

# 分流式微通道热沉强化传热性能数值分析

唐巍, 孙立成, 刘洪涛, 谢果, 唐继国, 鲍静静

(四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 成都 610065)

**【摘要】**分流式微通道热沉MMHS与一般的微通道热沉MHS相比具有更强的传热能力及散热均匀性,在电子芯片等高发热设备冷却方面具有优势。该文通过数值方法模拟了MHS与MMHS单个肋通道内的换热过程,对比分析了两者在总体换热能力及散热均匀性方面的差异。结果表明,入口流量在0.57~2.87 kg/h范围时,MMHS微通道平均换热系数比MHS提高1倍以上,同时散热均匀性提高52%以上;MMHS具有的多进口多出口的几何结构和流动过程是MMHS综合换热性能大幅提升的主要原因。

**关键词** 芯片散热; 散热均匀性; 分流式微通道热沉; 微通道热沉

**中图分类号** TK5 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.06.010

## A Numerical Analysis of the Enhanced Performance in Heat Transfer of a Manifold Micro-Channel Heat Sink

TANG Wei, SUN Li-cheng, LIU Hong-tao, XIE Guo, TANG Ji-guo, and BAO Jing-jing

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource&Hydropower, Sichuan University Chengdu 610065)

**Abstract** Manifold micro-channel heat sink (MMHS) has a better heat transfer capacity and uniformity compared with the conventional micro-channel heat sink (MHS), showing a great potential in cooling equipments with high heat generation rate like electronic chips. A numerical simulation work was carried out on heat transfer process in a single unit of MHS and MMHS. For the mass flow rate covering 0.57~2.87 kg/h, averaged heat transfer coefficient of the MMHS is enhanced over 100% and the heat dissipation uniformity is increased 52% compared with the MHS. The multiple inlets and outlets in the MMHS contribute a lot to the improvement of heat transfer performance.

**Key words** chip cooling; heat dissipation uniformity; manifold micro-channel heat sink; micro-channel heat sink

半导体工业的高速发展在迅速提高电子芯片晶体管密度与运算能力的同时,也导致电子芯片释热强度的大幅增加,这要求芯片冷却装置具有更强的散热能力,才能保证芯片的正常工作。目前,冷却系统换热能力不足<sup>[1-4]</sup>已经成为集成电路技术进一步发展的主要瓶颈之一。另一方面,电子系统往往空间狭小,要求芯片冷却装置结构紧凑、布置灵活。微通道热沉(MHS)主要由大量微通道组成,增加了换热面积,从而使其具有很强的换热能力,但散热均匀性差且流动阻力大也是其固有缺点<sup>[5-6]</sup>。

分流式微通道热沉(MMHS)在微通道上增加了分流道结构。文献[7]首次提出MMHS结构,MMHS将微通道内工质由单一进出口的流动改变为多进口和多出口的流动过程,在提高换热能力和换热均匀

性的同时,还减少了工质的流动阻力<sup>[7-9]</sup>。文献[8]通过计算分析发现MMHS微通道入口处换热能力最强,微通道底面受冷却工质冲击处及微通道出口也有很强的强化传热效应。文献[9]认为MMHS的强化换热能力与微通道内较大的速度梯度及产生的流体漩涡有关,同时也指出分流通道向微通道内的分流过程存在流量分配不均现象。已有一些研究者对MMHS与MHS的换热性能做了对比,文献[10-11]分别通过实验对比发现,MMHS总体热阻比MHS低约30%~35%。

近年来关于MMHS的研究多以结构优化及改进为主<sup>[12-14]</sup>,这些措施使MMHS具备了更好的散热能力与散热均匀性。文献[12]通过结构优化引导更多冷却流体分配到MMHS中热负荷较高的区域,同时该

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51376052); 国家自然科学基金青年科学基金(51606130, 51506099)

