

液态金属高性能冷却技术:发展历程与研究前沿

杨小虎^{1,2}, 刘静^{1,2,3}

1. 中国科学院理化技术研究所, 中国科学院低温工程学重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049

3. 清华大学生物医学工程系, 北京 100084

摘要 “热障”问题已经成为阻碍高端电子芯片和光电器件向更高性能发展的重要挑战, 发展高性能芯片冷却和热管理技术迫在眉睫。作为一大类新兴的热管理材料, 液态金属在对流冷却、热界面材料、相变热控等领域均带来了观念和技术上的巨大革新, 打破了传统冷却技术的性能极限, 给大量面临“热障”难题的器件和装备的冷却提供了全新解决方案, 有望在国防、航空航天、能源系统及民用电子设备等领域的冷却与热管理系统中发挥重要作用。本文回顾了液态金属先进冷却技术的发展历程, 主要包括液态金属对流冷却技术、液态金属热界面材料、液态金属(低熔点金属)相变储能与热控技术、基于液态金属的复合冷却技术等; 梳理了液态金属冷却技术中的关键科学与技术问题和面临的挑战。

关键词 液态金属; 芯片冷却; 高热流密度; 双流体; 热界面材料; 相变材料; 组合传热学

随着电子工业和半导体行业的迅猛发展, 各类电子芯片不断向小型化发展, 集成度越来越高。同时, 芯片功能的增加和性能的增强要求进一步提升其计算频率, 相应的芯片功耗也越来越大。20世纪60年代, 英特尔公司创始人之一戈登·摩尔就提出预言: “半导体芯片上集成的晶体管数量每隔18个月将增加1倍”, 也就是著名的“摩尔定律”(图1)。“摩尔定律”已经成功主导了电子工业近50年的发展。然而, 芯片高度集成化发展不可避免地带来一个问题是, 芯片的发热问题日益严峻。在芯片工作过程中, 部分电能会转化为热量, 这些热量如果不能被及时散出, 芯片温度将持续升高。高温会导致芯片性能衰退, 故障率提高, 寿

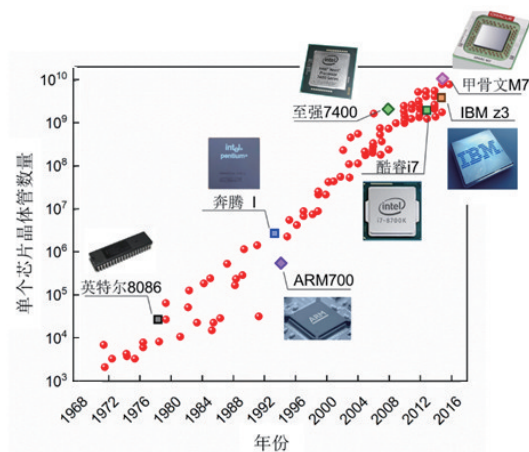


图1 “摩尔定律”下单个芯片晶体管数量的发展
Fig. 1 "Moore's law"—The number of transistors on integrated circuit chips

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-06-26

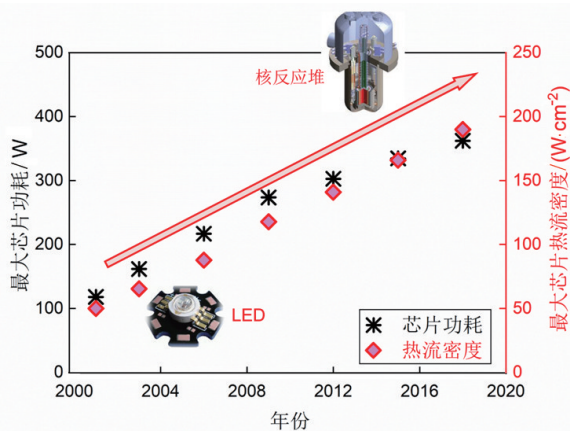
基金项目: 中国科学院院长基金项目; 中国科学院前沿科学重点研究计划项目; 国家自然科学基金重点项目(91748206)

作者简介: 杨小虎, 博士研究生, 研究方向为液态金属高性能冷却技术, 电子信箱: yangxh@mail.ipc.ac.cn; 刘静(通信作者), 教授, 研究方向为液态金属物质科学与技术, 电子信箱: jliu@mail.ipc.ac.cn

引用格式: 杨小虎, 刘静. 液态金属高性能冷却技术: 发展历程与研究前沿[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 54-66; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.15.007

命衰减,甚至引发安全事故。一般而言,要维持芯片安全高效工作,其温度应该控制在 85°C 以下。

根据2004年国际电子制造计划技术路线图^[1]预测,到2020年,高性能微处理器芯片的工作功率将达到360 W,相应的发热密度将高达 190 W/cm^2 ,相当于核反应堆冷却侧的热流密度(图2)。事实上,现在微电子工业面临的芯片发热问题比路线图预测的还要严峻,部分高性能芯片的热流密度早已高达 300 W/cm^2 甚至更高。2012年和2016年,《Nature》2篇专题报道^[2-3]相继指出,“热障”问题已经成为阻碍计算机芯片向更高性能发展的主要挑战之一,发展高性能芯片冷却技术迫在眉睫。



注:数据来自2004年国际电子制造计划技术路线^[1]

图2 高性能微处理器芯片功率和热流密度发展预测

Fig. 2 Projections of maximum power and heat flux for high-performance micro-process chips

空间技术的快速发展,更是对航天电子设备和元器件提出了大量的高热流密度散热需求,如CCD相机、激光高度计、光谱仪等。同时,由于其使用环境的特殊性,需要在温度剧烈波动的环境下保持恒定的工作温度,且对散热器有体积和重量上的限制,这些都进一步加大了其散热难度。此外,还有很多电力电子器件或设备同样面临高功率高热流发热问题,如高功率LED、聚光太阳能电池、高功率激光芯片、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)电转换器、X射线球管、发动机等(图3)。毫不夸张地说,高性能冷却技术的发展是保障这些器件安全高效工作和向更高性能发展的重要前提。

散热需求的不断提高推动着冷却技术的快速发展。风冷(包括空气自然对流冷却和强制对流风冷)是目前很多低功耗电子器件采用的散热方式,具有简单、

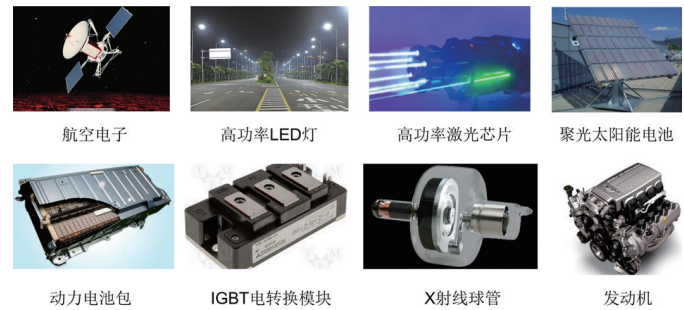


图3 高功率发热器件和设备

Fig. 3 Devices and equipment with high heat dissipation requirement

可靠、成本低的优势,但其散热能力十分有限,一般只能用于热流密度 $<10\text{ W/cm}^2$ 的情形。热管是一种高效的热传输元件,1963年由美国洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室的George Grover发明,它具有极高的等效热导率(一般在 $10^4\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 量级),比常用的铝、铜等高导热金属的热导率还要高出2个数量级。基于热管的散热技术是目前笔记本电脑主流的散热技术,通常,其散热热流密度在 $10^1\sim 10^2\text{ W/cm}^2$ 范围。当面对更高的热流密度,比如 $10^2\sim 10^3\text{ W/cm}^2$ 时,往往需要采取液冷措施,包括单相对液流冷和两相沸腾冷却。自1981年由Tuckerman和Pease^[4]提出以来,以水为主要冷却物质的微小流道液冷越来越成为研究者们关注的热点^[5-6],特别是添加了纳米颗粒以强化其传热的纳米流体微小流道对流冷却技术^[7]。

