

微系统热管理技术的新发展

余怀强¹,唐光庆²,桂进乐¹,王腾¹,黄波¹,邓立科¹,蒋创新¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;2. 中国人民解放军驻重庆气体压缩机厂军事代表室,重庆 400060)

摘要:多功能高度集成的微系统技术对信息系统的通信、传感、处理和执行等方面产生了很大的影响,而热管理问题却一直制约着微系统技术的发展。该文介绍了美国在微系统热管理技术方面的项目研究计划及基于热传导与液冷技术的微系统热管理技术的新进展,提出了一种基于压电驱动的主动微系统高效热管理方法,并通过搭建试验样机完成原理性测试验证。该技术主要针对如微波毫米波大功率“瓦片式”T/R(收发)组件等射频微系统热管理应用。

关键词:热管理;微系统;热流密度;压电驱动;内嵌微流道

中图分类号:TN713

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.029

New Development of Thermal Management Technology for Microsystems

YU Huaiqiang¹, TANG Guangqing², GUI Jinle¹, WANG Teng¹,
HUANG Bo¹, DENG Like¹, JIANG Chuangxin¹

(1. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Military Representative Office of the PLA at Chongqing Gas Compressor Factory, Chongqing 400060, China)

Abstract: The highly integrated multifunctional microsystem technology has made a great impact on communication, sensing, processing and actuating of information systems. However, the thermal management issues of microsystems restrict its further development. This paper presents the initiatives of America's thermal management for microsystems and reviews the advances of thermal management technology for microsystems based on heat conduction and liquid cooling techniques. An active and efficient thermal management method for microsystems based on piezoelectric actuation is also presented in this paper, and the principle test verification has been implemented by setting up the test prototype. The proposed technology can be applied to the thermal management of RF microsystems such as microwave/millimeter wave tile T/R module with high power.

Key words: thermal management; microsystems; heat flux; piezoelectric actuation; embedded micro-channel

0 引言

目前电子设备及作战平台依靠不断进步的集成电路工艺和各种先进制造技术正朝着小型化、轻型化、集成化、通用化、综合化方向发展。近年来,超越摩尔定律的微系统技术成为高校、企业及科研机构的研究焦点,它被认为是微电子技术进一步突破小型化、多功能、高密度集成瓶颈的关键技术之一。根据美国国防部高级研究计划局(DARPA)微系统技术办公室给出的定义,微系统是融合微电子、光电子、微机电系统(MEMS)、架构、算法五大基础要素,采用系统设计思想和方法,集成传感、通信、处理、执行、微能源五大功能单元的多种功能微装置。

随着技术的发展与应用需求的提高,微系统集成度不断增加,尺寸也不断缩小,而总热耗却不能等比例降低。如果微系统内部热源产生的热量无法快速有效地散出,局部温度将会急剧升高而导致器件失效,从而影响系统整体性能与可靠性。微系统如射频微系统、光电微系统等内部存在着高功率器件,例如射频/微波固态功率放大器、现场可编程门阵列(FPGA)芯片、DC/DC(直流/直流)电压转换芯片、大功率激光器等。微系统在尺寸缩小的同时为了实现更高性能,这些高功率器件功耗可能将会进一步升高,而现有的热传导、强迫风冷、液冷或热管等散热技术因体积庞大,散热效率低及难集成等缺点已

收稿日期:2018-10-12

作者简介:余怀强(1987-),男,重庆垫江人,博士,主要从事射频收发组件及微系统技术的研究。E-mail:yhq_mems@163.com。

不能满足微系统热管理需求。因此,如何在微米/纳米尺度下实现微系统的高效热管理技术成为微系统技术亟待突破的重大关键瓶颈。

近年来,国内外高校、研究机构及企业以微米/纳米机电系统(MEMS/NEMS)工艺为基础广泛地开展了包括新型材料、微流道液冷技术、微喷射流高效冷却技术、微型制冷器技术、微小型热管技术等新型高效微系统热管理技术研究,并取得了一定进展与突破^[1-3]。本文先对美国 DARPA 在微系统热管理技术方面的项目研究计划进行介绍,再根据散热原理不同分为热传导和液冷两部分探讨微系统热管理技术近年来的新进展,最后本文提出了一种基于压电驱动的主动微系统热管理方法,并展示了其原理样机试验验证结果。

