

芯片强化散热研究新领域 ——低熔点液体金属散热技术的提出与发展*

刘 静,周一欣

(中国科学院理化技术研究所, 北京 100080)

摘 要 近年来,高集成度计算机芯片、光电器件等引发的热障问题,已成为制约其持续发展的技术瓶颈之一。围绕这一紧迫现实需求,提出将室温下呈液体状态的低熔点金属或其合金作为冷却流动工质,以发展先进芯片散热器的技术观念,并在相应的理论分析、试验研究及实际器件的研制等方面取得了进展。随后,国外也启动了类似研究,相应进展立即在产业界及学术界产生重要反响。种种态势表明,液体金属芯片散热技术已成为计算机热管理领域内极具探索价值的新前沿。由于液体金属热导率远高于常规流体,因而在传热效果上可望显著优于传统的液冷方法,该方法的建立为发展高性能芯片冷却技术开辟了一条全新的途径。回顾新方法提出的过程,归纳出其中有待解决的一些重要科学问题,并对其应用前景进行展望。

关键词 芯片冷却;计算机热管理;低熔点液态金属;强化换热;光电系统;微/纳电子

中图分类号:TN305.94;TG115.25 文献标识码:B 文章编号:1008-5300(2006)06-0009-04

New Frontier in Enhanced Chip Cooling Its Proposal and Development of Liquid Cooling Method Using Low-melting-point Metal as Coolant

LIU Jing, ZHOU Yi-xin

(*Technical Institute of Physics and Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract In recent years, the "thermal barrier" encountered in a highly integrated computer or optoelectronic chip has become a bottle neck to prevent its further development. To solve this urgent problem, we proposed for the first time the technical approach of using metal with low melting point or its alloy as the cooling fluid, so as to develop advanced chip cooling device. A series of progress of theoretical, experimental investigations as well as fabrication of practical devices were made. At a little later time, similar efforts were also made abroad, which immediately received intense attentions from both industry and academic fields. Various evidences indicate that, the liquid metal based chip cooling is becoming a new frontier in the thermal management of computer system. With much larger heat conductivity than that of ordinary fluids, the liquid metal would have superior heat transfer capacity over traditional coolant, which may lead to a brand new way for making advanced chip cooling device. In this paper the progress of the new method is reviewed, and the important scientific issues thus raised are summarized. Prospects for the application of the liquid metal cooling method is also discussed.

Key words: chip cooling; computer thermal management; low-melting-point liquid metal; enhanced heat transfer; optoelectronic system; micro/nano electronics

0 引 言

近年来,计算机、光电芯片一直是朝着提高集成

度、减小尺寸及增加时钟频率的趋势发展。“热障”问题因此日益严峻。按照著名的“摩尔定律”推算:计算机芯片上的晶体管每18个月翻一番,那么到2010年,芯片上晶体管的数量将突破10亿,此时,芯片耗能和

* 收稿日期 2006-07-14

基金项目:国家自然科学基金(批准号:50576103,50325622)

散热问题也凸现出来。实际上,现有 AMD 桌面 Athlon 1200 MHz 产生的热量已达 66 瓦,一颗 Pentium4 @ 2 GHz 芯片的消耗功率更高达 75 瓦。由此带来的过高温度将降低芯片的工作稳定性,增加出错率,同时模块内部与其外部环境间所形成的热应力会直接影响到芯片的电性能、工作频率、机械强度及可靠性。事实上,不仅对于计算机芯片,对于大量功率电子设备、光电器件以及近年来发展迅速的微/纳电子机械系统等,都存在着类似的广泛而迫切的散热冷却需要,有的情况下甚至要求更高,比如,一些微系统的热流密度已高达 103 W/cm^2 。这些态势都表明,目前对高性能冷却技术的需求已提到了前所未有的层面,相关研究是多个学科领域共同的前沿和关注的重大课题。

芯片技术发展对高性能冷却方法的迫切要求与实际应用的广阔空间,使得对超高热流密度芯片、微系统的散热技术研究一直成为国际上异常重要而活跃的研究领域。由美国国防部远景规划项目署(DARPA-Defense Advanced Research Projects Agency)资助的大规模研究计划 HERETIC(heat removal by thermo-integrated circuits)就旨在发展可与高密度高性能的电子或光学器件相集成的固态和流态的散热器件。该项目已历时 20 余年,有关课题分布在几十所大学和国家研究机构,经费资助总额高达数千万美元。此外,美国联邦政府的其它机构包括海军研究办公室、能源部以及 NSF、NASA、NSA 等也对这一类研究进行了大范围资助。与此同时,半导体工业界则为此投入了大量财力。学术界、工业界对芯片冷却主题的广泛研究,使得相关的学术活动十分活跃,重要的国际会议包括 I THERM、SEMI-THERM 和 THERMINIC 等。同时,人们在研究的基础上还建立了一批致力于芯片冷却应用技术的公司,如 MMR、CoolChips、Cooligy 等。而美国许多大学也成立了相应的研究中心,以促进相应技术向应用转化。