尽管水冷技术在应对高热流冷却方面具有很大的优势,但是仍然面临一些问题:1) 水的热导率较低,仅为 $0.6\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (20°C),这导致其对流换热能力较差;为此人们发展出微流道技术,但这又会带来的一个问题是冷板流动阻力巨大,相应的泵功耗高,存在泄露风险,且容易发生流道堵塞。2) 水的工作温区有限,在温度高于 100°C 时将会发生沸腾,对于跨越 100°C 的热传输需求不太适合。

从理论上讲,要提升冷板的对流冷却能力,一般可以从两个方面考虑:1) 设计合理的冷板结构,使其获得较好的热性能的同时流动阻力又在可以接受的范围;2) 采用具有良好热物性的冷却工质。对于前者,研究者们已经做出了大量的研究工作^[6, 8-9]。而对于后者,人们一直苦于难以找到合适的冷却工质。

室温液态金属冷却技术正是在此大背景下孕育而出。液态金属最突出的特点在于其固有的高导热特

性。例如,常见液态金属热导率一般为 $10\sim 40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比传统的冷却工质水高出2个数量级。这一特性赋予了液态金属优异的对流换热能力,也使得其具有比水更好的对流冷却性能。采用液态金属取代传统的以水为代表的冷却工质打破了传统冷却技术的能力极限,同时也为其他能源领域的热量捕获与传输提供了新的思路。不仅如此,近年来,基于液态金属的高性能热界面材料、智能相变热控与储能材料及新型的液态金属双流体冷却系统等高端热管理技术也相继问世,不断刷新着人们对于液态金属这一全新的高性能热管理材料的认识,并引起了学术界和产业界的高度关注。一个越来越被接受的观点认为,液态金属冷却技术开启了下一代高性能冷却技术的新纪元。

本文从以下5个方面对液态金属先进冷却技术进行全面的梳理和介绍:1) 液态金属芯片冷却技术的提出与发展历程,包括从材料、器件到系统级的一系列创新性方法的提出;2) 液态金属高性能热界面材料,从实验室走向产业化;3) 液态金属(低熔点金属)相变热控与储能技术;4) 基于液态金属的组合传热学和复合冷却技术;5) 液态金属冷却技术中的关键科学技术问题和面临的挑战。

1 液态金属芯片冷却技术的提出与发展

说起液态金属,人们首先会想到的是汞,也就是俗称的水银。传统的水银温度计就是用汞制成。汞的熔点在零下 39°C ,常温下为液态,具有很好的流动性。然而,汞具有毒性,且容易挥发,一旦发生泄漏将会对人身安全造成威胁。正因如此,人们一直没有考虑将其应用到消费电子的冷却领域。

另一个用到液态金属的领域是核反应堆(包括核电站、核潜艇等),液态金属用于冷却堆芯并将热量携带出去用于发电或提供动力。液态碱金属(如Na,熔点 98°C),因其具有熔点低、沸点高、比热容大和导热性好等优点,是目前快中子堆冷却剂的主要材料。然而,由于碱金属具有很强的化学活性、腐蚀性和危险性,在民用领域从未涉及,这使得液态金属冷却在过去的几十年里一直没有进入大众的视野。

2002年,中国科学院理化技术研究所刘静^[10]提出了将液态金属作为冷却液用于高性能计算机芯片冷却,

以解决其日益严峻的“热障”问题。这里所说的液态金属不同于传统的汞及碱金属材料,主要是指镓及其合金(如镓铜合金、镓铜锡合金等)以及铋基合金(如铋铜锡合金),是一类安全无毒的低熔点金属材料,熔点在室温附近。将以镓为代表的室温液态金属引入电子器件冷却是一种观念上的根本性突破,改变了人们对于传统液态金属材料的认识,并由此开启了液态金属在消费电子冷却领域的大门。

室温液态金属冷却技术一经提出,便迅速引起了国内外学者和产业界的广泛关注。2004年,美国Nanocoolers公司获数千万美元资助开展液态金属芯片散热技术研究^[11],并于2005年发布了商用的液态金属CPU散热器^[12]。2009年,美国Aqwest LLC公司开展激光泵浦二极管的液态金属散热技术研究^[13]。2010年,美国机械工程师学会(ASME)会刊《Journal of Electronic Packaging》(《电子封装学报》),将年度唯一最佳论文奖授予液态金属冷却技术论文“Design of practical liquid metal cooling device for heat dissipation of high performance CPUs”^[14];论文通信作者为刘静,第一作者为其指导的博士研究生邓月光。2013年,美国阿贡国家实验室研制出加速器中子散射源液态金属散热原型机,将液态金属镓引入冷却系统,取代传统的钠钾合金。2014年,美国国家航空航天局(NASA)将液态金属冷却技术列为未来前沿研究方向。可以看到,这项诞生并发展于中国的技术已经吸引了美国这一科技强国的极大关注,而双方就此展开的竞赛也在近年来越演愈烈。

1.1 液态金属材料基本物性

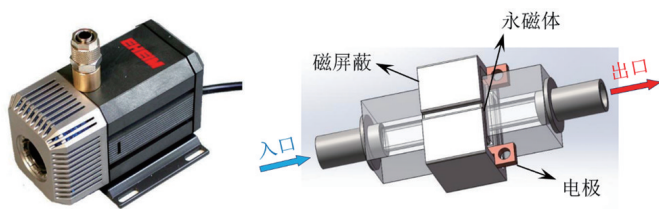
简单来讲,液态金属冷却技术实际上是用液态金属替代传统的冷却液(比如水)来实现对热源的对流冷却。为了直观地了解两者的差别,表1对比了典型的液态金属 $\text{Ga}_{68}\text{In}_{20}\text{Sn}_{12}$ 与水的主要物性。可以看到,液态金属 $\text{Ga}_{68}\text{In}_{20}\text{Sn}_{12}$ 拥有很宽的单相工作温区,从 $10.7\sim 2200^\circ\text{C}$ 始终保持液态。热容方面,水是常温下常见物质中质量比热容最大的物质;尽管液态金属的比热远小于水,但是由于其密度高(大约是水的6倍),其体积热容也能达到水的 $1/2$ 左右。流动性方面,液态金属的黏度跟水在同一个量级,仅为水的2倍左右,因此也具有很好的流动性。液态金属最大的特点在于其拥有很高的热导率,是水的65倍,这使得其具有很好的传热换热能力。此外,液态金属还有一个特点是其良好的导电性,其电