作者简介: 唐巍(1988-),男,博士生,主要从事芯片热管理方面的研究。

区域的微通道尺度更小、数量更多, 从而可获得更大换热面积。文献[13]将MMHS的分流道分割成多个相对独立的单元, 使冷却流体多次流入、流出这分流通道, 提高了冷却流体的换热效率, 进一步起到强化换热的作用。文献[14]针对一种具有自相似结构的分流式微通道热沉 (self-similarity micro-channel heat sink, SSHS), 提出了结构改进方案, 通过采用渐缩式分流通道结构, 解决了SSHS内流量分配和换热不均的问题。

鉴于MMHS在换热方面的优越性和当前研究的不足, 本文通过分析MMHS一个单元内的换热过程, 分析其传热特点以及MHS之间的差异, 为MMHS的设计和开发提供参考。

## 1 数值模拟条件及参数设置

### 1.1 计算几何模型

图1为MHS和MMHS的结构示意图, 为了对比MHS与MMHS换热过程的差异, 分别从2个整体结构中各截取了一个完整的肋通道单元, 对模拟计算的结果进行对比分析, 单元模型及对应尺寸如图2所示。MMHS的单元模型还包含分流道。为保证进入MHS微通道及MMHS分流道中的流体充分发展, 同时消除进出口段效应, 单元模型进出口分别加长约5倍进出口水力直径。

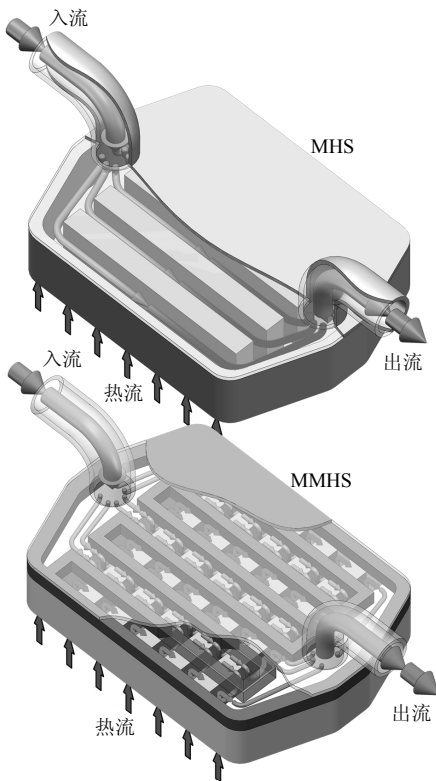


图1 MHS与MMHS整体结构及内部流动

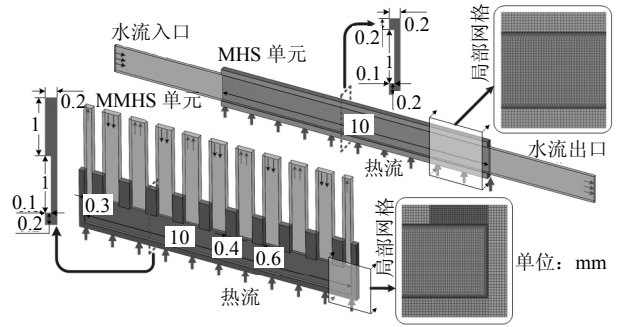


图2 计算模型及网格

### 1.2 计算模型及假设条件

数值模拟采用ANSYS16.0中FLUENT模块。由于流动参数范围内微通道内的雷诺数均小于1 000, 计算采用层流模型。冷却工质为水, 其粘度由式(1)计算为:

$$\mu = 4.07 \times 10^{-2} - 2.98 \times 10^{-4} T + 7.32 \times 10^{-7} T^2 - 5.98 \times 10^{-10} T^3 \quad (1)$$

式中,  $\mu$ 为粘度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$ 为水温, 单位为K。MMHS与MHS的固体材料为硅。计算中做如下假设: 1) 流体不可压缩; 2) 不考虑重力影响; 3) 固体物性为常物性。