1 当代芯片散热技术的现状与发展态势

当前的技术现状是,各类计算机芯片普遍采用受迫对流空气来冷却发热器件,即通过扩展肋片,改进气流分布,增大风压,将冷却空气压送至散热器表面,以将该处热量散走,此种方式的冷却效率与风扇速度成正比,因而会产生明显噪音,而且一旦微器件发热密度过高时,空气冷却将很难胜任。目前,气冷方式的散热能力已渐趋极限($< 100 \text{ W/cm}^2$),难以适应功耗继续增加的需要,特别是在如笔记本电脑等便携式设备的狭小受限空间中更是如此。随着计算机芯片集成度的

飞速增长,要求的换热强度越来越高,采用水冷或热管散热的方式已提到日程上来,相应产品相继出现在市场上。液体因单位体积热容远大于气体,作为循环工质能够提供更高的冷却功率,是一种较佳选择。据业界人士分析,液冷可能会成为一个主流。实际上就计算机 CPU 的散热问题而言,Intel、NEC、松下、日立等国际著名公司新近都推出了基于液冷的散热方案。然而,这类液体冷却虽然效率较高,但在运行中由于工质蒸发或泄露等会导致器件老化、腐蚀,对液体及流动管道的要求较高,可靠性尚有待提高,据报道,有些采用水冷的芯片易于烧毁,原因就在于此类系统尚不可靠,一旦由于某些故障导致水流停止,则失去冷却的芯片温度将迅速攀升,直至烧毁。此外,热管、蒸汽压缩制冷、合成微喷、热电制冷等新方法在一定程度上增强了芯片的散热效果,但也各有优缺点。比如,热管是一种被动散热,利用相变传热的冷却方式,可以达到较之单相流体更高的热流转移通量,但热管制做工艺如芯体材料的制备、工质封装、维护及可靠性等仍有待于提高,这使其应用受到一定限制。热电制冷没有运动部件是其最大优点,但因制冷效率过低,系统功耗较大,而且制冷片热端也需增设高效的散热器件,不利于微型化;此外,研究人员也正在考虑热离子冷却或热声制冷,但受工作温区及整机微型化的限制,目前离实用还有距离。人们一直期待有理想的芯片散热方法来适应计算机 CPU 的高速发展。液体冷却目前是比较理想且可行的芯片散热方式,也因此引起诸多研究人员的重视。为增强液体散热能力,研究人员提出了采用功能流体的做法,将某些高导热率纳米颗粒掺入到流体的工质中,期望其换热能力会由于高导热粒子的导热性而得到强化。但是,与金属相比,这种换热能力的提高仍是有限的,且流体流动特性会由于颗粒的掺入而变弱,甚至可能出现老化、腐蚀、变质及堵塞的问题,对工质、颗粒及流动管道的要求较高,此方面的完善仍需做大量工作。

2 液体金属芯片散热技术的提出与发展

众所周知,金属具有远高于非金属材料的热导率,因而在许多特殊场合具有重要用途。而计算机芯片一般工作在 0°C 以上, 100°C 以下,设想若能将这一温区内处于液体状态的金属作为冷却流体,则可望产生优异的散热性能。正是基于这一考虑,我们于 2002 年提出了以低熔点金属或其合金作为冷却流动工质的计算机芯片散热方法。这是在芯片热管理领域中首次引入的新观念。在这种先进散热技术中,流通于流道内的工质并非常规所用的水、有机溶液或更多功能流体,而

