对象。

2.6.1 封装架构的热合理性设计

芯片封装通常需兼具电、力、热三方面的作用，即确保电信号互联、提供力学防护、保证芯片散热。随着封装向 2D/2.5D/3D 等更复杂形式发展，电气互联距离更短，力学防护性能提升，其代价往往是封装内部传热路径变长及热互联架构的不合理。因此，在封装架构论证阶段，首先需要电学与散热的协同设计，避免封装内部的结壳温升过高造成芯片使用受限以及系统性的资源浪费。

如图 52 所示，在常规设计中，芯片散热路径通常为芯片→封装壳体→印制板→冷板，芯片与冷板间的热阻典型值达到 30 ℃/W，通常仅适合 1 W 以下的低功耗芯片。对于中高功耗的芯片，上述架构显然无法满足散热需求，需缩短传热路径并提高传热路径上材料的热导率，如将热耗较高的功放芯片倒装，将传热方向与电传输方向分离，形成芯片→封装壳体→冷板的传热路径，芯片与冷板间的热阻典型值可趋近 1 ℃/W，满足功放芯片的散热需求。显然，热合理性设计应成为封装架构的首要设计步骤，确保封装内部的芯片温升合理，避免造成过温或系统性的冷却资源浪费。

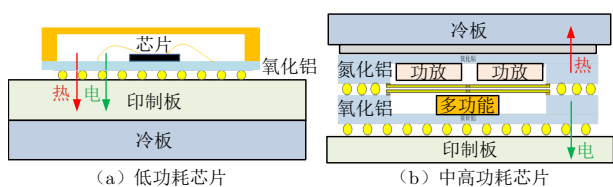


图 52 系统级封装芯片的传热路径

2.6.2 芯片近结高导热材料

衬底材料是影响半导体器件热量传递的关键。目前大功率 GaN 器件的主要衬底材料是碳化硅^[74]，而金刚石显然具有更高的热导率和更具潜力的应用价值，但其与 GaN 的热膨胀系数和晶格匹配存在较大差异，这也成为当前的研究热点^[75]。如英国航空航天公司开展了 GaN/金刚石低温键合方法研究，其早期制备的 2.54 cm 金刚石衬底 GaN 结构键合成功率达到 70%，随后又将金刚石衬底 GaN 晶片推广到 7.62~10.16 cm^[76]。如图 53 所示，其输出功率密度是碳化

硅衬底的 3 倍，并且结温更低^[77]。美国 Group4 Labs 采用直接生长技术制成了金刚石衬底的 GaN 器件，如图 54 所示，其可支撑功率密度是传统硅衬底器件的 3.87 倍，且工作热点温度降低了 40%~50%^[78]。

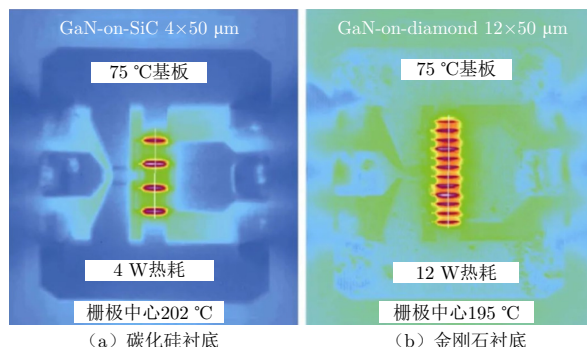


图 53 GaN 器件金刚石与碳化硅衬底的散热对比^[77]

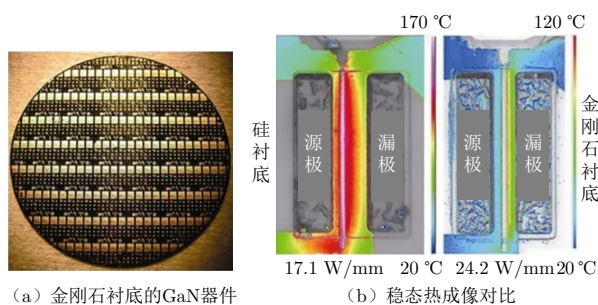


图 54 基于直接生长技术的金刚石衬底 GaN 器件及其与硅衬底的散热效果对比^[78]

除在高功率芯片衬底上采用高导热材料增强平面上的快速扩热之外，在芯片顶部的钝化层覆盖高导热膜以增强扩热效果也越来越受到重视^[79]，如利用金刚石薄膜材料替换有源区的传统钝化层 Si₃N₄ 材料。斯坦福大学的研究称在金刚石/Si₃N₄/GaN 界面处实现了接近理论预测的(3.1±0.7) m²·K/GW 的低界面热阻。如图 55 所示，金刚石集成在 GaN 沟道层 1 nm 内，且不会降低沟道的电性能，实测钝化层的热导率高达(638±48) W/(m·K)^[80]。此外，也有研究采用石墨烯覆盖在 GaN 芯片漏极，将芯片产生的热量从漏极导入石墨及整个芯片衬底，同样实现了有源区温度的大大降低，如图 56 所示，石墨烯扩热可将 GaN 器件热点温度从 450 ℃ 降低至 380 ℃。