1 DARPA 热管理项目计划

为了解决热管理技术瓶颈问题,美国 DARPA 从 20 世纪末开始陆续部署了一系列重大研究项目。1998 年启动“热集成电路的热移除”(HERETIC)项目。2005 年启动“器件级尺度的电子设备热移除技术”(THREADS)项目。2008 年启动“热管理技术”(TMT)项目,该项目具体包括 5 个关键子项目:

1) 开发高性能两相蒸汽腔热交换器的“热地平面”(TGP)项目,交换器内热导率目标达到 $10 \sim 20 \text{ kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2) “微型风冷热交换器技术”(MACE)项目将利用流体扰动、合成射流、压缩空气及集成微型热管等技术研发出高换热系数热沉,制冷性能系数(COP)目标达到 30。

3) 基于热电或斯特林发动机等工作原理开发微型高效制冷系统的“主动式散热模组”(ACM)项目,目标是对热流密度达到 $100 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的电子器件实现 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 量级的温降,制冷性能系数不小于 2。

4) 基于新型纳米材料及结构开发超低热阻热界面材料的“纳米热界面”(NTI)项目,目标是替代现有导电银浆、导热硅脂、金属焊料等材料热阻实现低于 $0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

5) 在电子器件晶体管结点小于 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 的区域内实现局部高效热管理技术的“近结点热传输”(NJTT)项目,大幅提高氮化镓(GaN)射频功率放大器的输出功率,目标应用针对雷达、通信及电子战的射频系统。

热管理技术项目 5 个关键技术整体示意图如图 1 所示。目标发热芯片产生的热量 Q_{in} 通过芯片级集成液冷微流道将被快速传递给高热导率的热交换器,芯片与交换器之间还加入了超低热阻的热界面材料与微型主动式制冷器如半导体制冷器(TEC)以降低热阻和增强换热性能,然后热量从热交换器通过热界面材料传递至主动式风冷微型热沉,最终被散出至外部环境。