是为在室温附近即可熔化的低熔点金属如镓或更低熔点的合金如镓铟等,因而整套装置可做成具有对流冷却方式的纯金属型散热器。由于液体金属具有远高于水、空气及许多非金属介质的热导率(如镓导热率约为水的60倍,高出空气1000多倍),且具有流动性,因而可实现快速高效的热量输运能力,这相对于已有的散热方式而言是一个实质性的拓展。这种低熔点液体金属以远高于传统流动工质的热传输能力,最大限度地解决了高密度能流的散热难题。特别是,由于采用了液体金属,散热器可作得很小且易于通过功耗极低的电磁泵驱动,由此可实现整体集成化的微型散热器。可以预计,作为一种同时兼有高效导热和对流散热特性的技术,液态金属散热将有望成为新一代最理想的超高功率密度热传输技术之一。而且,随着今后各类高功率芯片发热密度的持续攀升,传统散热技术趋近极限时,该项技术越能发挥作用。迄今,作者实验室在此领域内拥有多项技术专利,并通过各种驱动方式如蠕动泵及电磁泵等试验论证了液态金属散热方法的优越性。不难看出,液态金属散热作为一项底层技术,还可由此引申出更多高效微型散热器形式,并有可能打破许多光电子芯片器件使用上的技术瓶颈。

上述技术近期得到了不少机构的高度重视。美国 Nanocooler 公司在落后的情况下,也曾提交了同样的专利申请并取得部分进展(其美国和中国专利分别晚于作者实验室2个月、13个月),且在随后的时间内仅在该项技术上就获得高达1千万美元以上的资金投入(相关报道见于著名的华尔街时报文章“Start-up Sees Hot Area in PC Cooling, by B. Sechler”-Feb. 19, 2004, The Wall Street Journal)。2005年11月,作者实验室参加美国机械工程师学术年会(ASME 2005 IMECE)时,报道了液体金属芯片散热技术的研究,并继而了解到此项由中国最先提出的新一代散热技术已引起业界广泛关注,工业界只是因受限于专利约束尚不能全面介入相应研究,但美国学术界一些机构则正着手准备甚至已投入该方向的研究;上述热切的研究态势凸显了该项散热解决方案的重大意义。实际上,知名显卡生产厂商 Sapphire 公司在中国台北举办的 Computex 2005 电子产品展会上,展示了一款采用液态金属散热的图像显示卡(其技术来源正是 Nanocooler 公司),充分证实了此项技术的现实可行性和实用价值。该消息一经披露,立即引起各方面高度关注,美国知名技术媒体 Technology Review 以“Metal-Cooled Computing”为题对之进行了报道;类似报道也见于著名科技媒体 New Scientist。

由于以低熔点液态金属作为冷却剂的首项专利隶属于作者实验室,美国公司此前的商业推进计划未能按预期进行。作为一项崭新的芯片强化散热技术,尚需开展大量理论与实验研究工作,以期推进认识相应的基础与应用问题。有意味的是,采用液体金属如高温下的铍(其熔点较高)作为一种理想的冷却工质,以往在同步加速器和反应堆的超高热流的极端冷却场合下就已发挥了关键作用。可以预见,正如当年核反应堆所采用的终极制冷剂—高熔点液体金属一样,由先进芯片技术引申出的各类超高功率密度器件的散热也逐渐会采用低熔点金属。特别是,随着高功率密度器件以及更广义上的纳米光电子时代的到来,将会对先进散热技术提出更多需求。此方面,液态金属散热器可能发挥更大作用。因此,这一领域的开展同时兼有十分重要的实际应用价值和前沿科学意义。

3 液体金属芯片散热技术的基本特点及优势

液态金属芯片散热技术的关键之处在于引入了概念崭新的冷却工质,即在流道内流动的冷却工质并非非常规所用的水或其他有机混合流体,而是为在室温附近即可熔化的低熔点金属如镓或更低熔点的合金如镓铟等,这相对于以往使用气体或非金属液体作流动工质的作法是一个观念性的革新。这种低熔点液体金属以显著优于传统流动工质(如水、有机溶液或更多功能流体)的热传输能力,可望最大限度地解决高热流密度的散热难题。随着今后计算机芯片发热密度的继续增大,传统散热技术趋近极限时,该方法越能发挥作用,因此,这种散热器件很可能成为今后发展的一个重要方向,相关技术易于推进到实用阶段,而成为计算机芯片热管理领域中的一个亮点。