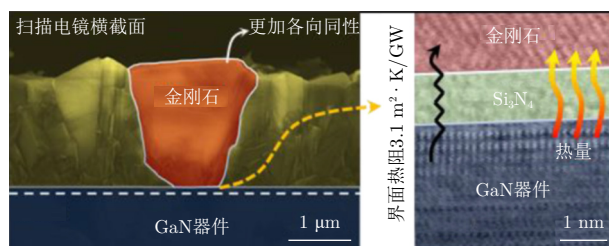
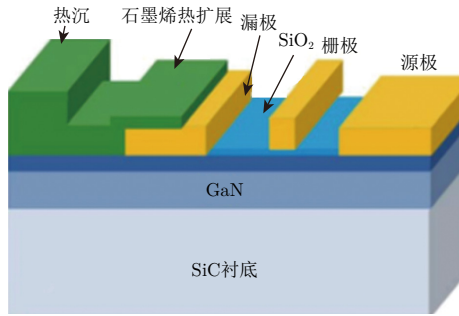
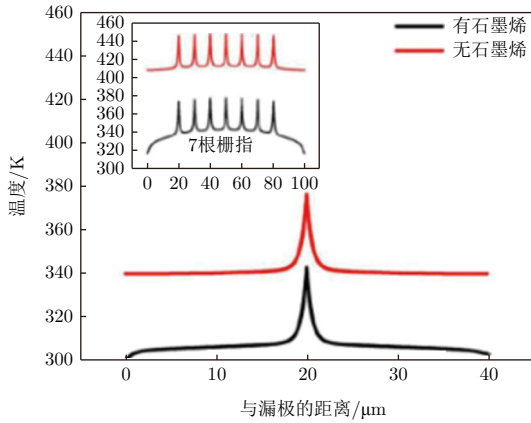


图 55 GaN 表面金刚石钝化层散热效果研究^[80]



(a) 石墨烯钝化层覆盖示意图



(b) 散热效果对比

图 56 石墨烯钝化层覆盖示意图及效果对比^[2]

2.6.3 异质界面低热阻技术

金刚石与 GaN 的低热阻连接是该方向的研究热点, 主要包括直接沉积与低温键合两种方式。

直接沉积方法, 如在制备好的半导体器件上直接沉积一层金刚石膜, 可实现金刚石和半导体器件的直接连接, 如图 57 所示。有研究者利用该方法在器件上生长厚度为 500 nm 的金刚石薄膜, 未观察到器件直流特性的退化或变化, 证明二者的相容性良好^[81]。

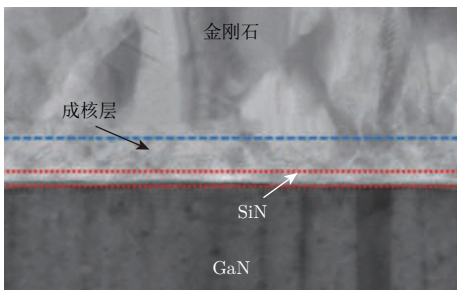


图 57 在 GaN 上生长金刚石层横截面电镜图^[81]

低温键合方式是指先利用外延生长工艺在衬底上沉积 GaN, 然后去除衬底, 并与金刚石衬底进行低温键合。如图 58 所示, 研究者将 GaN 缓冲层厚度减小, 消除成核层, SiC 衬底通过低温键合技术被高导热性的金刚石代替。通过这种设计使 GaN 器件的热源集成在金刚石衬底的 1 μm 内, 显著降低了器件热阻。

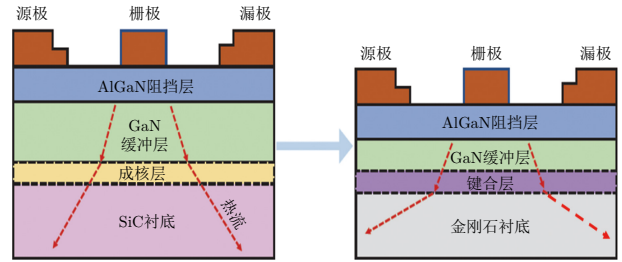


图 58 SiC 衬底与金刚石衬底的结构示意图^[2]

2.6.4 嵌入式微流体技术

现有的微系统散热瓶颈推动冷却技术由传统的“远程散热(冷板进液)”向芯片“近结冷却(芯片进液)”方向发展, 散热能力与日俱增^[82]。

在嵌入式微流体技术的各类研究中, 以 DARPA 的 ICECool 项目研究较为全面^[83-85], 斯坦福大学、马里兰大学、佐治亚理工大学、普渡大学等高校的学者结合功放芯片及高性能计算芯片提出了多种芯片微流体方案, 考虑了流道材料、强化结构、集分水形式、主动或被动等多种因素及其组合应用。

行业翘楚台湾积体电路制造股份有限公司提出了基于硅集成的微冷却器, 如图 59 所示, 通过将液体冷却剂直接引入硅芯片背面, 解决界面材料接触热阻对高功率密度芯片的限制, 建立的演示系统可解决其晶圆级系统集成封装器件散热难题(功耗为 3.4 kW、热流密度为 250 W/cm²), 在满足高性能计算/人工智能应用的热性能需求的同时, 符合电气性能要求^[86]。有研工程技术研究院开展了金刚石/铜复合材料的微通道相变散热研究, 其低线性膨胀系数有望作为芯片衬底材料, 实现芯片的高效近结冷却^[87]。南京理工大学

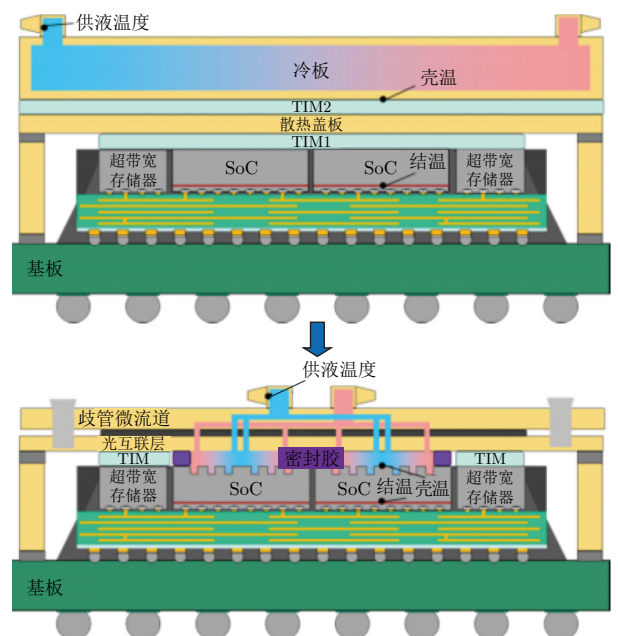


图 59 远程冷板架构向硅基进液近结冷却转变^[86]

