

文章编号: 1003-9015(2010)04-0579-06

新型多孔微热沉流动与传热的耦合数值分析

万忠民^{1,2}, 刘伟², 陈焕新², 陈敏¹

(1. 湖南理工学院物理系, 湖南岳阳 414006;

2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 提出一种新型的多孔微热沉系统来实现高热流密度电子元器件封装散热的需求, 分析了多孔微热沉系统的工作原理和特点, 建立了微热沉金属壁面的传热以及多孔区域的流动与传热的耦合数学模型, 并用 SIMPLE 算法对其进行整场求解, 详细讨论了不同的热流、回流液入口速度以及进口位置对多孔微热沉传热性能的影响。数值计算结果表明, 多孔微热沉在高热流密度情况下, 加热表面能维持较低的温度水平。热流越大, 加热表面的温度就越高; 增加回流液体的入口速度可以明显的降低微热沉加热表面及底面的温度水平; 多孔微热沉的下进口方式能够减小散热表面温度的不均匀性。多孔微热沉系统能有效解决高热流密度电子元器件的散热问题, 提高器件可靠性与使用寿命。

关键词: 多孔微热沉; 多孔介质; 传热; 高热流密度; 散热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Conjugate Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer in a Novel Porous Micro Heat Sink

WAN Zhong-min^{1,2}, LIU Wei², CHEN Huan-xin², CHEN Min¹

(1. Department of Physics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A novel porous micro heat sink system was presented for dissipating the high heat flux of electronic devices, and the operational principle and characteristics of the micro heat sink were analyzed. A numerical model used to describe the liquid flow and heat transfer in the porous region and the heat transfer in the metallic wall for the micro heat sink was proposed and solved with SIMPLE algorithm as a conjugate problem. The influences of heat flux, inlet fluid velocity and inlet location of micro heat sink were discussed in detail. The numerical results show that the heated surface temperature of the porous micro heat sink is low at high heat flux, and the higher heat flux results in higher temperature of the heated surface. Increasing inlet fluid velocity could greatly decrease the temperature of the heated surface and bottom surface of the micro heat sink. The temperature of the heated surface could maintain good isothermal characteristic when inlet locates in the bottom of the micro heat sink. The micro heat sink has good cooling performance for electronic devices at high heat flux, and it can improve the reliability and working life of electronic devices. The numerical results obtained are useful for performance optimization and design of porous micro heat sink.

Key words: porous micro heat sink; porous medium; heat transfer; high heat fluxes; heat dissipation

1 前言

随着电子技术的迅猛发展, 电子器件的高频、高速以及集成电路的密集化和小型化以及 MEMS(Micro Electronic Mechanic System)技术的进步, 电子器件有效散热空间日趋减小, 甚至许多场合散热空间是封

收稿日期: 2009-01-10; 修订日期: 2009-05-05。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB206900); 国家自然科学基金资助项目(50774034); 中国博士后科学基金资助(20090451038); 湖南省教育厅优秀青年项目(09B041)。

作者简介: 万忠民(1977-), 男, 重庆人, 湖南理工学院副教授, 博士。通讯联系人: 万忠民, E-mail: zhongminwan@hotmail.com

闭或半封闭的,从而导致有效散热空间非常狭小而热流密度又非常高^[1,2],以微电子芯片为例,目前热流密度一般已经达到了 $10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,甚至高达 $2 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,因此器件内部产生的高热流对器件本身的可靠性和使用寿命造成了极大威胁^[3,4]。每个电子器件都有一个极限温度范围,一般为 $70\sim 80^\circ\text{C}$,超出此范围可靠性就会急剧恶化。研究表明,电子器件温度在极限水平上每增加 1°C ,可靠性就会下降 5%,寿命也会大幅度降低^[5]。电子器件温度水平过高可以导致器件失效,同时散热区域的温度变化和温度梯度较大时也会导致器件失效。常见的失效缺陷有:封装壳开裂、氧化膜开裂、内部分层、基板变形、侵蚀、界面失效等^[6]。统计研究表明由于温度过高和散热表面非等温性导致的器件失效在所有电子设备失效中所占的比例大于 50%,因而必须研究和开发新型的散热技术来满足高热流密度电子器件散热的需求。