值得指出的是,可供选择的低熔点金属或其合金的种类实际上很多,作者实验室及国外机构前期均主要以镓及其合金为工质,以考察其对芯片的冷却效果。在自然界中,镓是一种柔软无毒的银白色金属,它在大气环境下的熔点很低,仅为 29.77°C (其合金熔点甚至在 10°C 以下),在熔点时的导热系数为 $25.2\text{ kcal/m}^2/\text{h}^{\circ}\text{C}$,远高于空气和水;液态镓的绝对粘度在 52.9°C 时为 $1.89 \times 10^{-2}\text{ g/cm}^2/\text{s}$,在 301°C 时为 $1.03 \times 10^{-2}\text{ g/cm}^2/\text{s}$,与水接近;固态镓在 27°C 时的比热为 $0.089\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$,在 100°C 时的比热为 $0.082\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ 。此外,镓的蒸发温度约为 2000°C ,这使其不像水类物质那样易于在运行中因蒸发而散失。这些热特性表明,将镓作为芯片散热用的冷却介质十分合适。在常温下,镓在

空气中是稳定的,仅当温度高于 260℃ 以上时,干燥的氧可使镓金属氧化,但生成的氧化膜可防止其继续氧化。

归纳起来,采用低熔点金属的芯片散热技术的优势在于:

1. 芯片散热器体积可作得更小,而散热能力则显著优于现有液冷方法。由于液体金属的散热能力很强,因此,对于目前所需的发热密度,采用该技术的散热器在体积上可以作得很小。

2. 该技术集肋片散热和对流冷却散热于一体,大大拓展了传统散热方式的散热表面。多个散热器还可组合成更为丰富的结构,因而适用面更宽。

3. 噪音更低。由于液体金属芯片散热器运行时,工质无需大流速,因此噪音极小,而一旦采用电磁驱动后,则噪音可完全消除。

4. 适用面广。该技术可同时发展为笔记本电脑、台式电脑或更多军用或民用高功率发热电子元器件的散热器。

5. 可持续发展的能力更强。今后,芯片元器件的集成度将继续攀高,因而发热量会达到更高水平,此时,液体金属散热技术发挥作用的的空间就越大。

6. 可以无运动部件。采用电磁驱动后,散热系统内无运动机构,因而性能更加稳定可靠。

7. 技术发展空间较大。由于液体金属引入计算机散热领域是一种底层技术,沿此路线,还可扩充出更多散热器方案。

出于对超高强度热流排放的需求,人们对高效冷却方式的追求长期投入了大量的人力物力,但有关途径的散热能力已几乎达到极限。以液体金属作为冷却流体以及同时结合肋片散热和对流冷却散热的方式已显示其重要价值,是寻找高效冷却芯片方法的新的切入点,由此可望建立一些崭新的理论与技术。

4 液态金属散热技术研究中的重要科学问题

以低熔点金属及其合金作为冷却流动工质概念的提出,引申出了一系列重要的基础理论与实验问题。围绕液态金属芯片散热技术,今后应集中在工质材料、液体金属传热及驱动方式等的研究上。此方面,可进一步筛选出更多符合散热工况要求的低熔点金属合金工质,测量出不同液体金属流体在不同温度、不同微流道结构中的粘度、热导率、比热及潜热等热物性。针对这些崭新的液体金属工质,可建立一系列相应的流动和能量守恒方程。由于低熔点金属流体与以往在计算

机芯片散热技术领域内所研究过的各类气体或液体工质均不同,因此可望获得一系列新的基础性认识。结合理论和实验工作,可望揭示低熔点金属及其合金丰富的强化换热规律,并据此设计、优化出系列先进的冷却系统。围绕实际应用的需求,通过对一些强化换热结构内的液体金属的流动和传热规律进行测试,可以总结出具有重要实用价值的热工学关系式。由于以往很少有针对此类低熔点金属及合金流体传热特性的试验研究,因此,这部分研究可望获得若干重要的规律。此外,还应就液态金属冷却器件的加工和封装问题进行研究,以获取相应的新型实用技术,此方面需要解决微流道、微驱动泵的制作及器件的整体集成问题,由此分门别类地制成适合于台式计算机、笔记本等使用的液体金属散热器,并将其推广到更多高功率冷却场合。

总之,通过这些努力,可望系统地建立起一大类崭新的以低熔点金属及其合金流体作为冷却流动工质的计算机芯片散热技术,从而填补强化散热领域内的新空白。

5 结 语

任何新技术的诞生都有其明确的应用背景。高密度光电器件技术应用的需求,促成了各类先进散热方法从原理、材料到结构上的突破。随着高端芯片的推出,采用液冷方式替代已趋于极限的气冷方式将不可避免。显然,优于常规液冷技术的低熔点液体金属散热方式的引入,必将大大推动超高功率密度散热技术的进步。随着对液态金属强化散热规律的深化认识,以及新工质的发现、新结构和新工艺的开发,将促成更多先进芯片技术的应用。与此同时,液体金属芯片冷却技术的内涵也必将继续得到丰富。这些在实践环节中提出的大量课题和挑战,又会促成各类热管理技术的进步。