团队将多层电路与流道结构集成, 实现多芯片组件与嵌入式液冷技术相结合, 如图 60 所示。该近结冷却方式适合高热流密度芯片散热, 同时对于非均匀分布热源, 还可减小热串扰并提高温度均匀性^[88]。

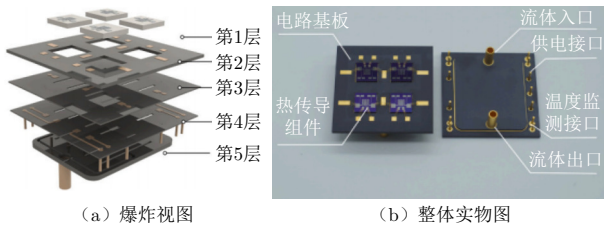


图 60 嵌入微流道的芯片组件^[88]

作者所在的研究团队也开发了内嵌微流道的高热流密度硅基散热器^[89], 采用歧管式微流道设计, 实现芯片热流密度 1 kW/cm² 以上的散热能力, 温升仅 49 °C, 为高热流密度高集成芯片阵列散热提供解决方案, 如图 61 所示。目前各研究机构虽已完成各类原理样机研制, 但工程应用仍面临微通道内洁净度控制、液冷工质与近结材料的长期相容性、流动阻力控制、高集成微型泵与换热器的研发等难题, 工程应用仍然受限。

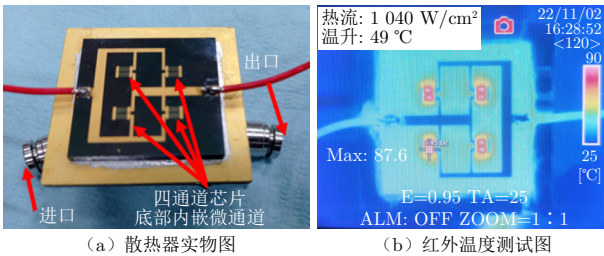


图 61 内嵌微流道的高热流密度硅基散热器^[89]

2.6.5 微冷却控制元件

在如上所述的嵌入式微流体技术中, 为了保持微流体的运行洁净度以及提升电子设备的系统集成度, 实现微泵、微阀、微型换热器等微冷却控制元件的一体化集成显然是重要的研究方向。

例如, 将 4 个压电微泵组成的阵列应用于芯片阵列微系统散热, 如图 62 所示, 其最大工作流量达到

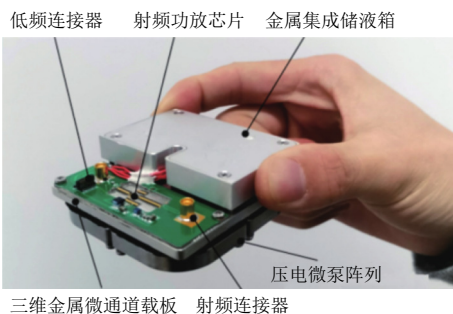


图 62 配置压电微泵阵列的芯片微系统^[90]

57 mL/min, 可实现热耗 14.5 W 与热流密度 250 W/cm² 的芯片阵列散热^[90]。借助 3D 打印技术的成熟发展, 有研究将压电微泵与散热器进一步打印成紧凑的整体(图 63), 其尺寸仅为 70 mm×40 mm×20 mm, 最大流量可达 62 mL/min, 为微集成的电子设备散热轻量化发展提供解决方案^[91]。

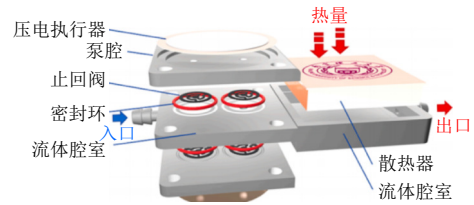


图 63 压电微泵与散热器一体集成的微冷却系统^[91]

作者所在的研究团队也设计了微系统冷却原理样机, 采用 L/min 级的水力悬浮离心微泵^[92], 如图 64 所示。样机测试实现了 500 W/cm² 的四芯片微系统冷却需求, 提供超高热流密度芯片冷却系统微型化的解决方案^[93]。

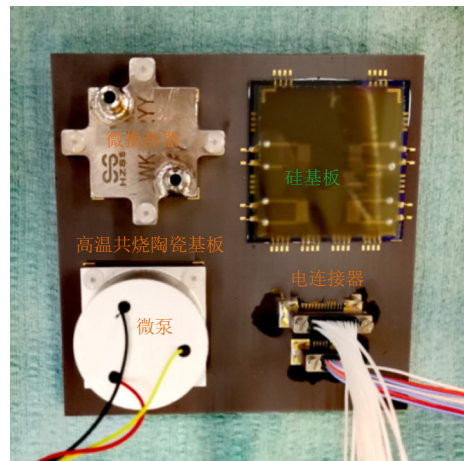


图 64 配置 L/min 级微泵的微系统冷却样机^[92]

微泵是实现高热流密度射频微系统冷却的核心部件。振动隔膜驱动泵目前仅能满足低热流密度阵列芯片或低热耗单芯片的微系统散热需求; 旋转式驱动泵目前已可为高热流密度阵列芯片提供较高的流量与扬程, 可用于大功率微系统散热。研制兼备高性能与微型化特征的微泵, 是解决大功率微系统的散热瓶颈问题的思路之一^[94]。

2.6.6 “热-力-电”协同设计

尽管三维异质异构集成微系统具有众多性能上的优势, 但它采用更短垂直互连的方式集成了更多不同类型、材料和结构的芯片, 导致其特征尺寸更小、布局更密集, 呈现强烈的“热-力-电”多物理场耦合效应^[1], 如图 65 所示。