表1 液态金属与水主要物性对比

Table 1 Comparison of the main properties of liquid metal and water

工质	熔点/ ℃	沸点/ ℃	密度/ (kg·m ⁻³)	质量比热/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	体积比热/ (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	黏性系数/ (Pa·s)	电导率/ (S·m ⁻¹)
水(20℃, 101325 Pa)	0	100	998	4182	4.174	0.6	1.003×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³
液态金属 Ga ₆₈ In ₂₀ Sn ₁₂	10.7	2200	6363	366	2.329	39	2.22×10 ⁻³	6.8×10 ⁶

导率仅比常用的高导电材料铜低1个数量级,由此可以用安静高效的电磁泵进行驱动(图4),摆脱了传统的机械泵的使用,无需运动部件,具有更高的工作效率和稳定性。



(a) 水冷系统使用的机械泵 (b) 液态金属冷却系统使用的电磁泵

图4 水冷系统使用的机械泵及液态金属冷却系统使用的电磁泵

Fig. 4 Mechanical pump for water cooling system and electromagnetic pump for liquid metal cooling system

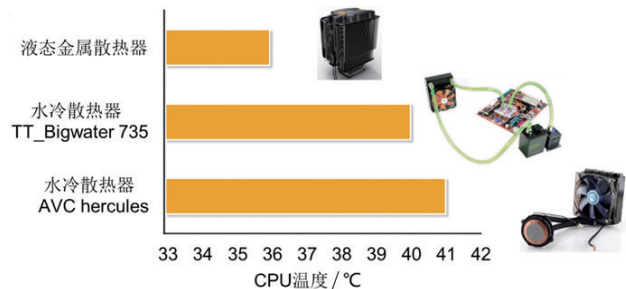
1.2 液态金属冷却技术的发展

自2002年提出液态金属芯片冷却技术以来,刘静团队一直致力于推动该技术的发展,并做出了大量的原始创新工作。经过10多年的努力,该团队建立了完善的液态金属材料制备与物性表征技术以及冷却系统相关理论分析、实验测试、数值仿真和优化设计方法,在国内外权威学术期刊及会议上发表学术论文近100篇,相关技术申请国家专利100余项。除了学术研究之外,刘静团队也不断推进相关产业化的进程。图5展示了团队开发的系列商品化的液态金属CPU散热器和LED远光灯散热器。第三方对比测试表明,液态金属散热器具有优于市面上同类水冷和热管散热器的散热性能。

除了基本的液态金属对流冷却技术外,该团队还从材料到系统提出了一系列新颖的概念和技术。2007年,马坤全等^[15]提出了一种废热捕获驱动的液态金属散热器。如图6所示,该散热器配备了一个热电发电装置,利用热源与环境之间的温差产生电能,得到的电能用来供给电磁泵以驱动液态金属环路的流动,从而实现了零功耗自驱动散热。并且,该散热系统可以根据

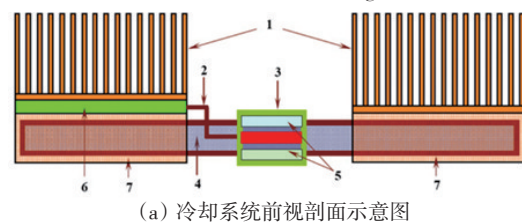


(a) 刘静实验室研制的商用液态金属散热器

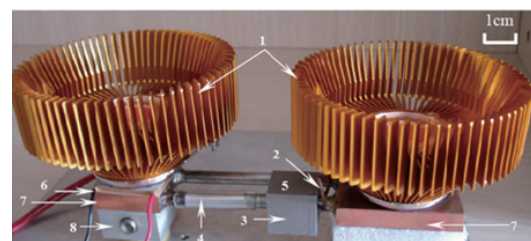


(b) 液态金属散热器与水冷散热器性能对比

图5 液态金属散热器及其与水冷散热器性能对比
Fig. 5 Commercial liquid metal cooling radiators developed by Liu Jing's lab and comparison of their cooling performance with commercial water cooling radiators.



(a) 冷却系统前视剖面示意图



(b) 冷却系统实物图

1—铜散热器;2—电极;3—电磁泵;4—液态金属;5—永磁体;
6—热电发电片;7—冷板;8—热源

图6 废热捕获驱动的液态金属冷却系统^[15]

Fig. 6 Liquid metal cooling loop driven by waste heat^[15]

热量大小做出响应,自动调节其冷却能力。该工作以封面文章形式发表于《Journal of Physics D: Applied Physics》。

此外,马坤全等^[16]还首次提出了液态金属纳米流体的概念。众所周知,更好的热物性和更强的冷却能力是热管理领域永无止境的追求,特别是高热导率的冷却工质更是炙手可热。将高热导率纳米颗粒掺混进液态金属可以进一步提升其热导率和换热能力。可以说,液态金属纳米流体是目前自然界能找到的拥有最高热导率的“终极冷却剂”。这一概念的建立不仅可用于指导基于液态金属的高导热对流冷却工质的研发,也为后来高性能液态金属热界面材料和相变材料的研制提供了思路。

当然,想要将纳米颗粒掺混进液态金属并不是一件容易的事。液态金属密度大,表面张力大,且基本与非金属材料不亲和,很难实现掺混。经过多年的探索,汤剑波等^[17]发现,液态金属可在溶液环境中借助电场或化学物质的激励作用将微/纳尺度金属颗粒吞入体内,如同细胞生物学的胞吞效应,且吞噬效率极高。这一发现开辟了一条构筑高性能纳米金属流体材料的快捷途径。这项工作以封面文章的形式发表于《Advanced Science》(图7)^[17]。



图7 液态金属胞吞效应制备纳米金属流体
Fig. 7 "Endocytosis effect" for preparation of nano liquid metal

在液冷系统中,经常会遇到的一个问题是,环境温度可能低于冷却工质的熔点。这时,在静置状态下,冷却工质可能会凝固,从而导致循环冷却系统无法启动。对于水冷系统,可以通过添加抗凝剂(比如醇类或

无机盐类)降低冷却液的凝固点。然而,对于液态金属,目前并没有相应的抗凝剂。2009年,马坤全等^[18]提出了一种物理加热预热方法,通过在液态金属流通环路中配置电加热丝实现其低温抗凝固。

液态金属在实际使用中还面临的一个问题是其成本较高。相比而言,水可以廉价获取,而液态金属的价格目前约为1元/g,这在一定程度上限制了其大规模使用。为了解决这一问题,邓月光等^[19]于2010年提出了一种液态金属/水复合冷却系统,如图8(a)所示。该冷却系统利用液态金属作为一级热沉,将高热流热量从热源处带走,并释放到二级水冷系统,水冷系统再将热量散发到环境当中。这种复合散热系统既可以满足热源高热流散热需求,同时又可以节省液态金属的用量,特别是在终端风冷散热器距离远、体积大的情况下具有明显优势。