### 1.3 边界条件及计算工况

流体入口设为质量流入口边界条件, 入流温度为308.15 K。对于MHS与MMHS, 均计算5组流量, 分别为0.37 kg/h、0.74 kg/h、1.12 kg/h、1.49 kg/h和1.86 kg/h。MMHS各分流通道入口流量之和与MHS对应工况入口流量相同。流体出口设为自由出流边界条件。单元模型两侧面设为对称边界条件。加热面上加入 $150 \text{ W/cm}^2$ 的恒定热流, 其余按默认固壁面处理。

### 1.4 计算模型验证及网格无关性验证

本文对微通道中靠近壁面的水体区域进行了网格加密, 计算域网格划分如图2所示。MHS及MMHS单元模型网格无关性验证表明: 当MHS和MMHS网格数量分别达到75 w和120 w之后, 继续增加网格数量, 两者的进出口压降变化不大, 在之后的模拟计算中, 针对MHS和MMHS分别采用上述网格数量计算。为了进一步验证本文采用的数值计算方法的准确性, 采用与文献[11]相同的尺寸结构模型, 利用此方法进行了模拟计算, 并与其计算结果进行了对比。对比结果如图3所示, 两者在不同流量下模拟得到的流动阻力压降和加热表面温升均很接近, 本文计算方法的准确性和可靠性得以验证。另外, 本文数值

模拟方法与文献[14]中关于SSHS的研究采用的方法相近。同时,前述工作通过比较文献[15]的模拟结果以及实验测试结果,也验证了数值方法的准确性和可靠性。

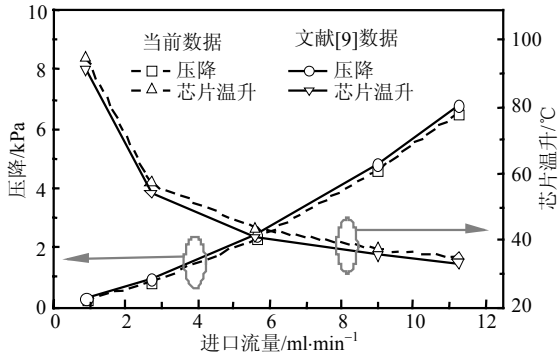
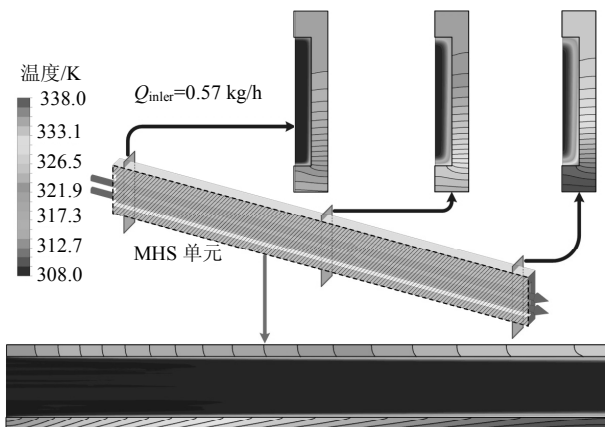


图3 计算方法验证

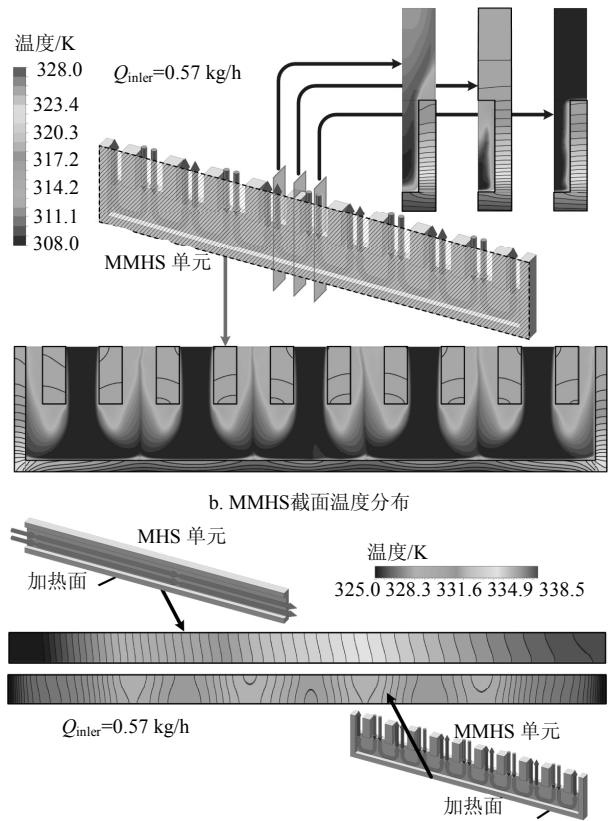
## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 换热性能对比