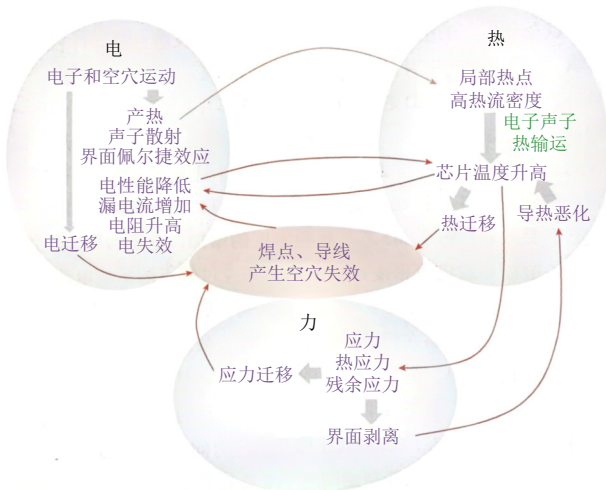


图 65 微系统中的“热-力-电”耦合问题^[1]

对于高密度硅通孔(Through-Silicon Via, TSV)垂直互连的 3D 封装微系统, 电热耦合下硅转接板温度分布与 TSV 直径显著相关, 热流密度与 TSV 节距

显著相关。在实际的 TSV 设计过程中, 在保证电学性能完整实现和散热满足要求的基础上, 应尽量选用小尺寸大节距的 TSV 设计方法, 避免距离过近的 TSV 阵列设计造成结构的热应力集中。“热-力-电”多物理场协同仿真分析结果如图 66 所示。该设计方法满足系统对 TSV 电学、热学及力学可靠性的要求。

目前微系统架构从 2D 向 3D 方向快速发展, 器件从低功耗、低功率密度向高功耗、高功率密度方向不断提升。三维堆栈芯片的逐步应用以及整个系统的小型化, 尤其是低剖面化的发展需求, 导致微系统热设计问题越来越严峻, 微系统冷却技术已成为产品设计中的关键技术之一。目前工业界和学术界均处于技术理论向产品应用发展的关键时刻, 急需加大单项高效散热技术和一体化集成技术的跟踪及研发力度, 同时必须考虑与末端冷却系统的关联和工艺可实现性, 推动系统冷却技术的成熟和应用。

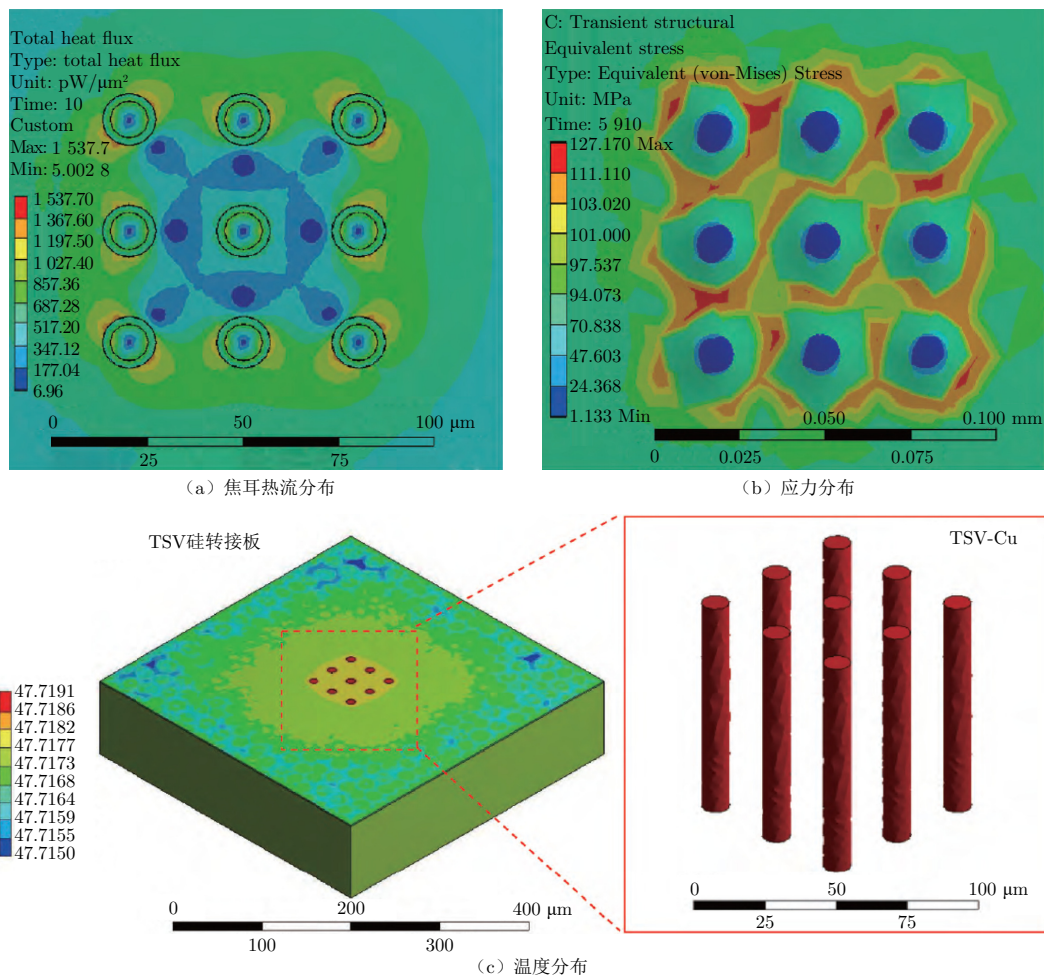


图 66 微系统“热-力-电”多物理场协同仿真分析结果^[2]