上述液态金属和水的复合冷却方式可以理解为是一种串行方式。实际上,两者也可以采用并行方式有机结合。梅生福等^[20]提出一种液态金属/水并行微通道热沉(图8(b)),这种热沉相比于纯液态金属工质热沉而言,有两个突出的优点:1) 液态金属用量大大减少,系统初期材料成本降低;2) 液态金属比热容较小,而水

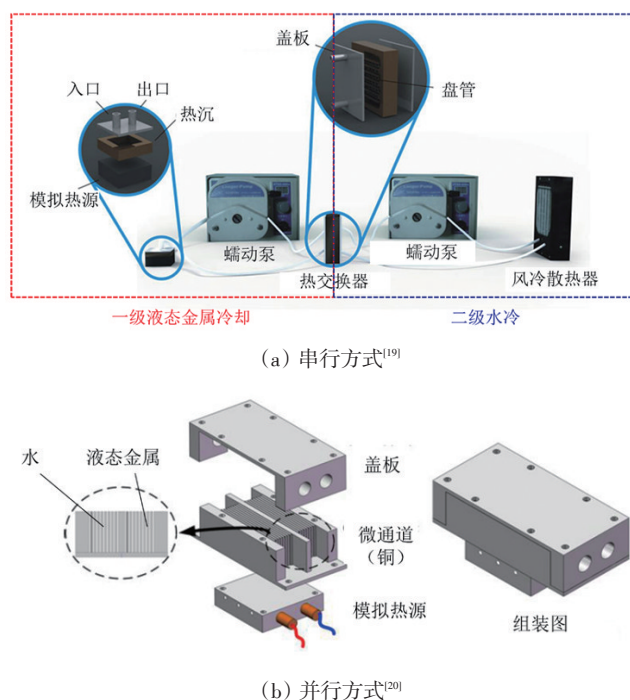


图8 液态金属/水复合冷却系统
Fig. 8 Liquid metal/water hybrid cooling system

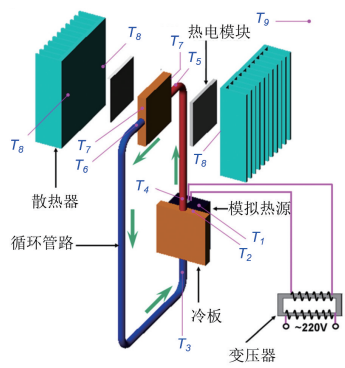
的比热容大,两者复合后,等效比热相比于液态金属而言有所增加,可以部分地改善其冷却性能。

2011年,李海燕等^[21]明确提议采用液态金属全面取代工业水换热器的思想,促成了无水换热器概念的建立。在热能工业中,存在大量的以水或油作为载热介质进行热量捕获和传输的情形,如余热或废热回收利用、食品或化工热加工过程、太阳能热利用等。用液态金属作为载热介质,可以有效强化换热能力,减小由于传热温差带来的焓损失,提高能源利用效率,且使设备更加紧凑。

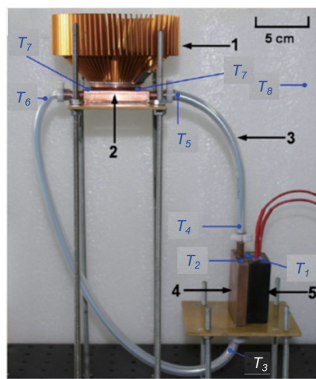
此外,利用液态金属热膨胀的特性,李培培等提出了一种基于液态金属虹吸效应的热能捕获装置^[22]与被动冷却技术^[23],如图9所示。尽管大多数液体在一定的温度梯度下都会产生虹吸流动,但由于这种流动一般比较微弱且其他液体的换热能力较差,难以形成有效的吸热传热环路。而液态金属优异的换热能力使得这

一技术更加具有现实意义。利用热源的热量,可以在重力作用下驱动液态金属流动,液态金属携带热量至远端,这些热量可以用来转化为有用能(如热电效应产生电能)或者直接释放到环境中以起到对热源进行散热的作用。

2012年,邓月光等^[24]提出了一种紧凑型的液态金属热展开器;2013年,罗曼丽等^[25]推出了刀片散热器技术的概念并予以证实,如图10所示。这是一大类十分紧凑的液态金属热展开器,液态金属的用量很少,因此材料成本大大降低。该装置可以将局部热点的热量扩展到更大的面积区域从而有效降低热流密度,缓解二级热沉的冷却压力。根据散热负荷的不同,该刀片散热器可以配备不同的二级热沉,如风冷、热管冷却、液冷、相变冷却等。



(a) 液态金属能量捕获^[22]



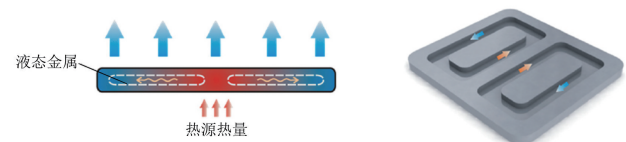
(b) 被动冷却技术^[23]

T_1 :热源温度; T_2 :冷板温度; T_3 :冷板入口温度; T_4 :冷板出口温度;
 T_5 :热电模块入口温度; T_6 :热电模块出口温度; T_7 :热电模块热端温度;
 T_8 :热电模块冷端温度; T_9 :环境温度

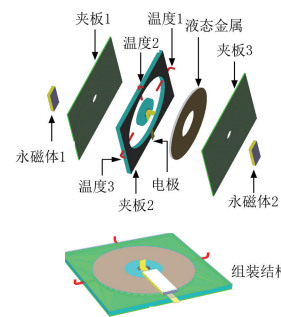
1—翅片散热器;2—铜基板;3—液态金属;4—冷板;5—模拟热源

图9 基于热虹吸效应的液态金属能量捕获^[22]与被动冷却技术^[23]

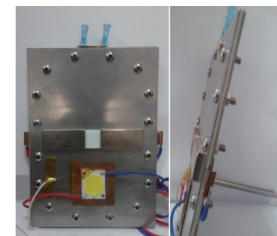
Fig. 9 Thermosiphon effect enabled liquid metal thermal energy harvester^[22] and cooling loop^[23]



(a) 原理示意图^[24]



(b) 结构爆炸视图^[25]



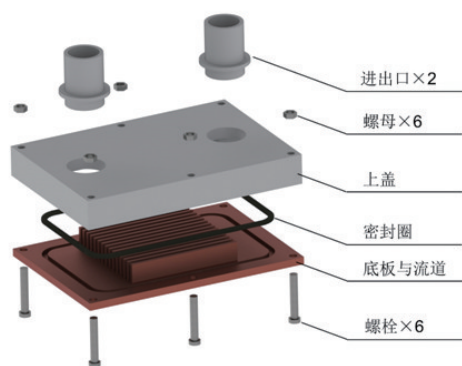
(c) 实物图^[25]

