

# 进出口方式对微小通道热沉性能的影响

潘 瑶 杨瑞琦 李 林 陈彬彬 杨金国 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要** 搭建微小通道热沉系统实验台, 分别测试了单进单出和两进两出方式的微小通道热沉的流动与传热特性。结果表明, 在相同体积流量和微小通道热沉结构的条件下, 单进单出热沉的传热系数高于两进两出热沉, 而压降低于后者。在相同耗功下, 单进单出热沉的传热系数明显高于两进两出热沉。同时, 单进单出热沉均温性优于两进两出热沉。故热沉进出口采用单进单出的方式性能更优。

**关键词** 单进单出; 两进两出; 微小通道热沉; 传热系数

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2014)05-0964-05

## Effects of Import and Export Structures on Mini-Channel Heat Sinks

PAN Yao YANG Riu-Qi LI Lin CHEN Bin-Bin YANG Jin-Guo LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Fluid flow and heat transfer processes in mini-channel heat sinks with single import and export or two imports and exports were analyzed with experiment. The result shows that the heat transfer coefficient of mini-channel heat sink with single import and export is larger, the pressure drop of mini-channel heat sink with two imports and exports is larger under the same mini-channel heat sinks structure and the same volume flow rate. Under the same power consumption, single import and export structure is helpful to improve heat transfer coefficient and Temperature uniformity. Therefore, single import and export is a better way for the mini-channel heat sinks.

**Key words** single import and export; two imports and exports; mini-channel; heat transfer coefficient

## 0 前 言

集成电路技术使得微电子领域在过去的几十年里得到了飞速地发展<sup>[1]</sup>。随着芯片集成度的提高和运算速度的加快, 芯片功率不断增加, 热流密度不断增大。然而, 电子芯片的可靠性和稳定性都依赖于它的工作温度。电子器件在高温时的失效率远大于其在低温时的失效率。因此, 亟需一种有效、稳定的电子器件冷却方式。

1981 年, Tuckerman 和 Pease<sup>[2]</sup> 提出了微通道热沉的概念, 并通过微加工技术在硅片上刻蚀出矩形微通道, 采用水作为实验工质。测得热沉在热流密度高达  $790 \text{ W/cm}^2$  时, 基板最高温度仅  $71^\circ\text{C}$ 。此后, 国内外众多学者对微通道热沉进行了研究与改进。

AKbari 等<sup>[3]</sup> 通过实验研究, 探讨工质在矩形微通道中压降分布。Bejan 等<sup>[4]</sup> 考虑分形结构形式, 首次研究了树状分形结构在电子器件冷却中的应用。洪芳军等<sup>[5]</sup> 采用微电子加工技术加工出硅基树形微

通道热沉, 采用水作为工质, 通过实验验证了数值计算结果, 证明了树形微通道热沉的性能优于平行微通道热沉。为了改进热沉温度均匀性, 提升换热效果, 学者们<sup>[6,7]</sup> 提出一种交错肋片结构的微通道热沉。同时, 也有研究人员<sup>[8]</sup> 通过改进机箱方案, 改善热沉的均温性。

热沉进出口布局影响着微通道热沉内的流量分配, 本文通过实验测试, 研究单进单出和两进两出方式对热沉传热与流动性能的影响。

## 1 实验介绍

### 1.1 实验热沉结构

实验中, 两微小通道热沉的制作材质选用紫铜, 长、宽、高分别为  $46 \text{ mm}$ 、 $26 \text{ mm}$ 、 $4.5 \text{ mm}$ , 边框为  $2 \text{ mm}$ , 热沉上下盖板厚为  $1.5 \text{ mm}$ 。其中 1 号微小通道热沉采用单进单出的进出口方式, 如图 1 所示。热

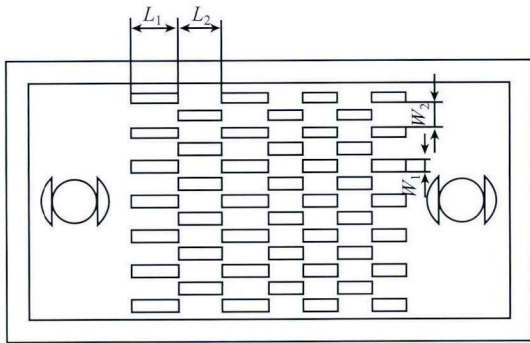
收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51036003); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2013CB228302); 教育部博士点基金资助项目 (No.20100142110037)