3 热设计技术的选取建议

热设计的方法、目标多种多样, 针对应用场景选

择最优热设计技术往往是热设计方案的关键点^[95-96]。本文归纳并提供了三种选取建议, 供热设计时参考。

3.1 简单至上

对于电子设备的几种热对流技术,可根据器件的热流密度进行选取,如图 67 所示。在满足电子器件温度要求的基础上,散热方式越简单越好。当设备量少且系统复杂程度低时,散热系统的可靠性往往较高。

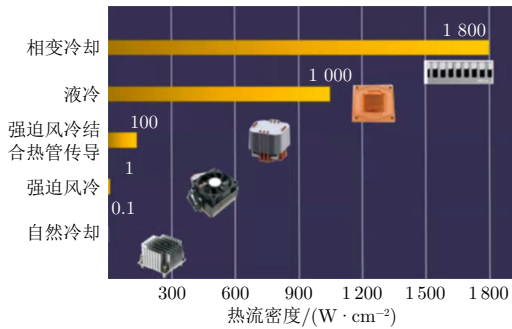


图 67 按热流密度选择冷却技术

自然冷却不需要通风机或泵之类的冷却驱动装置,避免了因机械部件的磨损或故障影响系统可靠性的弊病,具有可靠性高与成本低的优势,在器件热流密度低于 0.1 W/cm² 的场合,通常优先推荐自然冷却。强迫风冷的散热能力相比自然冷却可提高一个数量级,推荐在器件热流密度为 0.1~1 W/cm² 时使用。如将强迫风冷与热管传导结合起来,则可将散热能力提升至 100 W/cm² 量级。相比液冷,风冷类方法具有设备简单与成本低的特点。液冷利用液体换热能力高、携热能力强的优势,冷却能力最高可趋近 1 000 W/cm²,其较高的冷却效率满足绝大多数电子器件的散热需求,但增加了驱动泵、气-液热交换器等设备,可靠性与经济性通常不及风冷。相变冷却在实验室的最高冷却能力可突破 1 000 W/cm²,适用于热流密度极高的电子设备,但其冷却系统的复杂度最高。

因此,按冷却能力由低到高排序,分别为自然冷却、强迫风冷、液冷、相变冷却,而该排序恰恰又是冷却系统由简单到复杂、成本由低到高的排序。开展电子设备热设计时,在满足电子器件温度要求的基础上,若无特殊的应用边界条件限制,推荐按自然冷却、强迫风冷、液冷、相变冷却的顺序选取冷却方式,尽可能满足简单可靠的要求,通常这也是性价比更高的选择。

3.2 近结优先

越靠近发热芯片节点的热设计方式往往越有效。近结优先指先进的热设计技术手段需优先使用在靠近芯片节点的位置,即好钢用在刀刃上。

对于先进的高导热封装材料,其应用位置越靠近芯片热源,热扩展优势越显著。如图 68(a)所示,将高

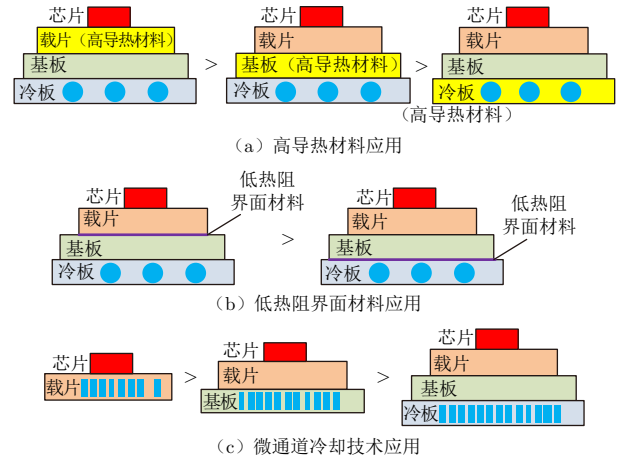


图 68 热设计技术的近结优先

导热材料用于器件的芯片载片,所能提供的散热性能显著优于将其用于热扩展基板或冷板。

对于先进的低热阻界面材料,其应用位置越靠近芯片热源,降低接触温升的作用越显著。如图 68(b)所示,在芯片载片与热扩展基板间使用低热阻界面材料,其散热性能显著优于将低热阻材料用于基板与冷板间。

对于先进的微流道冷却技术,其应用位置越靠近芯片热源,冷却能力越强。如图 68(c)所示,将冷却介质引入芯片载片的微流道,可完全消除载片之外的界面热阻与传导热阻,冷却能力可达到 1 000 W/cm²;将冷却介质引入热扩展基板中的微流道,可消除热阻较大的基板-冷板界面热阻,将冷却能力提升至 500 W/cm² 左右;将冷却介质引入冷板的微流道,在传统架构的基础上进行对流换热强化,其冷却能力的提升相对有限。

3.3 以人为本

热设计不仅需保证电子设备工作的可靠性,在有人使用的场合下,还需保障人员的使用舒适性。在人与设备交互较频繁的场景下,使用者的体验可作为电子设备热设计选择的重要判据,有时即使满足散热方式简单、近结优先等要求,但若热设计方式造成环境噪声大、使用者体感温度不适宜等问题,就必须考虑改变热设计方案,提升使用体验。例如,军用电子方舱中使用的电子设备机箱,一般采用风冷方式,满足简单至上的选取建议,但随着功率的不断提升,风机运转产生的噪声问题越来越严重,这时就应该以人为本,充分考虑人员的使用体验,改变冷却方式,采用基于传导液冷、贯穿液冷等技术制造的无风扇静音机箱,如图 69 所示。