图10 液态金属刀片散热器

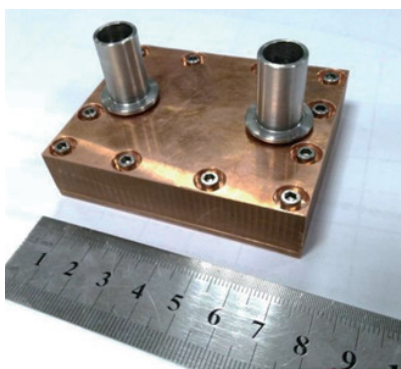
Fig. 10 Liquid metal blade radiator

液态金属热展开器的作用实际上跟平板热管十分相似,两者最大的差别在于:1) 工作原理不同,前者利用液态金属单相对流实现热量展开,后者则是利用工质(例如水)的沸腾/凝结循环实现热量转移;2) 适用范围不同,前者在液态金属熔点到沸点之间 $>2000^{\circ}\text{C}$ 的范围内均可以工作,而后者则由于工作介质沸点的限制和热管传热极限的束缚只能在设计的温区和热流范围内正常工作,过高温度或热流将会导致平板热管性能退化、干烧甚至爆管。

近几年来,液态金属微小流道热沉备受关注,这主要源于其在极端高热流密度冷却领域的重要价值。针对这一技术,国内外的研究者进行了大量的理论建模、数值仿真与优化及实验测试^[26-29]。研究表明,在同等几何结构和流动状况下,且流量不是太低时,液态金属总是可以获得比水更好的冷却效果。而且,面对同样的高热流冷却需求,例如 $200\sim 400\text{ W/cm}^2$,水冷必须采用微流道结构(水力直径 $100\ \mu\text{m}$),这将导致其流动阻力极大(大约在 10^5 Pa 量级);而液态金属则不必如此,只需采用小流道结构(水力直径约 1 mm)即可实现同样的冷却效果,而且相应的流动阻力大大减小(约在 10^3 Pa 量级)^[29]。图 11 是刘静等针对散热量 2000 W (热流密度 400 W/cm^2)的散热需求设计的液态金属小流道热沉,其流道水力直径为 1.7 mm 。该热沉在液态金属流量为 4.6 L/min 时,压力降仅为 4 kPa ,同时热沉热阻仅为 0.02°C/W 。



(a) 热沉结构爆炸视图



(b) 热沉实物图

图 11 液态金属小流道热沉

Fig. 11 Liquid metal mini-channel heat sink

最近 2 年,刘静团队在基于液态金属的双流体冷却与能量捕获领域取得了新的进展。2016 年,汤剑波等^[30]

提出了一种气动驱动的液态金属能量捕获装置(图 12)。低沸点工质异戊烷(沸点 27.8°C)与液态金属一起封装于循环管路中,在热量作用下,异戊烷沸腾汽化,巨大的体积变化产生强大的气动推力推动液态金属柱塞的运动,而液态金属则作为载热介质将热量传递出来。该装置可以在较小的温差下启动,并且传输能力可以随着热量大小自动调节,具有零功耗、紧凑、工作稳定的特点。

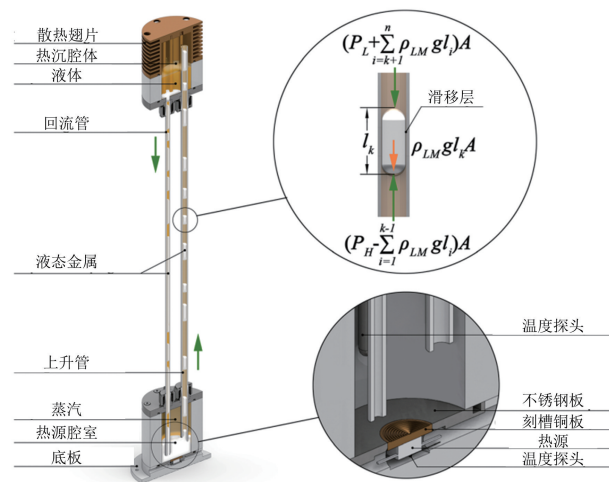


图 12 气动驱动的液态金属双流体能量捕获装置^[30]

Fig. 12 Volatile fluid assisted thermo-pneumatic liquid metal energy harvester^[30]

谭思聪等^[31]提出了一种液态金属/水双流体散热器(图 13)。该装置利用液态金属在外电场作用下的连续

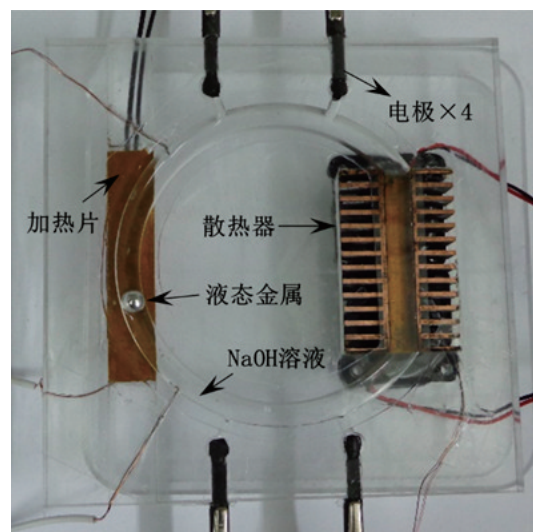


图 13 电润湿驱动的液态金属/水双流体散热器^[31]

Fig. 13 Electrowetting effect enabled chip cooling device using hybrid coolants of liquid metal and aqueous solution^[31]

电润湿效应作为驱动原理,用很小的电压和功耗即可驱动液态金属液滴的运动。同时,运动的液态金属又会带动周围液体一起流动,从而实现对流散热。双流体的使用综合了液态金属换热能力强、水的比热容大的优势,且可以减小液态金属用量,具有结构简单、功耗小、易于集成的优势。

总之,液态金属对流冷却技术自提出以来,经历了10多年的发展,已经形成相对完善的理论和技术体系。各种新的方法不断涌现,进一步丰富了其科学和技术内涵。同时,在实用化进程方面,也已经有成熟的产品问世。图14总结了液态金属冷却与热能传递的应用领域,主要包括大功率高热流芯片(如高性能计算机、大功率LED、微型投影仪、通信基站等)、空间热控、激光芯片及新型清洁能源技术(如聚光太阳能发电、工业废热回收、工业废热回收利用、低品位热能回收等)。