图4为进口流量为0.57 kg/h时MHS与MMHS换热单元上中下游3个位置横截面及微通道加热面的温度分布情况。图4中 $Q_{inlet}$ 为进口流量,对于MMHS, $Q_{inlet}$ 为各入口总流量。从图4a可以看出,MHS单元通道内工质沿流动方向不断被加热,换热主要发生于微通道内壁面附近;随着水温逐渐升高,换热强度逐渐下降,引起MHS固体导热部分温度逐渐升高。从图4b可以看出,MMHS换热单元固体温度分布均匀性相比MHS有显著提高,加热面最高温度降低了10 K以上。图4c进一步给出了两者在加热通道底部外壁面的温度分布,MHS单元温度由324 K变换至最高温度339 K,高低温差15 K;MMHS加热面最高温度仅为328 K,高低温差只有4 K。



a. MHS截面温度分布



c. MHS与MMHS加热面温度分布

图4 换热单元温度分布云图

图5进一步给出了流量在0.57~2.87 kg/h范围内时,MHS与MMHS的加热底面最高温度与高低温差变化情况。相同流量下,两者最低温度几乎相同,但MMHS的加热面最高温度比MHS低5 K以上。虽然随着流量的加大,MMHS强化换热的显著性有所降低,但依然将加热面温差降低了50%以上,说明MMHS的几何结构在改善传热过程方面起到了决定性作用。

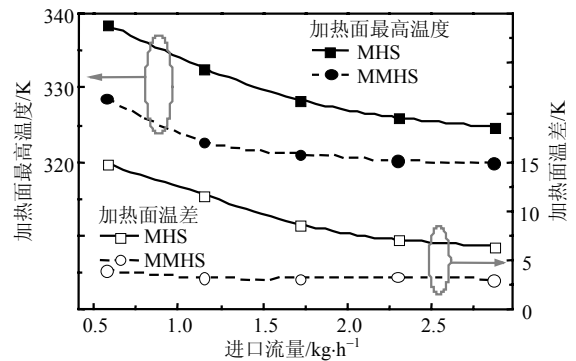


图5 不同流量下MHS与MMHS加热面温度

### 2.2 MMHS强化换热机理分析

图6给出了入口流量为0.57 kg/h时MHS与MMHS换热单元内中心截面的速度云图,可以清晰地展示出MMHS换热单元的射流过程。对于MHS而

言, 通道工质的流动方向与加热面平行, 下游较厚的速度边界层不利于换热过程的强化。而对于MMHS, 由于分流通道的存在, 工质基本以垂直于加热面方向流动, 形成了一定的射流过程, 这势必会强化换热过程。一个微通道上方共有5个进口和5个出口, 因此, 相当于存在5个射流过程, 同时将整个通道分成了5个部分, 工质都以相同的入口温度进入微通道, 从而可以大大提高换热的均匀性。