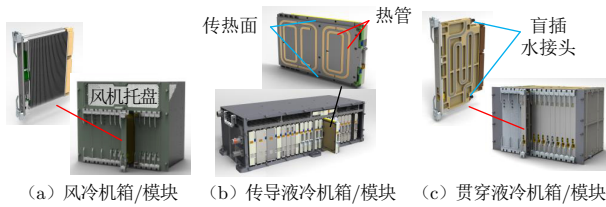


图69 机箱热设计方式的选择

4 结束语

随着电子技术的迅猛发展,电子设备的功率密度和集成度不断提升,热设计面临的挑战日益严峻,并逐渐发生着三个方面的转变:

1) 从非主要设计因素转变为关键瓶颈因素。热设计不再是设计过程中的辅助环节,而是直接影响电子设备性能和可靠性的核心要素。

2) 从设计后期校核转变为设计初期正向设计。热设计必须在产品开发的早期介入,通过正向设计优化散热方法,避免后期因过热问题导致的返工与性能妥协。

3) 从孤立性设计转变为系统性架构设计。热设计不再局限于单一的散热技术,而是需要从整体系统角度出发,综合考虑电讯、结构、工艺等多学科因素,实现系统性的热管理优化。

在这一背景下,热设计工程师必须具备全面、多元的学科知识,熟练掌握各种热设计手段,并将其灵活应用到实际设计中,才能在复杂的电子设备热设计中做出最合适的方案,确保设备的高效、可靠和安全运行。未来,需在材料科学、微电子技术等多领域持续深耕,推动热设计技术的不断创新,以应对电子设备发展的新需求和新挑战。

参考文献

- [1] 中国科学院. 中国学科发展战略: 电子设备热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [2] 钱吉裕. 电子设备热设计技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2025.
- [3] International Energy Agency. Electricity 2024: analysis and forecast to 2026[R]. Paris: IEA Publications, 2024.
- [4] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [5] 张国庆. 动力电池热管理技术及关键材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [6] JOSHI Y. DARPA thermal management initiatives in support of three-dimensional heterogeneous integration [R]. Tysons Corner, VA: DARPA Press, 2023.
- [7] HE Z Q, YAN Y F, ZHANG Z E. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: a review[J]. *Energy*, 2021, 216: 119223.
- [8] KIM J. HBM roadmap ver1.7 workshop by KAIST Teralab[R]. Daegu, South Korea: KAIST Press, 2025.
- [9] ZHANG Z H, WANG X H, YAN Y Y. A review of the state-of-the-art in electronic cooling[J]. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2021, 1: 100009.
- [10] 平丽浩, 钱吉裕, 徐德好. 电子装备热控新技术综述[J]. *电子机械工程*, 2008, 24(1): 1-10.
- [11] 崔凯, 王从香, 胡永芳. 射频微系统 2.5D/3D 封装技术发展与应用[J]. *电子机械工程*, 2016, 32(6): 1-6.
- [12] 秦颖, 张亚兵. 射频 SiP 在收发组件中的应用研究[J]. *现代雷达*, 2023, 45(6): 109-113.
- [13] 吴磊. 射频系统先进封装技术研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(9): 1053-1062.
- [14] TUA K N. Reliability challenges in 3D IC packaging technology[J]. *Microelectronics Reliability*, 2011, 51(3): 517-523.
- [15] CHEN X G, HU C D, LIANG J, et al. Efficient two-phase cooling and optimization technology on the chip side based on high-power data centers: summary and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 223: 115994.
- [16] PRICE D C, WILSON J S. Material issues in thermal management of RF power electronics[R]. London: Cambridge University Press, 2001.
- [17] 罗俊, 艾凌浩, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. *中山大学学报*, 2021, 60(1): 1-19.
- [18] 李金岳, 苏若斌, 杨金, 等. 木星系任务新型热控技术[J]. *中国空间科学技术*, 2025, 45(3): 185-191.
- [19] LUO D W, SHEN Z S. Oxidation behavior of Kovar alloy in controlled atmosphere[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 21(6): 409-418.
- [20] YAO J T, LI C J, LI Y, et al. Relationships between the properties and microstructure of Mo-Cu composites prepared by infiltrating copper into flame-sprayed porous Mo skeleton[J]. *Materials and Design*, 2015, 88: 774-780.
- [21] MA S D, ZHAO N Q, SHI C S, et al. Mo₂C coating on diamond: different effects on thermal conductivity of diamond/Al and diamond/Cu composites[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 402: 372-383.
- [22] LU K J, WANG C J, WANG C R, et al. Study of the hot-pressing sintering process of diamond/copper