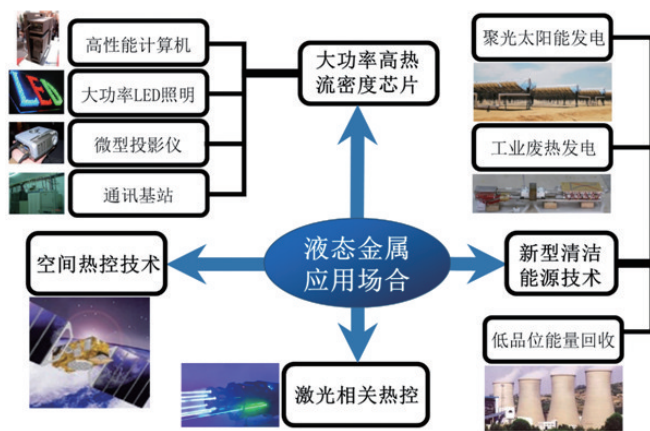
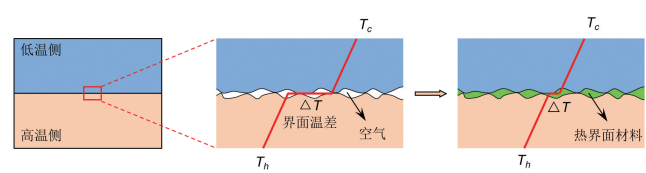


图14 液态金属冷却与热传输技术应用领域

Fig. 14 Application fields of liquid metal cooling and thermal transport technologies

2 液态金属热界面材料

除了应用于对流冷却之外,液态金属还可用作热界面材料^[32]。在冷却系统中,一个很重要的但是容易被忽略的环节是热量从芯片传导到冷板的过程。实际上,在任何一对硬接触的固固界面,在微观尺度上并不是完美的接触,两接触面之间会由于固体表面的粗糙度而出现大量的空气间隙。由于空气导热能力很差(热导率 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),两界面之间会存在较大的温差。使用膏状的热界面材料填补接触界面的间隙可以有效改善这一状况(图15)。



T_h : 高温侧温度; T_c : 低温侧温度; ΔT : 界面温差

图15 界面热阻与界面温差

Fig. 15 Interface thermal resistance and interface temperature jump

不难理解,热界面材料的热导率越高,其自身的导热热阻就越小,相应的界面热阻也就越小。因此,高的热导率一直是热界面材料研发人员追求的目标。传统的热界面材料主要是导热硅脂类,其固有热导率较低,一般在 $0.1\sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 水平。通过高导热纳米颗粒掺杂,可以有效提升其等效热导率,目前报道的有达到 $4\sim 8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 水平。室温液态金属热界面材料的提出则直接将热界面材料的热导率提升了1个量级,达到 $10\sim 40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 水平。此外,适当掺杂高导热纳米颗粒可以进一步获得更高性能的金属热界面材料。

事实上,液态金属表面张力大,流动性好,且与很多结构材料并不浸润,也难以黏附,这极大地阻碍了其作为热界面材料的使用。经过长期摸索,研究人员发现,适当的氧化可以极大地改善液态金属的黏附性能^[32]。这一原理的发现,不仅为液态金属热界面材料的研制提供了方法,也为金属墨水电子电路打印中的基底黏附问题提供了指导思路。

目前,刘静实验室研发的液态金属系列热界面材料产品已经实现产业化批量生产(图16(a)),并远销欧洲国家。此外,基于液态金属热界面材料的大功率LED路灯已投入实际使用(图16(b)(c))。针对部分应用场合要求热界面材料电绝缘的需求,实验室成功研制出了相应的液态金属/硅脂复合热界面材料,攻克了“高导热不导电”这一看似矛盾的技术难题。

3 液态金属(低熔点金属)相变热控与储能技术

除了用作冷却液和热界面材料之外,液态金属(或者说低熔点金属)还有另外一个重要的身份——相变材料。所谓相变材料,是指一类在一定的温度或温度范围内发生固液相变的材料。实际上,几乎所有材料都可以称之为相变材料。相变材料在其固液相转变过



(a)为液态金属热界面材料系列产品;

(b)(c)为液态金属热界面材料导热冷却的LED路灯

图 16 液态金属系列热界面材料产品及其在LED路灯中的应用
Fig. 16 Commercial liquid metal thermal interface materials and the LED street lamps using liquid metal thermal interface materials

程中往往伴随着巨大的热量吸收或释放,利用这一特性,可以进行热能的储存。相变储热具有结构紧凑、储能密度大、系统相对简单、运行稳定可靠的特点,可广泛应用于太阳能储存与利用、建筑节能、电网削峰填谷(夜间蓄冷蓄热)、余热回收利用、冷链物流等领域。

此外,相变材料还可用于瞬时性或间歇性工作的电子器件的控温。当器件工作时,会产生热量,相变材料吸收热量并熔化,同时温度几乎保持不变,因此可以有效防止器件过热。当芯片停止工作后,相变材料将吸收的热量释放到环境中并凝固,为抵抗下一次热冲击做好准备。基于这一原理,相变材料可用于移动设备冷却、芯片热冲击防护、电动汽车电池包热管理、恒温服装、航天电子温控等领域。

传统的相变材料按照化学成分主要可分为两大类:1)有机相变材料,主要包括烷烃类、烷烃混合物(石蜡)、醇类、脂肪酸等;2)无机相变材料,主要指无机盐类和水合无机盐类。相变材料根据熔点的不同,其使用范围也有所不同。一般而言,无机相变材料广泛用于高温储热领域(温度高于 100°C),例如太阳能储热;而有机相变材料则适用于中低温领域($0\sim 100^{\circ}\text{C}$),例如电子器件热控。水也是一种常见的相变材料,其熔点为 0°C ,可用来储存冷量,用于建筑供冷、食品或药物保鲜运输等领域。

相变传热过程是相变材料使用过程中最重要的环节,相变传热能力的好坏直接决定了相变材料的储能效率或温控性能。然而,传统的相变材料普遍面临的一个问题是其热导率较低,比如石蜡的热导率一般在 $0.1\sim 0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,无机盐类的热导率在 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右,水的热导率为 $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (20°C 时),这严重限制了热量在相变材料内部的传递,从而影响了其使用性能。因此,强化相变材料内部的传热是近年来十分活跃的研究课题,主要方式包括添加高导热纳米颗粒和提供高导热路径(如内部翅片、热管、泡沫金属等)^[33]。

2012年,葛浩山等^[34]系统性地提出了使用低熔点金属作为新型相变材料用于电子器件温控和中低温热能储存的方法,并成功应用于智能手机、U盘(或移动硬盘)等间歇性使用的电子设备的智能温控^[35]。低熔点金属相变材料热导率一般在 $10\sim 40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比传统相变材料高出2个数量级,因此具有远高于传统材料的相变温控性能。日常使用的消费电子产品,特别是移动设备,如手机、平板电脑、相机、红外设备、GPS导航设备等(图17),均在一定程度上存在间歇性发热的问题,金属相变材料的使用可以有效控制其发热问题,并为其向更高性能、更高集成度和更高功率发展提供了高性能供温控技术保障。



图 17 金属相变材料用于移动设备智能温控

Fig. 17 Smart thermal control of mobile devices using low melting point phase metal change materials

此外,对于一些存在瞬时性功率波动的器件或设备,金属相变材料可以作为一种辅助的温控手段。在热设计时,可以根据器件的基本热负荷来设计相应的主动冷却系统,同时配备相变温控单元,以便于在瞬时性功率波动时防止器件过热。如果不添加相变温控单元,则需要按照最高热负荷来设计相应的冷却系统,这