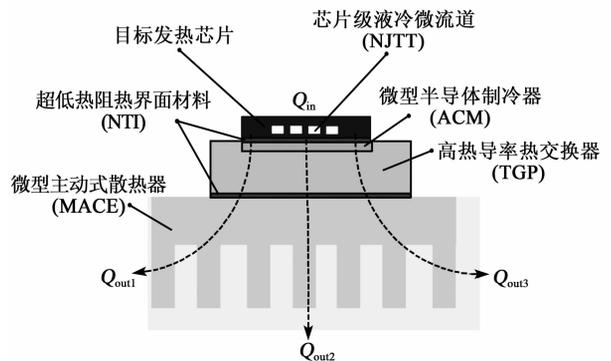


图 1 热管理技术项目的五大关键技术含义示意图

2013 年 1 月, DARPA 为补充热管理技术项目又启动了“芯片内/芯片间增强冷却”(ICECool)项目,旨在研发芯片级热管理技术实现比现有技术低 10 倍的热阻,该项目包括基础研究(ICECool Fun)和应用研究(ICEcool Apps)两部分,其中 ICECool Fun 部分将由多个团队从多个方向展开研究,如斯坦福大学与 Raytheon 公司通过金刚石微流道及纳米双层相分离结构实现高电子迁移率晶体管(HEMT)微流体冷却技术;佐治亚理工学院与 Rockwell Collings 公司将研究与晶圆级 CMOS 工艺兼容的具有高密度金属互连通孔的三维硅基微流道堆叠蒸发冷却技术;IBM 公司的 T. J. Watson 和 Zurich 两大研究中心与斯坦福大学研究基于纳米多孔结构的三维硅基集成气液两相冷却技术,从原理验证到模型建立再到设计加工实现芯片热流密度 $5 \text{ kW}/\text{cm}^2$;麻省理工学院与 Alcatel-Lucent 公司将研究多孔薄膜结构的毛细泵,为了实现热流密度为 $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 的微流体循环散热提供足够驱动与传输能力。而 ICEcool Apps 部分则分为大功率单片微波集成电路(MMIC)功率放大器和嵌入式高性能计算机(HPC)两大技术应用领域,主要技术指标有热流密度大于 $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$,平均无故障工作时间(MT-PF)设计值达到 10^6 h ,MMIC 放大器输出功率提高至少 3 倍,HPC 的吞吐效率提高至少 2 倍,吞吐密

度提高至少 3 倍,目标是突破如雷达、电子战及通信等射频系统、嵌入式计算机和固态激光器的器件性能极限。

2 基于热传导的微系统热管理技术

热传导散热方式简单、可靠,但对材料有高热导率、热匹配、加工工艺兼容性好等要求,目前具有高热导率的碳化硅(SiC)、金刚石、石墨烯成为 MMIC 射频微系统热管理研究热点。表 1 为常用材料物性参数^[4-6]。

表 1 电子电路常用材料物性参数表

材料名称	热膨胀系数/ ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Al	23.6	221.0	2.7
Al_2O_3	6.7	30.0	4.0
Cu	16.6	398.0	8.9
Mo	3.0~5.5	138.0	2.3
可伐合金	5.9	17.3	8.4
Si	2.4~4.7	138.0	10.3
InP	4.5	68.0	4.8
GaAs	5.4~5.7	50.0	5.3
GaN	5.6	130.0	6.2
SiC	2.2	370.0~420.0	3.1
CVD 金刚石	/	1 800.0	3.5
多层石墨烯	/	2 000.0	/

基于热传导的微系统热管理技术研究主要是通过微加工工艺在芯片衬底或晶体管附近实现微型热交换技术,更具体地讲是在临近热源的芯片衬底上或晶体管附近制作具有高热导率的散热薄层结构,形成一个额外的超低热阻的导热通道,将热量快速有效传导出去,如图 2 所示。

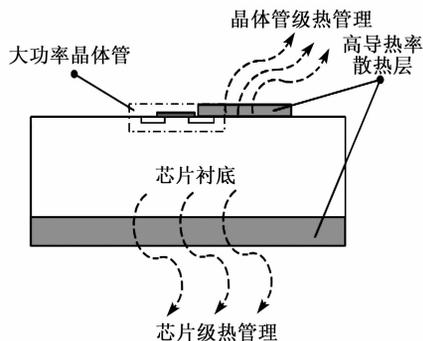


图 2 晶体管级与芯片级微系统热传导热管理技术示意图

2012 年,法国 Alcatel-Lucent Bell 实验室、Thales 公司及 CEA Leti 公司联合报道了一种 L 波

段脉冲模式(脉宽 $10 \mu\text{s}$, 占空比 10%)可输出 160 W 而连续波模式可输出 105 W 的 InAlN/GaN HEMT 放大器^[5]。为了解决该大功率放大器热管理问题,他们首先将芯片衬底(SiC)减薄至 $100 \mu\text{m}$,然后在芯片底部加入一层厚为 $250 \mu\text{m}$ 的金刚石散热薄层,金刚石通过化学气相沉积(CVD)工艺生长而成,再选用大功率封装进行最终器件封装。在环境温度 $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ 条件下放大器连续波输出 85 W 时,器件热耗为 140 W(栅极等效热流密度为 3.9 W/cm),此时,放大器最高结温为 $200 \text{ } ^\circ\text{C}$,与未采用金刚石散热层情况相比下降了 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。2013 年,美国休斯研究实验室报道了一种具有电镀金属热沉的 X 波段 GaN 功率放大器^[7],实现功率附加效率(PAE)达到 72%,连续波输出功率达到 2.5 W(栅极等效热流密度为 3.2 W/cm),输出功率比导电银浆粘接方法提高了 2 倍,比 AuSn 共晶焊方法提高了 1.5 倍,工艺流程大致如下:先将多个芯片临时键合在一个载板上,然后利用电镀工艺制作低应力金属散热层将芯片覆盖起来,再通过化学机械抛光(CMP)平整化金属散热层,最后释放芯片。