对于电子器件的散热,主要有风冷,微通道热沉及半导体制冷技术。Marco L 等^[2]采用波纹形翅片热沉强迫风冷方式对高热流的电子元器件进行散热冷却; Jaeseon L 等^[7]采用微通道热沉对高热流密度电子器件进行散热研究,并且对其临界散热热流进行了评估; Chein R 等^[8]对半导体制冷技术在电子器件冷却上的运用进行了综合研究,并对其在高热流密度上散热上的优缺点进行了分析。对于风冷方式,由于换热系数很小,当基板导热系数、换热系数大于一定值后,单纯的改进基板的导热系数或强化基板换热,已不能满足高热流密度的需求。微通道热沉在高热流密度散热上有一定的优势,但是由于其会出现气堵、不稳定、加工困难以及造价昂贵等问题,使其在高热流密度封装上的运用有着较大的困难。热电制冷技术由于采用半导体的冷端来冷却电子器件,而临近的热端同样会涉及到热端高热流热量的冷却问题,同时这种技术要消耗很大的电能,因此这种技术并没有从根本上解决高热流密度有效散热问题。

本文首次提出一种基于多孔介质的微热沉系统来实现电子元器件高热流密度散热的需求,该系统由于采用多孔介质,有着较大的比表面积以及很高的局部传热系数,所以具有传热能力强以及散热效率高等优点;由于采用了联管,使系统能够解决受限空间或微细空间的散热问题;同时其结构简单,传热效率高,芯片的传热热阻小,因此非常适合高热流密度电子器件散热封装的要求。本文建立了多孔微热沉金属外壁的传热以及多孔芯和进出口的流动与传热的数学模型,并用 SIMPLE 算法进行耦合求解。研究表明,多孔微热沉系统能够很好地解决高热流密度电子器件的散热问题。

2 多孔微热沉系统的工作原理

图 1 所示为本文提出的多孔微热沉系统原理图,系统由多孔微热沉、冷却器、微泵以及联管组成,该平面结构易与电子器件进行封装。该冷却系统在封装和运行前,先要注入一定的液体(如水、甲醇、乙醇等)进入系统,将多孔芯放入密封腔体内形成多孔微热沉,其上表面与电子器件进行封装连结。其基本的工作原理:微泵启动后,推动液体通过微热沉的进口进入微热沉,液体通过多孔芯,电子器件内产生的高热流通过多孔芯传递给液体,此时液体迅速升温,在微泵的作用下升温的液体进入冷却器与外界环境进行热交换,导致液体的温度降低,低温液体重新进入微泵开始新一轮的循环,从而实现冷却系统的工作过程。图 2 所示为微热沉多孔芯处的传热原理图,热流通过金属壁传入多孔芯,此时回流液体进入多孔芯,多孔区域的固体骨架将热流通过对流方式传递给其内的液体工质,液体温度上升,流出多孔区域,从而将热流有效的带走,实现传热过程。

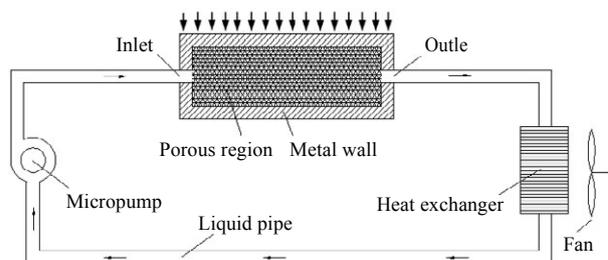


图 1 多孔微热沉系统示意图

Fig.1 Scheme of a porous micro heat sink system

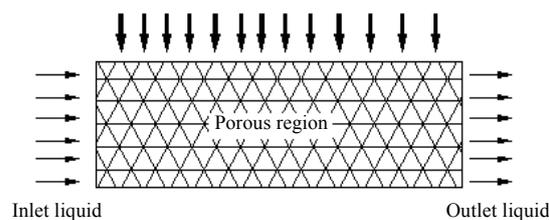


图 2 多孔芯传热示意图

Fig.2 Scheme of heat transfer in the porous region

多孔微热沉冷却系统用于电子器件散热时具有独特的优势。多孔微热沉的多孔芯采用网状的金属丝网或烧结的金属毛细芯组成, 其孔隙半径非常小, 其有效半径小到十几 μm , 甚至 $3 \mu\text{m}$ 以下^[9], 具有非常大的散热面积/体积比, 因此具有很大的局部对流换热系数, 热阻小, 传热能力强, 传热效率高, 可以解决高热流密度电子器件的散热需求。同时由于该冷却系统有着可以弯曲的液体联管, 因此冷却器位置可以任意布置, 即将热量引入到合适的位置进行冷却, 冷却器对位置的要求不苛刻, 可以解决受限空间或狭小空间内电子器件散热问题, 这一点对于电子器件的散热非常重要^[10]。