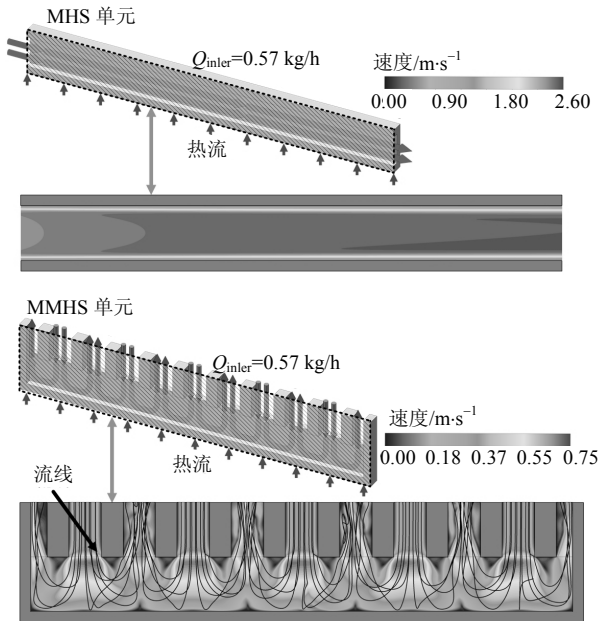


图6 MHS与MMHS单元通道内速度云图

综合上述分析, MMHS的强化换热过程和换热均匀性提高的原因可以概括为两个方面: 1) 通过分流通道, 将MHS工质单一进出口流动过程变为多个并行的进出口流动过程, 相当于将一个微通道分割成若干个部分; 2) 工质在由分流通道向微通道流动过程中, 形成了较强的射流过程, 使换热过程得到强化。

根据数值计算结果还能进一步得到局部换热系数, 其计算公式为:

$$h_1 = \frac{q_1}{(T_w - T_f)} \quad (2)$$

式中,  $h_1$ 为局部换热系数, 单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;  $q_1$ 为当地热流, 单位为 $W \cdot m^{-2}$ ;  $T_w$ 为当地壁面温度;  $T_f$ 为当地流体温度, 温度单位为K。图7给出了入口流量为0.57 kg/h时, MHS与MMHS换热单元局部换热系数。MHS换热单元入口位置, 由于入口段效应, 换热能力最强, 沿着流动方向, 其换热能力迅速降低, 局部换热系数下降幅度超过50%。对比MHS, MMHS换热微通道换热系数整体分布均匀, 局部传热系数最大, 达到 $7.9 \times 10^4 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ; 出口口对

应位置附近换热系数最小, 仅为 $1.8 \times 10^3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 。

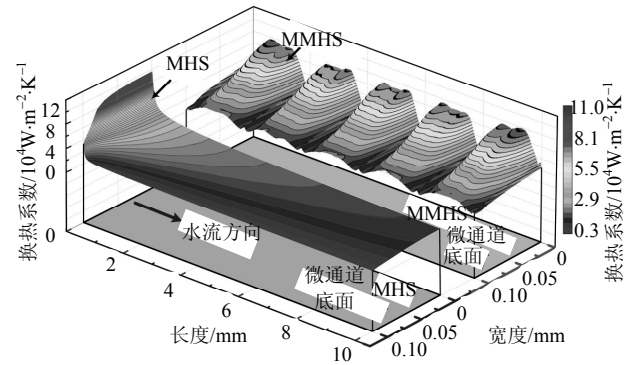


图7 MHS及MMHS微通道局部换热系数

图8给出了入口流量对MMHS与MHS平均换热系数的影响, 当进口流量在0.57~2.87 kg/h范围内时, MMHS平均换热系数显著高于MHS, 不同流量下均提高1倍以上。入流流量为1.15 kg/h时两者相差最大, MMHS平均换热系数比MHS高约173%。