无疑会增加其成本和复杂度。金属相变材料也可以直接集成到芯片中,以缓冲芯片由于偶尔的功率脉冲带来的热冲击^[36-37]。

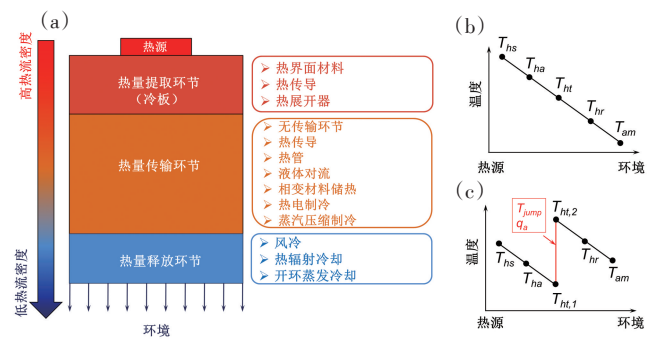
在一些极端恶劣条件下,环境温度可能会高于电子产品所能承受的范围,比如石油钻井设备、火山探测等。这时,不仅需要将芯片自身的热量散发出去,还需要抵抗来自外界高温环境的热量。常规的散热技术,最终都要求从高温的芯片向更低的环境温度散热,在这种情况下显然已经失效。制冷循环可以实现向更高温度环境的热量传输,但是系统复杂、体积大、重量大、成本高。热电制冷虽然也可以实现制冷冷却,但是由于其工作效率低,在大功率散热时必然存在散热系统体积大的问题。应对这种情形,相变吸热是一个不错的解决方案,可以为芯片或设备提供简单、高效、紧凑的热防护。

目前,刘静实验室已经建立了比较全面的低熔点金属相变材料库,可以根据使用场合的不同选择不同的金属相变材料。针对金属相变材料特有的相变传热特性,已经总结出相应的无量纲关系式,可以很方便地用于指导相应的模块设计^[38]。同时,为了加快相应的热设计过程,已经建立了针对金属相变传热模块的简化数值模型^[39-40]。针对极端大功率(或高热流密度)热冲击情形,也已经开发出了相应的高性能金属相变热控装置^[41]。

4 液态金属组合传热学和复合冷却技术

经过多年的发展,基于液态金属的芯片冷却与热管理技术已经从实验研究走向实际应用,相关理论和技术体系也逐渐成熟。但是,追求更高性能、更加可靠、更高性价比的冷却技术的脚步永远也不会停歇。热管理技术应用场合千变万化,工作环境和要求纷繁复杂,为了从根本上指导更加先进的液态金属冷却技术的开发,刘静最近提出了基于液态金属的复合传热学概念^[42]。

液态金属复合传热学的基本思想就是将散热系统模块化,每个模块都有各自的基本传热方式和特点。一般而言,一个常规的散热系统可以被抽象地划分为5个部分:热源、热量提取环节、热量传输环节、热量释放环节及周围环境,如图18所示^[42]。根据应用场合的不同,可以将不同模块有机地组合到一起,组成特定的散



T_{hs} : 热源温度; T_{he} : 热量提取环节温度; T_{ht} : 热量传输环节温度;

T_{hr} : 热量排出环节温度; T_{am} : 环境温度; T_{jump} : 制冷模块的温升;

q_a : 制冷模块增加的热量

(a) 冷却系统基本模块抽象划分; (b) 一般冷却系统各模块温度变化;

(c) 热电冷却和蒸汽压缩循环制冷冷却各模块温度变化

图18 冷却系统抽象划分与各环节温度变化示意^[42]

Fig. 18 Abstract division and temperature variation of cooling system^[42]

热系统,以最佳的性能满足特定的工作要求。液态金属冷却技术,包括热界面材料、热展开器、对流冷却、相变热控等,可以在不同的模块中扮演不同的角色,通过将液态金属冷却技术与传统冷却技术有机结合,将其应用于最需要的传热模块中,解决关键环节的传热瓶颈问题,可以构建出最适合的冷却方法,同时实现更高的冷却性能和更高的性价比。

5 液态金属冷却关键技术与挑战

任何一种新的材料在其实际使用过程中都会不可避免地产生一些科学和技术难题,液态金属也不例外。液态金属冷却技术中存在的一些关键技术挑战和急需解决的难题如下。

1) 材料基因组。构建系统的液态金属材料基因组,包括一元、二元和多元液态金属合金的配制及其物理化学性质数据库;构建液态金属物性的理论预测模型以指导材料配制;进一步拓宽液态金属的使用温区范围,特别是找到熔点 $<0^{\circ}\text{C}$ 及熔点在 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间的液态金属;寻找价格更低的液态金属材料,以促进其民用化。

2) 热物性强化。进一步提升液态金属材料的热物性性质,主要包括更高的热导率、更大的比热容和更高的相变潜热。

3) 材料相容性。有效解决液态金属与常用结构材

料的相容性问题,实现大温区范围内长时间工作无腐蚀风险。

4) 驱动技术。针对液态金属对流冷却和热展开技术,研制紧凑型、高扬程、大流量、高效率的液态金属电磁泵,为超高热流密度冷却提供驱动力技术支持。

5) 实际应用。进一步拓宽液态金属冷却技术的应用领域,特别是常规冷却技术无法解决的、因“热障”问题而限制了其进一步发展的重大装备领域。

6 结论

作为一类新兴的高性能热管理材料,液态金属在对流冷却、热界面材料、相变热控等领域均带来了技术上的革新,打破了传统冷却技术的性能极限,给大量面临“热障”问题的器件和装备的冷却带来了新的解决方案。经过10多年的发展,液态金属冷却领域已形成了相对完备的知识产权和技术体系,在材料制备、理论模型、数值分析、系统构建等方面有较为成熟的技术储备。可以预见,在不久的将来,这一新兴技术将在国防、航空航天、能源系统以及民用设备等领域的冷却与热管理系统中大放异彩。未来,在液态金属先进冷却技术研发的浪潮中,有待于更多学术界、工业界人士的加入,以更好更快地促进相应的前沿探索与产业化进程。

参考文献(References)