3 多孔微热沉的数学模型

3.1 控制方程

图3所示为多孔微热沉的结构示意图, 图中可见多孔微热沉主要由多孔芯、金属外壁以及进出口组成, 以多孔微热沉的左下角为坐标原点对各部分建立控制方程。

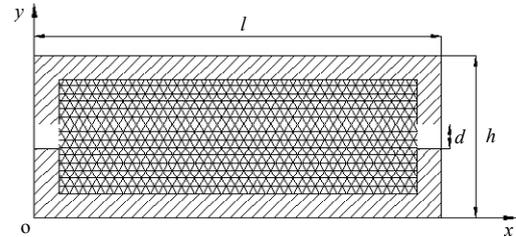


图3 多孔微热沉的计算模型

Fig.3 Computational model of porous micro heat sink

对金属外壁建立如下的控制方程:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (1)$$

在建立多孔区域数学模型时, 提出如下假设: (1) 多孔介质属刚性介质; (2) 毛细多孔芯处于局部热力学平衡态; (3) 忽略重力的影响。运用体积平均法, 根据Brinkman和Forchheimer对Darcy定律的修正理论, 建立如下控制方程:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial(\varepsilon \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{V}_f) = 0 \quad (2)$$

$$\text{动量方程} \quad \rho_f \frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} \nabla(\vec{V}_f \cdot \nabla) \vec{V}_f = -\nabla p - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{C |\vec{V}_f|}{\sqrt{K}} \right) \vec{V}_f + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V}_f \quad (3)$$

$$\text{能量方程} \quad (\rho c)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_f (\vec{V}_f \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \quad (4)$$

其中, $C = \frac{1.75}{\sqrt{150}} \varepsilon^{-3/2}$

对进出口区域建立如下的控制方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{V}_f) = 0 \quad (5)$$

$$\rho_f \frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \rho_f \nabla(\vec{V}_f \cdot \nabla) \vec{V}_f = -\nabla p + \mu_f \nabla^2 \vec{V}_f \quad (6)$$

$$\rho_f c_f \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_f (\vec{V}_f \cdot \nabla) T = k_f \nabla^2 T \quad (7)$$

3.2 边界条件

$x=0$, 进口区域: $u = u_0, v = 0, T = T_0$; 其它区域: $u = 0, v = 0, k_m \frac{\partial T}{\partial x} = h_a(T - T_a)$ 。

$x=l$, 出口区域: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$; 其它区域: $u = 0, v = 0, k_m \frac{\partial T}{\partial x} = h_a(T - T_a)$ 。

$y=0$: $u = 0, v = 0, k_m \frac{\partial T}{\partial y} = h_a(T - T_a)$ 。 $y=h$: $u = 0, v = 0, k_m \frac{\partial T}{\partial y} = q$ 。

式中, $k_{\text{eff}} = k_f \varepsilon + (1 - \varepsilon) k_s$, $(\rho c)_{\text{eff}} = (\rho c)_f \varepsilon + (1 - \varepsilon)(\rho c)_s$ 。

4 计算结果及讨论

本文采用SIMPLE算法对多孔微热沉的各个区域进行耦合求解^[11], 在数值计算中, 多孔微热沉的多

孔芯的尺寸： $l \times h = 11 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ， $d = 2 \text{ mm}$ ，多孔芯的厚度为3 mm，进出口位于中心处；循环液体工质选用水，其有关的参数为： $k_f = 0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ， $\mu_f = 6.2 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；考虑相容性问题，金属外壁采用铜， $k_m = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ；多孔芯采用铜材料，其孔隙率 $\varepsilon = 0.5$ ，渗透率 $K = 6.616 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ， $k_s = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。进口液体水温度为 30°C ，空气自然对流换热系数 $h_a = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