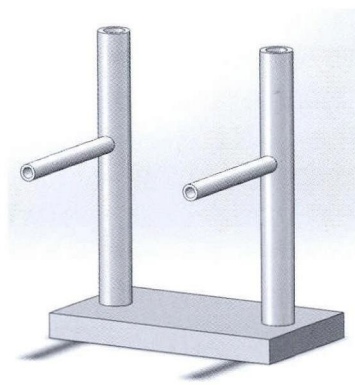
作者简介: 潘 瑶 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事航天器热控技术, 高热流密度电子器件散热方面的研究。通信作者: 杨金国, 高级工程师, jgyang@hust.edu.cn.

沉进出口相距 34 mm, 居中布置, 与外径 6 mm, 内径 4 mm 的不锈钢管相连。为使热沉内工质流动更均匀, 将入口和出口的不锈钢管沿热沉宽度方向切一豁口, 使入口工质经过该豁口分流后, 沿热沉宽度方向分布更均匀, 同时只能从两侧进入出口管道, 加强了出口附近扰动。进出口管距离热沉上表面 30 mm 处钻有测压孔, 用于测量微小通道热沉进出口压差。

肋片长为  $L_1$ , 长度方向间距为  $L_2$ , 肋宽为  $W_1$ , 宽度方向间距为  $W_2$ 。且  $L_1 = L_2$ , 具体尺寸见表 1。



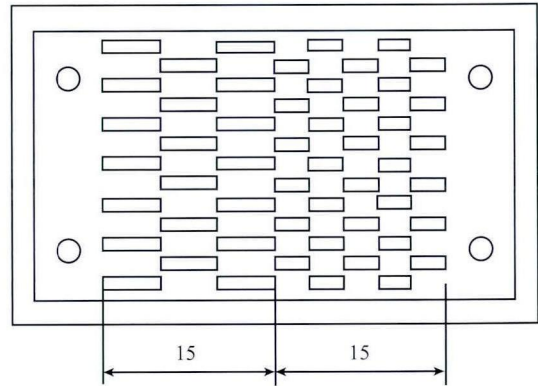
(a) 热沉内部结构示意图



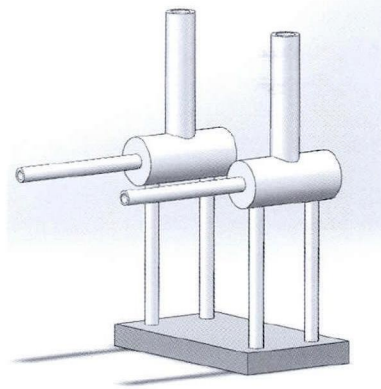
(b) 热沉整体示意图

图 1 1 号微小通道热沉

Fig. 1 Schematic diagram of No.1 mini-channel heat sink



(a) 热沉内部结构示意图



(b) 热沉整体示意图

图 2 2 号微小通道热沉

Fig. 2 Schematic diagram of No.2 mini-channel heat sink

表 1 实验微小通道热沉几何尺寸

Table 1 Dimensions of mini-channel heat sink in experiment

微小通道热沉	$L_1/mm$	$W_1/mm$	$h/mm$	$L_2/mm$	$W_2/mm$
1 号热沉	4、3	1	1.5	4、3	2.2
2 号热沉	5、3	1	1.5	5、3	2.2

2 号微小通道热沉进出口方式为两进两出, 进口与出口之间相距 36 mm, 两进口之间和出口之间各相距 14 mm。两外径 3 mm, 内径 2 mm 的不锈钢管与热沉连接后, 通过设计的三通接头与外径 6 mm, 内径 4 mm 的不锈钢管相连, 如图 2 所示。测压孔位于三通接头中间, 与热沉上表面相距 30 mm。

由于两热沉进出口方式不同, 导致热沉内肋片区域大小有所差异。1 号热沉由于进出口管径较大, 肋片区域有所压缩, 分布于热沉流体区中间长 24 mm 区域。2 号热沉进出口管径较小, 肋片区域较大, 分布于热沉流体区中间长 30 mm 区域。两热沉肋片均为前疏后密交错排布的直肋, 其中肋高为  $h$ ,