- [1] Pfahl R C, Mcelroy J. The 2004 international electronics manufacturing initiative (inemi) technology roadmaps[C]//Proceedings of the Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 1-7.
- [2] Ball P. Computer engineering: Feeling the heat[J]. Nature News, 2012, 492(7428): 174.
- [3] Waldrop M M. The chips are down for Moore's law[J]. Nature, 2016, 530(7589): 144-147.
- [4] Tuckerman D B, Pease R. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE electron device letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [5] Kandlikar S G, Colin S, Peles Y, et al. Heat transfer in microchannels—2012 status and research needs[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(9): 942-955.
- [6] Ahmed H E, Salman B H, Kherbeet A S, et al. Optimization of thermal design of heat sinks: A review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 129-153.
- [7] Chamkha A J, Molana M, Rahnama A, et al. On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review[J]. Powder Technology, 2018, 332: 287-322.
- [8] Xie X, Liu Z, He Y, et al. Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water-cooled minichannel heat sink[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(1): 64-74.
- [9] Wang H, Chen Z, Gao J. Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 870-879.
- [10] 刘静, 周一欣. 以低熔点金属或其合金作流动工质的芯片散热用散热装置: CN1489020[P]. 2002-10-10.
Liu Jing, Zhou Yixin. Heat sink for chip cooling with low melting point metal or its alloy as working fluid: CN1489020[P]. 2002-10-10.
- [11] Miner A, Ghoshal U. Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(3): 506-508.
- [12] Ghoshal U, Grimm D, Ibrani S, et al. High-performance liquid metal cooling loops[C]//21st IEEE SEMI-THERM Symposium. Piscataway, NY: IEEE 2005: 1-4.
- [13] Jetrovec V. Quasi-passive heat sink for high-power laser diodes[C]//SPIE LASE: Lasers and Applications. Bellingham WA: Science and Engineering International Society for Optics and Photonics, 2009: 71980D.
- [14] Deng Y G, Liu J. Design of practical liquid metal cooling device for heat dissipation of high performance CPUs[J]. Journal of Electronic Packaging, 2010, 132(3): 031009.
- [15] Ma K Q, Liu J. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(15): 4722-4729.
- [16] Ma K Q, Liu J. Nano liquid-metal fluid as ultimate coolant[J]. Physics Letters A, 2007, 361(3): 252-256.
- [17] Tang J B, Zhao X, Li J, et al. Liquid metal phagocytosis: Intermetallic wetting induced particle internalization[J]. Advanced Science, 2017, 4(5). <https://doi.org/10.1002/advs.201700024>.
- [18] Ma K Q, Liu J, Xiang S H, et al. Study of thawing behavior of liquid metal used as computer chip coolant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(5): 964-974.
- [19] Deng Y G, Liu J. Hybrid liquid metal-water cooling system for heat dissipation of high power density microdevices[J]. Heat and Mass Transfer, 2010, 46(11/12): 1327-1334.
- [20] Mei S F, Deng Z S, Liu J. Hybrid mini/micro-channel heat sink using liquid metal and water as coolants[C]//ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems

- collocated with the ASME 2015 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers, 2015: V002T06A010-V002T06A010.
- [21] Li H Y, Liu J. Revolutionizing heat transport enhancement with liquid metals: Proposal of a new industry of water-free heat exchangers[J]. *Frontiers in Energy*, 2011, 5(1): 20-42.
- [22] Li P, Liu J. Harvesting low grade heat to generate electricity with thermosyphon effect of room temperature liquid metal[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(9): 094106.
- [23] Li P, Liu J. Self-driven electronic cooling based on thermosyphon effect of room temperature liquid metal[J]. *ASME Journal of Electronic Packaging*, 2011, 133(4): 041009.
- [24] Deng Y, Liu J. Heat spreader based on room-temperature liquid metal[J]. *ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2012, 4(2): 024501.
- [25] Luo M, Zhou Y, Liu J. Blade heat dissipator with room-temperature liquid metal running inside a sheet of hollow chamber[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(3): 459-464.
- [26] Hodes M, Zhang R, Wilcoxon R, et al. Cooling potential of galinstan-based minichannel heat sinks[C]//13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 297-302.
- [27] Hodes M, Zhang R, Lam L S, et al. On the potential of galinstan-based minichannel and minigap cooling[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(1): 46-56.
- [28] Liu Y, Chen H, Zhang H, et al. Heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink with liquid GaInSn coolant [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 605-613.
- [29] Yang X H, Tan S C, Ding Y J, et al. Flow and thermal modeling and optimization of micro/mini-channel heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 289-296.
- [30] Tang J B, Wang J, Liu J, et al. A volatile fluid assisted thermo-pneumatic liquid metal energy harvester[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(2): 023903.
- [31] Tan S C, Zhou Y X, Wang L, et al. Electrically driven chip cooling device using hybrid coolants of liquid metal and aqueous solution[J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(2): 301-308.
- [32] Gao Y, Liu J. Gallium-based thermal interface material with high compliance and wettability[J]. *Applied Physics A*, 2012, 107(3): 701-708.
- [33] Sidik N A C, Kean T H, Chow H K, et al. Performance enhancement of cold thermal energy storage system using nano-fluid phase change materials: A review[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 94: 85-95.
- [34] Ge H S, Li H, Mei S, et al. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 331-346.
- [35] Ge H, Liu J. Keeping smartphones cool with gallium phase change material[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(5): 054503.
- [36] Shao L, Raghavan A, Kim G H, et al. Figure-of-merit for phase-change materials used in thermal management[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 764-771.
- [37] Gonzalez-Nino D, Boteler L M, Ibitayo D, et al. Experimental evaluation of metallic phase change materials for thermal transient mitigation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116: 512-519.
- [38] Yang X H, Tan S C, Liu J. Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 899-907.
- [39] Yang X H, Tan S C, Ding Y J, et al. Experimental and numerical investigation of low melting point metal based PCM heat sink with internal fins[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 87: 118-124.
- [40] Yang X H, Tan S C, He Z Z, et al. Evaluation and optimization of low melting point metal PCM heat sink against ultra-high thermal shock[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 119: 34-41.
- [41] Yang X H, Tan S C, He Z Z, et al. Finned heat pipe assisted low melting point metal PCM heat sink against extremely high power thermal shock[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 160: 467-476.
- [42] Yang X H, Liu J. Liquid metal enabled combinatorial heat transfer science: Towards unconventional extreme cooling[J]. *Frontiers in Energy*, 2018, 12(2): 259-275.

Advanced liquid metal cooling: Historical developments and research frontiers

YANG Xiaohu^{1,2}, LIU Jing^{1,2,3}

1. Key Lab of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The thermal barrier problem has been a major bottleneck that hinders the development of high-profile chips and optoelectronic devices. Hence, it is urgent to develop high-performance chip cooling and thermal management technologies to tackle this challenge. As a class of newly emerging thermal management materials, liquid metals have revolutionized the concepts and technologies in the areas of convective cooling, thermal interface materials, and phase change materials. The liquid metals enable cooling technologies to break the performance limit of conventional cooling methods and provide powerful solutions for the cooling of devices and equipment which are faced with tough thermal barrier issues. They are expected to play a key role in areas such as defense equipment, aerospace industry, energy systems, and consumer electronics. This paper is dedicated to a systematic review on the developments and frontiers of liquid metal cooling technologies, mainly including liquid metal convection cooling, liquid metal based thermal interface materials, low melting point metal phase change materials and liquid metal enabled combinatorial heat transfer science and cooling technologies. The main scientific issues and technical challenges lying behind are outlined and discussed in order to help better stimulate the development and applications in the area.

Keywords liquid metal; chip cooling; high heat flux; hybrid coolants; thermal interface materials; phase change materials; combinatorial heat transfer science ●



(责任编辑 王志敏)