- composites and their thermal conductivity[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170608.
- [23] LI H Z, JU Z H, LI Q, et al. Design and optimization of diamond-aluminum thermal spreading substrate for thermal management in high-power electronic devices[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 265: 125662.
- [24] 黄宇. 高导热石墨膜/铝复合材料的设计、制备与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [25] CUI Q J, YOU Z Y, MA X, et al. A thin and lightweight miniature loop heat pipe for cooling mobile electronic devices[J]. *Device*, 2025, 3(8): 100783.
- [26] 高博, 王成辉, 余申卫, 等. 石墨烯增强铝基复合材料制备方法及其效果研究进展[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(24): 5-14.
- [27] 王瑾玉, 张永海, 魏进家. 功率器件热界面材料研究进展[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(10): 2699-2710.
- [28] 刘文韬, 俞宏坤, 李震奇, 等. 基于 Dinger-Funk 模型的多元多尺度有机硅导热复合材料的设计与性能研究[J]. *有机硅材料*, 2025, 39(3): 21-27.
- [29] ZHANG X, QIAN J Y, WEI T, et al. Thermal conductivity experiment of interface material based on graphite sheet[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2024, 2825(1): 012040.
- [30] ZHOU G, LI L, LEE S Y, et al. Dual-strategy-encapsulated phase change materials with thermal immune functions for efficient energy storage and all-weather battery thermal management[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 243: 110256.
- [31] WANG N, CHEN S J, NKANSAH A, et al. Lightweight compressible and highly thermal conductive graphene-based thermal interface material[C]// 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference. Dresden, Germany: IEEE Press, 2018: 8546453.
- [32] GUO S H, WANG M H, WANG Y Y, et al. Graphene film for multifunctional graphene-based thermal interface material with bidirectional high thermal conductivity[J]. *Small Structure*, 2025, 6: 2400652.
- [33] DAI W, MA T F, YAN Q W, et al. Metal-level thermally conductive yet soft graphene thermal interface materials[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(10): 11561-11571.
- [34] KEMPERS R, KERSLAKE S. In-situ testing of metal micro-textured thermal interface materials in telecommunications applications[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 525: 012016.
- [35] PENG J, HUANG H J, WEI T, et al. Experimental study on a novel Indium-based alloy thermal interface material with low contact thermal resistance[C]// Proceedings of the 7th Asia International Symposium on Mechatronics. Singapore: Springer, 2020: 499-508.
- [36] CHENG R, WANG Q X, WANG Z X, et al. Liquid-infused nanostructured composite as a high-performance thermal interface material for effective cooling[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 794.
- [37] WANG X Y, WANG Y D, YANG B R, et al. Morphology-controllable liquid metal/diamond sandwich-structured thermal interface material toward high-efficiency thermal management[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(22): 20956-20969.
- [38] ZHAO Y, HU D, LI H, et al. Thermal fluctuation characteristics of unsteady solid-solid interface contact heat transfer in vibration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124891.
- [39] 吴进凯, 钱吉裕, 魏涛. 基于烟囱效应的电子设备自然散热设计[J]. *电子机械工程*, 2020, 36(6): 42-45.
- [40] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [41] 王文奇, 王飞龙, 何雅玲, 等. 一种新型树叶形翅片的数值与实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(11): 2470-2475.
- [42] SUN M C, ZHANG B Y, ZHANG M L, et al. Energy-efficient piezoelectric MEMS cooling chip for compact electronics based on a partially mechanical decoupled actuator[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, 72(7): 3805-3813.
- [43] GOULD K, CAI S Q, NEFT C, et al. Liquid jet impingement cooling of a silicon carbide power conversion module for vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(6): 2975-2984.
- [44] SABATO M, FREGNI A, STALIO E, et al. Numerical study of submerged impinging jets for power electronics cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 707-718.
- [45] ZHANG Y T, YANG X P, JI X Y, et al. Numerical and experimental study on manifold-distributed jet microchannel with micro-pin-fins[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124675.
- [46] REMCO V E, REZA S, LUCA N, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. *Nature*, 2020, 585(7824): 211-216.
- [47] CHEN C W, WANG X Y, YUAN B Q, et al. Investigation of flow and heat transfer performance of the

- manifold microchannel with different manifold arrangements[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 102073.
- [48] 吴龙文, 卢婷, 陈加进, 等. 芯片散热微通道仿生拓扑结构研究[J]. *电子学报*, 2018, 46(5): 1153-1159.
- [49] ZHOU J H, LU M X, HAN L, et al. Topological manifold microchannel cooling for thermal management of divertor in fusion reactor[J]. *Energy*, 2025, 315: 134145.
- [50] HUSAM A, TERESA N, ASHISH R, et al. Using life cycle assessment to drive innovation for sustainable cool clouds[J]. *Nature*, 2025, 641: 331-338.
- [51] 周杰, 王锐, 战栋栋, 等. 浸没式液体相变冷却系统应用进展[C]//2023年机械电子学学术会议论文集. 成都: 中国电子学会电子机械工程分会, 2023: 726-735.
- [52] SHI H Y, GRALL S, YANAGISAWA R, et al. Chip cooling with manifold-capillary structures enables 10^5 COP in two-phase systems[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2025, 6: 102520.
- [53] MORENO G. Automotive power electronics cooling technology research at NREL[R]. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2022.
- [54] CHOI C H, DAVID M, GAO Z W, et al. Large-scale generation of patterned bubble arrays on printed bi-functional boiling surfaces[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23760.
- [55] HSU W T, LEE D, LEE N, et al. Enhancement of flow boiling heat transfer using heterogeneous wettability patterned surfaces with varying inter-spacing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120596.
- [56] YU C H, XU Z, HE S F, et al. Manipulating boiling bubble dynamics on under-liquid superaerophobic silicon surfaces for high-performance phase-change cooling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(19): 2420677.
- [57] LI P K, CAI L L, LIU X L, et al. A structural figure of merit for liquid film boiling heat transfer performance on micro/nano-structured surfaces[J]. *Nano Energy*, 2025, 140: 111080.
- [58] LIU J S, WU H Y, HUA X, et al. Enhanced flow boiling heat transfer in embedded hybrid distributed jet/pin-fin microchannel heat sink[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2025, 168: 111508.
- [59] HU C M, WANG R, QIAN J Y, et al. Numerical investigation on two-phase flow heat transfer performance and instability with discrete heat sources in parallel channels[J]. *Energies*, 2021, 14(15): 37-45.
- [60] 王锐, 周杰, 钱吉裕, 等. 电子装备两相流冷却设计方法[C]//2024年机械电子学学术会议论文集. 桂林: 中国电子学会电子机械工程分会, 2024: 775-781.
- [61] ZHANG Y S, ZHAN D D, XU J Y. Research on the heat dissipation characteristics of high thermal conductivity materials in near space[C]//Proceedings of 7th Asia International Symposium on Mechatronics. Xi'an: Science Press, 2019: 535-543.
- [62] ZHAI Y, MA Y G, DAVID S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1062-1066.
- [63] ZHU G H, YAN Z, YAO W J, et al. Scalable manufacture of ultratough physical cross-linked hybrid films for durable radiative cooling[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 518: 164568.
- [64] ZHAO X P, LI T Y, XIE H, et al. A solution-processed radiative cooling glass[J]. *Science*, 2023, 382(6671): 684-691.
- [65] LIU F Q, HE C B, JIANG Y G, et al. Carbon layer encapsulation strategy for designing multifunctional core-shell nanorod aerogels as high-temperature thermal superinsulators[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140502.
- [66] 褚雯霄, 吕义高, 王耀霆, 等. 星载有源相控阵天线热控技术研究进展[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(12): 106-120.
- [67] OSIANDER R, CHAMPION J L, DARRIN M A, et al. Micro-machined shutter arrays for thermal control radiators on ST5[C]//40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002: 1-5.
- [68] LI C C, CAO C C, LUO H J, et al. Temperature-adaptive radiative modulator for multi-domain safety applications[J]. *Device*, 2024, 2(8): 100407.
- [69] REN Y R, CHEN Q, HE M J, et al. Plasmonic optical tweezers for particle manipulation: principles, methods, and applications[J]. *ACS Nano*, 2021, 15: 6105-6128.
- [70] 林伯, 句子涵, 胡定华, 等. 基于泡沫铜骨架高导热复合相变储热材料的热性能研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(S1): 29-33.
- [71] 古家安. 相变储能换热器中分形肋片强化传热数值分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [72] LIU H R, YANG C, WANG R Z. Passive thermal management of electronic devices[J]. *Device*, 2025, 3: 100684.
- [73] 娄旭烽, 王健, 夏银水. 基于 GaN HEMTs 的射频功放芯