### 1.2 实验系统设计

搭建了微小通道热沉系统实验台, 测试热沉的流动与传热性能。该系统由微小通道热沉、加热器、微泵、储液器、散热器和连接管路共同构成, 如图 3 所示。微泵驱动系统中的工质流经微小通道热沉, 以对流换热的方式带走加热器产生的热量, 工质温度上升; 其后, 工质进入散热器与外界环境进行热交换, 工质温度降低; 最后, 工质回到储液器中, 在微泵的驱动下进入下一循环。热沉与加热器均采用

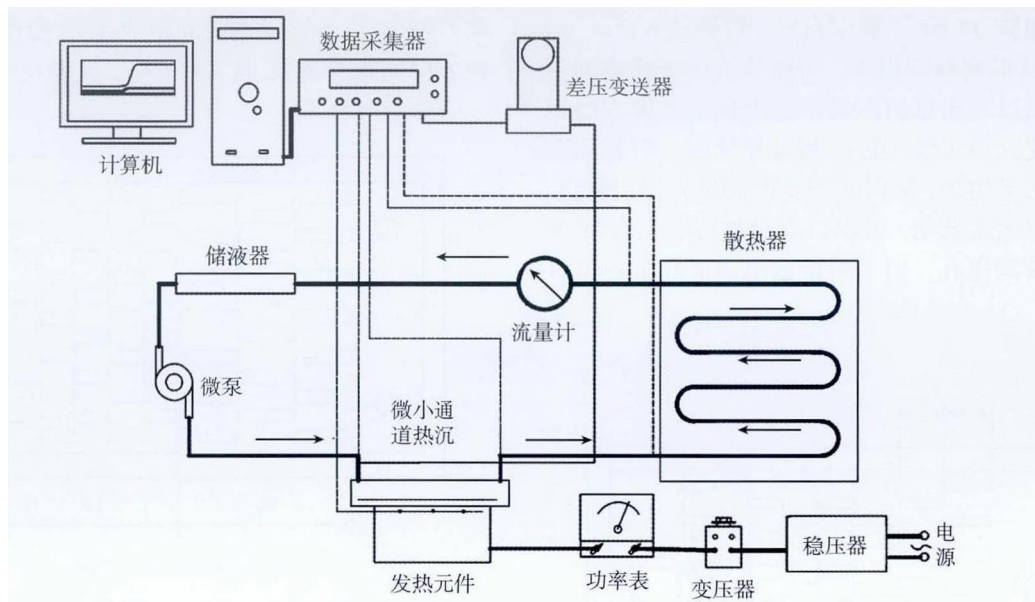


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

导热系数为  $0.012 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的纳米超效绝热材料包裹, 减少与环境的换热。

实验中温度测量采用 T 型热电偶, 测量热沉进出口、加热表面和散热器进出口的温度。压力测量采用差压变送器, 测量热沉进出口压差。温度和压力测量均通过数据采集仪 (Keithley2700) 实时采集, 导入计算机记录。系统流量采用浮子流量计测量, 同时采用称重法测量平均流量。加热器是由紫铜加工的加热块, 与热沉贴合的加热面面积为  $8 \text{ cm}^2$ , 通过变压器调节加热块的加热功率, 并通过接入功率表指示其功率大小。

## 2 实验结果分析

实验测试了两热沉在不同加热功率下, 各测点温度、热沉压降和传热系数随体积流量变化的关系。实验工质选用去离子水, 通过改变微泵转速, 调节系统中体积流量。在相同体积流量下, 热源功率由  $80 \text{ W}$  逐渐增加, 最高加热功率达  $240 \text{ W}$ 。

### 2.1 热沉压降分析

图 4 为两个微小通道热沉在不同加热功率下, 测得热沉压降随工质体积流量的变化关系, 图中  $\Delta p$  为热沉压降,  $Q$  为加热功率,  $Q_v$  为工质体积流量。从图 4 中可以看出, 两热沉的压降均随体积流量的增加而增加, 与文献 [9] 中的结果相似, 热沉压降的增幅也随体积流量的增加而增加。

同时, 在相同加热功率和体积流量下, 1 号热沉的热沉压降小于 2 号热沉。这是由于单进单出的进

出口方式相较于两进两出的进出口方式减少了进出口处的三通接头, 且 1 号热沉进出口管道面积比 2 号热沉增加了一倍, 管道流速减小了  $1/2$ , 有效减少了工质流动的局部损失和沿程损失。