上述两项工作都是芯片级热管理方法,热源位于衬底表面数个微米的外延层,热量需通过一定厚度(一般大于 $100 \mu\text{m}$)的衬底材料如 Si、SiC、蓝宝石等才能传导出去,故而相对较大热阻会影响散热性能。2012 年, Yan 等报道了一种基于多层石墨烯(FLG)热交换器的晶体管级热管理方法,实现了一种高功率 AlGaN/GaN 异质结场效应晶体管(HFET)放大器^[6],使器件温升从 $118 \text{ } ^\circ\text{C}$ 降低至 $92 \text{ } ^\circ\text{C}$ (晶体管栅极热流密度为 12.8 W/mm),器件工作寿命提高 1 个量级,其实现方式是将热导率为 $2 000 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的 FLG 薄膜通过精确定位直接从聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)衬底转移到晶体管漏电极上,使热源产生的热量通过紧挨着的 FLG 热交换器直接快速散走。而将该热交换器放置在漏电极,是因为根据仿真结果表明 HFET 器件的热源在漏极附近。

3 基于液冷的微系统热管理技术

微波 GaN 功率放大器输出功率理论上可以达到 40 W/mm ,而如今实际工程应用中输出功率被限制在 $5 \sim 8 \text{ W/mm}$,主要原因还是晶体管结点 $100 \mu\text{m}$ 附近的局部热管理问题无法解决^[6],仅依靠热传导方式散热效率还是太低。相比其他散热技

术,液冷技术具有较高的冷却能力,而在微纳尺度下流体更具有极高的换热性能^[8]。近年来,为解决芯片级嵌入式冷却技术问题,基于对流与相变换热的微流体液冷技术被广泛研究,研究重点主要有微流体结构设计与加工,导热通路与高密度电学互连集成,两相回路传输驱动与控制,高热导率衬底材料以及加工工艺的兼容性等,最终旨在3D堆叠、2.5D集成或平面阵列中同质、异质或异构集成基于液冷的微系统高效热管理技术。

目前GaN嵌入式冷却技术根据衬底材料不同分为基于金刚石衬底的GaN与基于SiC衬底的GaN两个方向。2015年,由Raytheon公司综合防御系统部牵头的团队公布了在基于金刚石衬底的GaN晶体管底部制作高深宽比金刚石液冷微流道的热管理方法^[9],该团队重点研究高深宽比金刚石微流道加工工艺,低热阻的硅-金刚石密封键合技术、GaN上生长金刚石工艺以及热/电协同仿真,目标预期实现芯片级散热热流密度 1.23 kW/cm^2 ,对应晶体管级热流密度为 38 kW/cm^2 。与此同时,由Northrop Grumman公司航空航天部牵头的团队公布了基于SiC衬底的GaN晶体管底部集成金刚石热过孔和微喷射流结构的热管理方法^[10],实现芯片级散热热流密度为 1 kW/cm^2 和MMIC级热流密度为 30 kW/cm^2 。此外,洛克希德马丁公司Ditri等为了尽量减少对目标发热芯片衬底背部的加工或改变而采用了与前两家公司不同的方法^[11],通过微加工工艺先制作出基于钽金属的分立式微流体液冷芯片(典型尺寸为 $5\text{ mm}\times 2.54\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$),然后在基于SiC衬底的GaN目标散热芯片背面刻蚀出针脚阵列,将目标芯片贴于微流体液冷芯片表面,使得液冷工质流过GaN芯片背面进行高效换热。热学测试结果表明,采用丙二醇水溶液作为工质,当流速为 120 mL/min 时,可实现芯片级热流密度为 1.1 kW/cm^2 ,晶体管级热流密度为 30 kW/cm^2 ,结温低于GaN HEMT可靠正常工作温度。