参考文献:

- [1] 李腾,刘静. 芯片冷却技术的最新研究进展及其评价[J]. 制冷学报, 2004, 25(3): 22-32
- [2] 李腾,刘静. 芯片冷却技术中的微/纳米材料与结构的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2004, 41(8): 21-27
- [3] 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[P]. 中国专利, 02131419.5
- [4] 李腾,吕永钢,刘静,周一欣. 基于低熔点金属及其合金的计算机芯片散热方法[C]. 中国工程热物理学会 2004 年传热传质学会议, 吉林, 2004: 1115-1118

(下转第 25 页)

式中 L_2 为车身中心到地面距离。

27 m/s 风速时车身风力矩 M :

$$M_{\text{车2}} = F_{\text{车2}} \times L_2 = 368 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

4.5.4 支撑跨距计算

天线风力矩 $M_{\text{天}}$ 和车身风力矩 $M_{\text{车}}$ 都是风负荷下整车的倾复力矩,其合成倾复力矩 M :

$$M = M_{\text{天}} + M_{\text{车}}$$

整车的稳定取决于整车的总质量和支撑跨距,其稳定条件是卫通车重力产生的力矩大于倾复力力矩。

计算支撑跨距 :

$$L = 2M/G$$

式中 G 为整车各部分重量。

稳态风 20 m/s 风速时 :

$$L = 2M/G = 2(M_{\text{天}} + M_{\text{车}})/G = 248 \text{ mm}$$

阵风 27 m/s 风速时 :

$$L = 2(M_{\text{天}} + M_{\text{车}})/G = 452 \text{ mm}$$

为确保在 27 m/s 风速负荷下,整车的稳定性,支撑跨距取值为 1000 mm 时,安全系数 K 为 :

$$K = 1000/452 = 2.21$$

完全满足使用要求。

5 结束语

小型卫通车的结构总体设计对车载天线的尺寸和重量、结构型式,进行了合理的选择,从而解决了天线重量与车辆载重以及轴荷分配之间的矛盾,设计达到了战术指标要求,保证了车辆的机动性。

结构总体设计中采用新的技术和先进的结构,使产品的稳定性和可靠性得到了保证,已在实际中应用。整体布局协调合理,运输状态满足铁路、公路运输要求,车内布局合理,机柜和车内壁颜色协调,整体美观大方,可作为同类产品结构设计时参考。

参考文献 :

- [1] 机械工程师手册[M]. 北京 : 机械工业出版社, 1989
- [2] 叶尚辉,等. 天线结构设计[M]. 西安 : 西北电讯工程学院出版社, 1986
- [3] 王健石,等编. 电子设备结构设计[M]. 北京 : 电子工业出版社, 1993

作者简介 : 王俊(1964 -) , 男, 1990 年毕业于华东工学院, 现从事结构设计工作。

(上接第 12 页)

- [5] J Liu , Y X Zhou , Y G Lv , and T Li. Liquid metal based miniaturized chip - cooling device driven by electromagnetic pump[C]. 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition , 2005 5 - 11
- [6] T Li , Y G Lv , J Liu , and Y X Zhou. A powerful way of cooling computer chip using liquid metal as the cooling fluid [M]. Forschung im Ingenieurwesen—Engineering Research , Published online 2006 8 - 26
- [7] Z S Deng , J Liu. Numerical evaluation on the heat dissipation capability of liquid metal based chip cooling device [C]. 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition 2005 5 - 11
- [8] J Liu. Development of new generation miniaturized chip - cooling device using metal with low melting point or its alloy

as the cooling fluid[C]. Proceedings of the International Conference on Micro Energy Systems , 2005 89 - 97

- [9] G Uttam , C M Andrew. Cooling of electronics by electrically conducting fluids[P]. United States Patent , 6 , 708 , 501 , 2004
- [10] 安德鲁·卡尔·米勒, 乌坦·高沙尔. 散热装置及其热分散器[P]. 中国专利 200410002780. X

作者简介 : 刘静(1969 -) , 男, 博士, 研究员, 博士生导师。2003 年被评为国家杰出青年科学基金获得者。研究方向为先进芯片传热技术、高/低温生物医学技术与仪器等。

周一欣, 男, 副研究员。研究方向为强化传热。