对同一热沉, 在相同体积流量下, 加热功率越大, 热沉压降越小, 且加热功率对 2 号热沉压降的影响更明显。在体积流量  $Q_v=400 \text{ mL}/\text{min}$  时, 1 号热沉压降  $\Delta p$  分别为  $4998 \text{ Pa}$  (当  $Q=80 \text{ W}$ ) 和  $4922 \text{ Pa}$  (当  $Q=240 \text{ W}$ ), 降低了  $76 \text{ Pa}$ ; 2 号热沉压降  $\Delta p$  分别为  $5357 \text{ Pa}$  (当  $Q=80 \text{ W}$ ) 和  $5184 \text{ Pa}$  (当  $Q=240 \text{ W}$ ), 降低了  $173 \text{ Pa}$ 。这是因为工质黏度随温度升高而降低, 在相同体积流量下, 加热功率越大, 工质平均温度越高, 黏性越小, 热沉压降也随之减小。

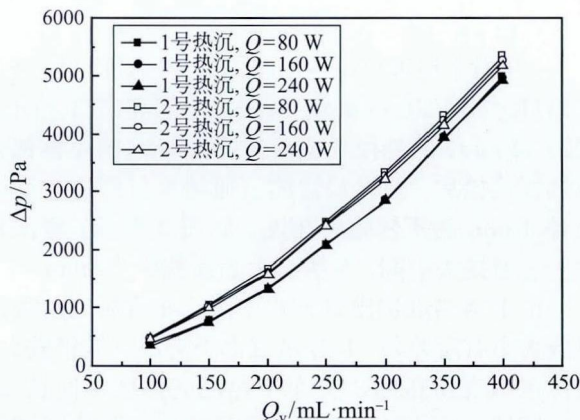


图 4 两热沉压降与工质体积流量和加热功率的关系

Fig. 4 Pressure drop of heat sinks varies with volume flow rate at different heating power

## 2.2 热沉传热系数分析

图 5 所示为不同加热功率下, 两个微小通道热沉的传热系数随体积流量的变化关系。热沉的传热系数  $k$  由下面公式定义:

$$Q' = C_p \rho Q_v (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$T_f = (T_{in} + T_{out})/2 \quad (2)$$

$$k = Q/[A(T_w - T_f)] \quad (3)$$

其中,  $T_{in}$  和  $T_{out}$  分别为热沉进出口的温度,  $C_p$  为工质比热容,  $\rho$  为工质密度,  $Q_v$  为体积流量,  $Q'$  为工质流过热沉带走的热量,  $A$  为热源面积,  $T_w$  为加热面平均温度,  $T_f$  为流体平均温度。

从图 5 中可以看出, 两热沉的传热系数在各加热功率下, 均随体积流量的增加而增大, 但其增幅随体积流量变化的规律与热沉压降增幅随体积流量变化的规律相反, 体积流量越大传热系数的增幅越小。

在不同加热功率和体积流量下, 1 号热沉的传热系数均大于 2 号热沉的传热系数, 且提升最高超过 13%。这是因为单进单出热沉在入口处设置豁口, 使得工质从入口管道出流后向热沉两侧流动, 而流出热沉时, 工质需从两侧流进出口管道。如此, 有效增强了热沉进出口附近的扰动, 有利于增强换热。

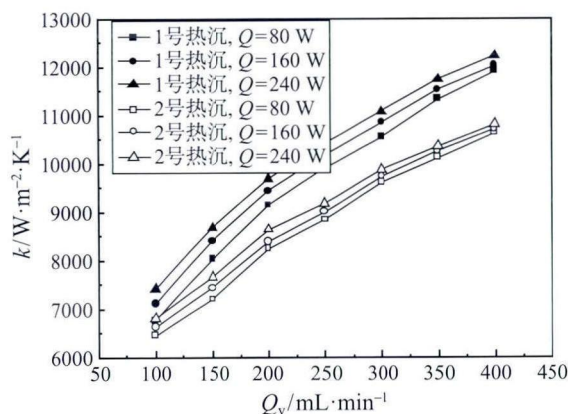


图 5 两热沉传热系数与工质体积流量和加热功率的关系  
Fig. 5 Heat transfer coefficient of heat sinks varies with volume flow rate at different heating power