- 片电热耦合仿真方法研究[J]. 微波学报, 2025, 41(1): 39-45.
- [74] 闫霆, 王文欢, 王程遥. 化学储热技术的研究现状及进展[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4586-4595.
- [75] 贾鑫, 魏俊俊, 黄亚博, 等. 金刚石散热衬底在 GaN 基功率器件中的应用进展[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 111-123.
- [76] CHAO P C, CHU K, DIAZ J, et al. GaN-on-diamond HEMTs with 11 W/mm output power at 10 GHz[J]. *MRS advances*, 2016, 1(2): 147-155.
- [77] CHU K K, CHAO P C, DIAZ J, et al. High-performance GaN-on-diamond HEMTs fabricated by low-temperature device transfer process[C]//2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). New Orleans, USA: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [78] TADJER M J, ANDERSON T J, ANCONA M G, et al. GaN-on-diamond HEMT technology with $T_{AVG}=176\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $P_{DC, max}=56\text{ W/mm}$ measured by transient thermoreflectance imaging[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(6): 881-884.
- [79] 张瑞浩, 万发雨, 徐儒, 等. 渐变组分背势垒 GaN HEMT 器件特性研究[J]. 微波学报, 2025, 41(1): 26-31.
- [80] MALAKOUTIAN M, FIELD D E, HINES N J, et al. Record-low thermal boundary resistance between diamond and GaN-on-SiC for enabling radiofrequency device cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 60553-60560.
- [81] ZHOU Y, ANAYA J, POMEROY J, et al. Barrier-layer optimization for enhanced GaN-on-diamond device cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9: 34416-34422.
- [82] 胡长明, 魏涛, 钱吉裕, 等. 射频微系统冷却技术综述[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 1-11.
- [83] OH H J, ZHANG X C, MAY G S, et al. High-frequency analysis of embedded microfluidic cooling within 3-D ICs using a TSV testbed[C]//2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Las Vegas, NV, USA: IEEE Press, 2016: 68-73.
- [84] ZHENG L, ZHANG Y, HUANG G, et al. Novel electrical and fluidic microbumps for silicon interposer and 3-D ICs[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(5): 777-785.
- [85] SARVEY T E, ZHANG Y, CHEUNG C, et al. Monolithic integration of a micropin-fin heat sink in a 28-nm FPGA[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(10): 1617-1624.
- [86] LIEN Y J, JIANG S D, HSIEH C C, et al. Direct-to-silicon liquid cooling integrated on Cowos[®] platform[C]//2025 IEEE 75th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Dallas, TX, USA: IEEE Press, 2025: 743-747.
- [87] WU N, SUN M M, GUO H, et al. Subcooled flow boiling in diamond/Cu microchannel heat sinks for near-junction chip cooling[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 69: 105981.
- [88] WEI H, ZHAO Y, HU D H, et al. Integrated embedded cooling method for thermal management in multilayer ceramic circuit substrate microsystems for multi-chip components[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 165: 109005.
- [89] WEI T, HUANG H J, MA Y P, et al. Design and fabrication of multi-layer silicone microchannel cooler for high-power chip array[C]//2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Xiamen: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [90] 余怀强, 杜建宇, 刘雨隄, 等. 压电微泵一体化自闭环微系统热管理技术研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(5): 676-679.
- [91] TONG W Y, FAN D S, YANG Y, et al. Piezoelectric micropump cooler for high-power electronic cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 233: 126062.
- [92] XING G Y, XUE S, HONG T, et al. A novel hydrodynamic suspension micropump using centrifugal pressurization and the wedge effect[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(7): 2047-2058.
- [93] WANG R, QIAN J Y, WEI T, et al. Integrated closed cooling system for high-power chips[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 100954.
- [94] 王锐, 钱吉裕, 魏涛, 等. 高功率射频微系统的微泵研究进展[J]. 电子机械工程, 2021, 37(3): 28-31, 64.
- [95] 黄洁瑜, 谢军伟, 杨子晴, 等. 雷达资源管理技术发展研究综述[J]. 现代雷达, 2025, 47(3): 1-13.
- [96] 石永安, 王猛, 刘卫刚, 等. 某雷达大功率固态发射机的结构与散热设计[J]. 现代雷达, 2024, 46(3): 77-81.

钱吉裕 男, 1978 年生, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事雷达热设计工作。

王锐 男, 1989 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事雷达热设计工作。