4 基于压电驱动的微系统热管理方法

微流体液冷技术研究除了微流道、微喷等微尺度结构件的设计与加工以外,微流体的驱动与控制技术研究也极为重要。微流体控制器如微泵能够为微流体液冷循环提供足够的工作流量与压力,并具有体积小、高可靠、低功耗、工艺兼容、易集成等要

求。与静电、电磁、热、气动、介质上电润湿等驱动方式不同,利用逆压电效应实现的压电微型驱动器具有输出压力高、尺寸小、结构简单、功耗低、易集成等优点,是微流体液冷技术中微型控制器的理想选择之一。结合微泵、微阀及微流道一体化微系统热管理技术仍处于概念与研究阶段,在微流控制器高密度小型化集成方面国内外尚未有成熟技术报道。

本文提出了一种基于压电微致动器的主动微系统热管理技术,如图3所示。在多层电路板内部集成液冷微流道网络,并在板上集成压电微泵阵列,压电微泵通过串联或并联的方式与微流道网络相连接用于驱动微流体的流动,大功率芯片产生的热量通过循环的微流体快速有效地传输至冷端;为进一步提高热流密度处理能力,大功率芯片衬底上可集成加工微流道,该芯片级微流道通过焊接等方式与LTCC多层电路板的微流道连通从而实现芯片级至板级一体化主动式液冷技术,该技术可用于微波毫米波大功率“瓦片式”T/R组件。

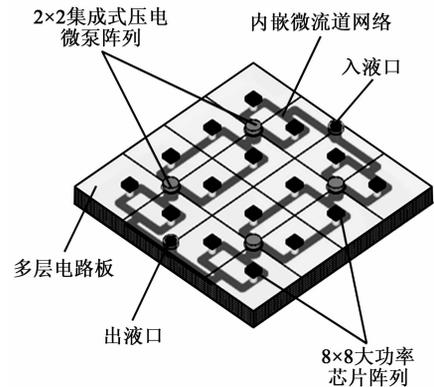


图3 集成微泵的“瓦片式”T/R组件微流道液冷散热示意图

根据图4所示搭建样机通过液冷试验测试进行原理验证,该试验样机具体包括集成内嵌微流道LTCC电路板、压电泵、储液箱与散热器。LTCC电路板上采用NXP Semiconductors公司的S波段LDMOS功率放大器(型号为BLP7G22-10),封装尺寸为 $6\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,封装类型为表贴塑封,热耗为 2.5 W ,该LTCC微流道基板典型尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,微流道横截面典型尺寸为 $0.4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。采用蒸馏水作为液冷工质,采用日东工器公司生产的压电泵(型号为UPS-112E),其最大工作流量为 36 mL/min (工作电压为AC 100 V),通过贴于放大器封装表面的高精度热电偶进行实时的温度监测。

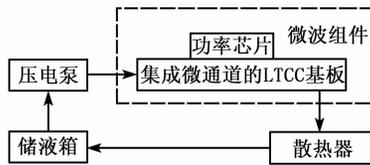


图4 基于压电泵示意图

在室温环境下,将微流道内部工质流量分别设置为 14 mL/min、20 mL/min、26 mL/min、32 mL/min 时,进行功率放大器表面温度随时间变化关系测试,并记录作图(见图 5)。由图可见,施加液冷前放大器表面温度为 85 °C,液冷启动后温度快速下降,并在 120 s 左右达到平衡;同时,增加工作流量会明显降低最终平衡时的温度,不过最终平衡温度与工作流量并非线性关系,随着工作流量的增加,最终平衡温度将会达到一个极值,如工作流量从 14 mL/min 提高至 20 mL/min 使得最终平衡温度温降为 8 °C,而同样为 6 mL 的流量增量从 20 mL/min 提高至 26 mL/min 所产生的最终平衡温度温降为 3 °C,即通过增加工作流量获得的温降收益是递减的。此外,当工作流量为 32 mL/min 时放大器表面温度可降低至 45 °C,即采用该技术热源表面温降可实现 40 °C。