## 2.3 同功率下传热系数比较

图 6 对比了在加热功率为 160 W 时, 两热沉的传热系数随热沉功耗的变化关系。其中热沉功耗  $P_{sink}$  由下式定义:

$$P_{sink} = Q_v \Delta p \quad (4)$$

从图 6 中可以看出, 两热沉的传热系数均随热沉功耗的增加而增加, 且在热沉功耗超过 0.05 W 后, 传热系数随热沉功耗增加的幅度明显降低。所以, 单纯通过增加热沉功耗, 对热沉传热性能的提高帮助有限, 此时, 需要通过优化热沉结构来实现热沉传热性能的提高。

在相同的热沉功耗下, 1 号热沉的传热系数明显高于 2 号热沉, 提升达 10% 左右。这是由于在相同体积流量下, 1 号热沉的传热系数较高而压降较低, 所以使得 1 号热沉的综合性能优于 2 号热沉。而且 1 号热沉采用单进单出的进出口方式, 加工工艺更简单, 焊点更少, 使用范围更广。

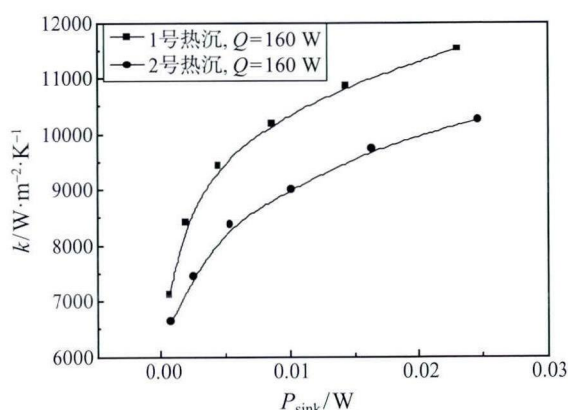


图 6 两热沉传热系数与热沉功耗的关系  
Fig. 6 Heat transfer coefficient of heat sinks varies with power consumption

## 2.4 均温性分析

在实验测试中, 为检测加热面的温度均匀性, 在加热面布置有 8 个测温点, 分别为 TC1~TC8。定义加热面温度测量值与加热面平均温度之差为:

$$\Delta T_w = T_{TCi} - T_w \quad (5)$$

其中,  $T_{TCi}$  为加热面各测点的测量值 ( $i = 1 \sim 8$ ),  $T_w$  为加热面平均温度。该温差可以表示加热面各处温度偏离平均值的程度, 反映加热面的温度均匀性。

图 7(a)、(b) 比较了加热功率为 240 W 时, 不同体积流量下, 分别采用 1 号热沉和 2 号热沉冷却的加热面, 其温度测量值与平均值之差。图 7 中曲线  $\Delta T_w = 0^\circ\text{C}$  代表加热面平均温度, 发现温差随着体积流量的减小而增大。当体积流量从 400 mL/min 减小至 100 mL/min 时, 1 号热沉加热面的最大温差绝对值由  $2.4^\circ\text{C}$  增加到  $3.2^\circ\text{C}$ , 其加热面最高温与最低温的差值由  $3.8^\circ\text{C}$  增至  $5.0^\circ\text{C}$ ; 2 号热沉加热面的最大温差绝对值由  $3.0^\circ\text{C}$  增加到  $3.9^\circ\text{C}$ , 其加热面最