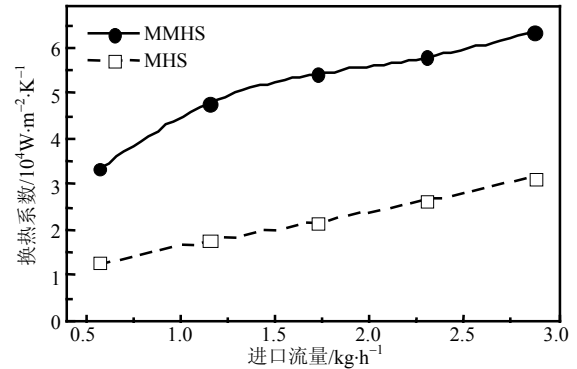


图8 不同流量下MHS与MMHS平均换热系数

### 3 结束语

本文利用数值计算方法对比了MHS和MMHS传热特性的差异, 给出了MMHS综合传热性能更好的原因, 并得到以下结论: 1) MMHS分流通道改变了原MHS微通道中冷却工质的流动过程, 形成了多进口—多出口的通道结构。2) 特殊的通道结构客观上造成了MMHS换热单元内一定的射流过程, 起到了强化传热作用, 在换热能力得到提高的同时, 换热均匀性也得到提高。3) 入口流量在0.57~2.87 kg/h范围内变化时, MMHS平均换热系数比MHS提高一倍以上, 散热均匀性比MHS提高了52%以上。

### 参考文献

[1] LIU Tsung-lin, PAN Chin. Infrared thermograph measurement of two-phase boiling flow heat transfer in a microchannel[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 568-578.  
 [2] CHAI Lei, XIA Guo-dong, WANG Hua-sheng. Numerical

- study of laminar flow and heat transfer in microchannel heat sink with offset ribs on sidewalls[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 92: 32-41.
- [3] 刘焕玲, 贾建援, 殷磊. 圆形微通道的对流换热特性研究[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(3): 476-480.  
LIU Huan-ling, JIA Jian-yuan, YIN Lei. Heat transfer in circular microchannel[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(3): 476-480.
- [4] XIA G D, MA D D, WANG W, et al. Effects of different structures and allocations on fluid flow and heat transfer performance in 3D-IC integrated micro-channel interlayer cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91: 1167-1175.
- [5] KLEIN D, HETSRONI G, MOSYAK A. Heat transfer characteristics of water and APG surfactant solution in a micro-channel heat sink[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, 31(4): 393-415.
- [6] HETSRONI G, MOSYAK A, SEGAL Z. Nonuniform temperature distribution in electronic devices cooled by flow in parallel microchannels[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, 24(1): 16-23.
- [7] HARPOLE G M, ENINGER J E. Micro-channel heat exchanger optimization[C]//*IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. [S.l.]: IEEE, 1991: 59-63.
- [8] COPELAND D, BEHNIA M, NAKAYAMA W. Manifold microchannel heat sinks: Isothermal analysis[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 1997, 20(2): 96-102.
- [9] BOTELER L, JANKOWSKI N, MCCLUSKEY P, et al. Numerical investigation and sensitivity analysis of manifold microchannel coolers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(25-26): 7698-7708.
- [10] KIM Y, CHUN W, KIM J, et al. Forced air cooling by using manifold microchannel heat sinks[J]. *KSME International Journal*, 1998, 12(4): 709-718.
- [11] JANKOWSKI N R, EVERHART L, MORGAN B, et al. Comparing microchannel technologies to minimize the thermal stack and improve thermal performance in hybrid electric vehicles [C]//*IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Arlington, USA: IEEE, 2007: 124-130.
- [12] SHARMA C S, SCHLOTTIG G, BRUNSCHWILER T, et al. A novel method of energy efficient hotspot-targeted embedded liquid cooling for electronics: An experimental study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 88: 684-694.
- [13] ARIE M A, SHOOSHTARI A H, DESSIATOUN S V, et al. Numerical modeling and thermal optimization of a single-phase flow manifold-microchannel plate heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 81: 478-489.
- [14] TANG Wei, SUN Li-cheng, LIU Hong-tao, et al. Improvement of flow distribution and heat transfer performance of a self-similarity heat sink with a modification to its structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 163-171.
- [15] KAMARUZAMAN N B, BRIGHENTI F, BRANDNER J J, et al. Prediction of micro surface cooler performance for different rectangular type micro-channel dimensions[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44: 644-651.

编辑 刘飞阳