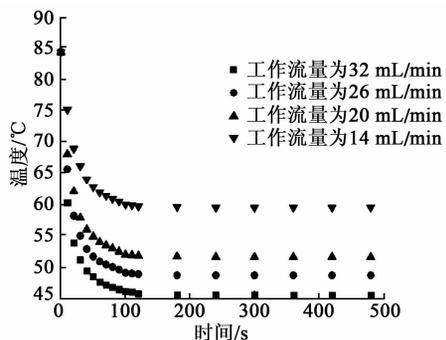


图5 温度随时间变化测试曲线

5 结束语

国外在微系统热管理技术项目完成一系列强有力的部署与技术,基于热传导与微流体液冷技术的微系统热管理方法已得到广泛研究,并取得了突破性进展。但在结合微泵、微阀、微流道及散热器一体化微系统热管理技术研究方面仍处于概念阶段,对此本文也提出了一种基于压电驱动的主动微系统热管理方法,并通过搭建试验样机完成原理性测试验证。通过进一步地研究,该技术可用于解决如微波毫米波大功率“瓦片式”T/R(收发)组件等射频微系统的高效一体化热管理问题。

参考文献:

- [1] KING C R, ZAVERI J, BAKIR M S, et al. Electrical and fluidic C4 interconnections for inter-layer liquid cooling of 3D ICs[C]//Las Vegas, NV, USA: Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010 Proceedings 60th IEEE, 2010: 1674-1681.
- [2] OSHMAN C, LI Q, LIEW L A, et al. Thermal performance of a flat polymer heat pipe heat spreader under high acceleration[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(4): 045018.
- [3] MIAO M, JIN Y, GAN H, et al. Investigation of a unified LTCC-based micromachining and packaging platform for high density/multifunctional microsystem integration[C]//San Diego, CA, USA: Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012 IEEE 62nd IEEE, 2012: 377-384.
- [4] CASTILLO L D, HOFFMAN J P, BIRUR G, et al. Robust, reworkable thermal electronic packaging: Applications in high power TR modules for space[C]//Big Sky, MT, USA: Proceedings of the 2013 IEEE Aerospace Conference, 2013.
- [5] PIOTROWICZ S, JARDEL O, JACQUET J C, et al. 160W InAlN/GaN HEMTs amplifier at 2 GHz with optimized thermal management [C]//La Jolla, CA, USA: Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2012 IEEE, 2012: 1-4.
- [6] YAN Z, LIU G, KHAN J M, et al. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors[J]. Nature Communications, 2012, 3: 827.
- [7] MARGOMENOS A, MICOVIC M, KURDOGH-LIAN A, et al. X band highly efficient GaN power amplifier utilizing built-in electroformed heat sinks for advanced thermal management [C]//Seattle, WA, USA: Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International IEEE, 2013: 1-4.
- [8] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [9] ALTMAN D H, GUPTA A, TYHACH M. Development of a diamond microfluidics-based intra-chip cooling technology for GaN[C]//San Francisco, California, USA: ASME InterPACK, 2015.
- [10] GAMBIN V, POUST B, WATANABE M, et al. Impingement cooled embedded diamond (ICED) GaN HEMTs[C]//San Francisco, California, USA: ASME InterPACK, 2015.
- [11] DITRI J, HAHN J, CADOTTE R, et al. Embedded cooling of high heat flux electronics utilizing distributed microfluidic impingement jets[C]//San Francisco, California, USA: ASME InterPACK, 2015.