高温与最低温的差值也由  $4.5^{\circ}\text{C}$  增至  $6.3^{\circ}\text{C}$ 。

从图7中可以看出1号热沉的均温性优于2号热沉,虽然1号热沉为单进单出,但入口处设置的豁口有助于热沉内流体分配,使工质在热沉内流动更均匀。

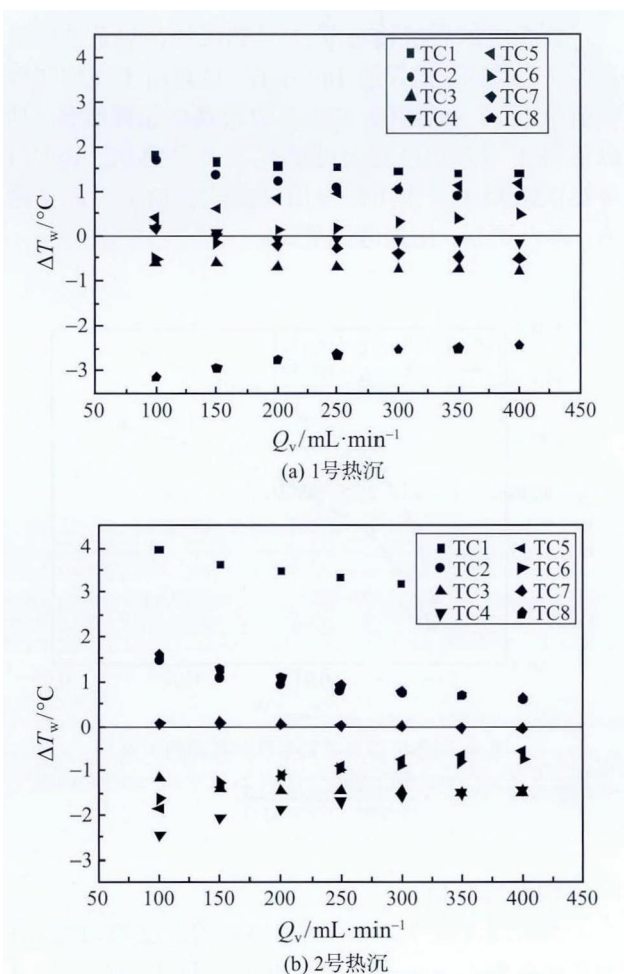


图7 不同体积流量下,加热面温度测量值与平均值之差

Fig. 7 The different between the mean and temperature measurement of heating surface varies with volume flow rate

### 3 结论

本文搭建微小通道热沉系统性能测试实验台,测试了单进单出和两进两出方式的微小通道热沉的流动与传热性能。结果表明,采用单进单出方式的热沉在相同体积流量下,传热效果更好,热沉压降

更小。在加热功率和热沉耗功一定的情况下,单进单出热沉的传热系数明显高于两进两出热沉的传热系数,且单进单出热沉的均温性优于两进两出热沉。因此,加工工艺更简单的单进单出热沉相较于两进两出热沉具有更好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 王兆安, 陈桥梁. 集成化是电力电子技术发展的趋势 [J]. 变频技术与电力牵引, 2006(1): 2-6  
Wang Zhaoan, Chen Qiaoliang. Integration is the Trend of Power Electronics [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2006(1): 2-6
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-Performance Heat Sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Lett, 1981(2): 126-129
- [3] Akbari M, Sinton D, Bahrami M. Pressure Drop in Rectangular Microchannels as Compared With Theory Based on Arbitrary Cross Section [J]. Journal of Fluids Engineering, 2009(131): 041202-1-8
- [4] Bejan A, Errera M R. Deterministic Tree Network for Fluid Flow: Geometry for Minimal Flow Resistance Between a Volume and One Point [J]. Fractals, 1997, 5(4): 685-695
- [5] 洪芳军, 郑平, 常欧亮, 吴晟. 树形微通道网络芯片热沉的试验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(10): 1649-1653  
Hong Fangjun, Cheng Ping, Chang Ouliang, Wu Sheng. Experimental Study on a Tree-Shaped Microchannel Network Heat Sink for Microelectronic Cooling [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(10): 1649-1653
- [6] Kishimoto T, Sasaki S. Cooling Characteristics of Diamond-Shaped Interrupted Cooling Fins for High Power LSI Devices [J]. Electronics Letters, 1987, 23(9): 456-457
- [7] Li J, Peterson G P, Cheng P. Three-Dimensional Analysis of Heat Transfer in a Micro Heat Sink With Single Phase Flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 4215-4231
- [8] 陆规, 段远源, 王晓东. 联箱形式对微通道热沉流动与传热性能的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 345-354  
Lu Gui, Duan Yuanyuan, Wang Xiaodong. Effects of Manifold Designs on Flow and Thermal Performances of Microchannel Heat Sink [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(2): 345-354
- [9] 潘瑶, 李林, 陈彬彬, 等. 前疏后密叉排微通道热沉特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4): 733-737  
Pan Yao, Li Lin, Chen Binbin, et al. Research o Fluid Flow and Heat Transfer of Staggered Fin Mini-Channel Heat Sinks With Frontal Sparser and Rear Denser Arrangement [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(4): 733-737