图4所示为液体入口流速 $u = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，不同的加热热流时，多孔微热沉内的温度分布，图中虚线表示流体的流动区域与金属壁的分界面。从图中可见，沿着流动方向，多孔微热沉的温度是降低的，在多

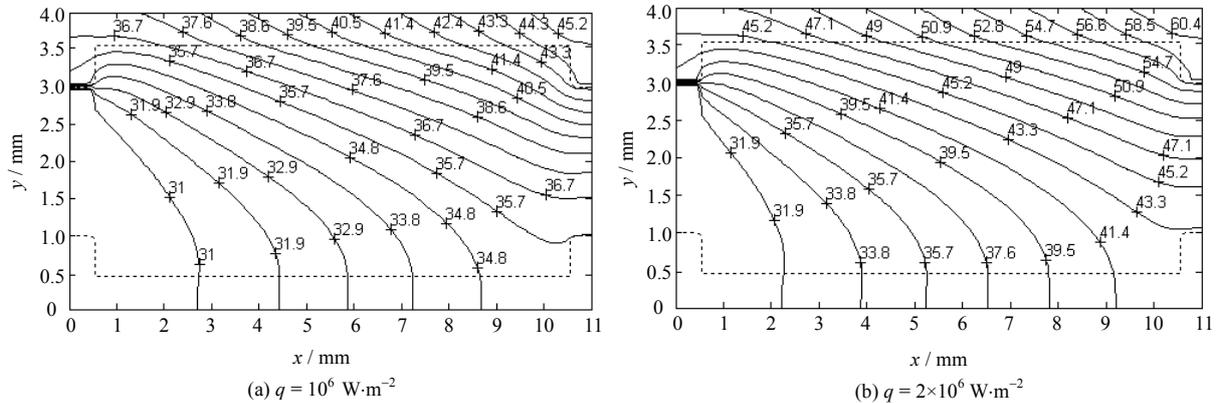


图4 不同热流时微热沉的温度场分布($u = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.4 Temperature fields in the porous micro heat sink($u = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

孔芯内部，温度梯度较均匀，在热沉的底部，温度分布较均匀，热流增大时，微热沉对应点的温度也随之升高。液体在出口处的温度较高，可知，多孔微热沉能通过液体的多孔芯内的热质交换有效地将电子器件散发的热量带走。影响电子器件性能的一个重要的参数就是热沉加热表面的温度水平，加热表面的温度水平若超过 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 将严重影响电子器件可靠性和使用寿命^[12]，采用多孔微热沉后，在高的加热热流 $q = 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时，加热表面的温度维持在较低的水平，最高温度低于 46°C ，即使在非常高的热流($q = 2 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)时，最高温度也低于 62°C ，可见多孔微热沉完全能实现电子器件的高热流密度，甚至超高热流密度散热的需求。

为了研究不同的回流液体流速对多孔微热沉性能的影响，图5所示为 $u = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时多孔微热沉的温度场分布。从图中可见，相对于图4(b)，增大回流液入口的流速可以有效地降低微热沉加热表面的温度，同时降低微热沉出口液体的温度。图6所示为不同的回流液体速度时微热沉的加热表面以及底部表面的温度分布。从图中可知，将速度从 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，微热沉加热

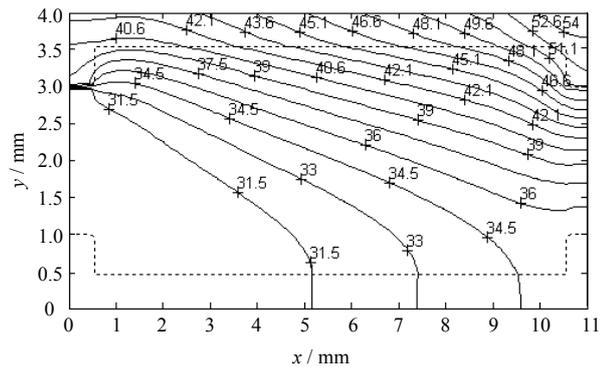


图5 微热沉的温度分布($u = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $q = 2 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig.5 Temperature field of porous micro heat sink ($u = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $q = 2 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

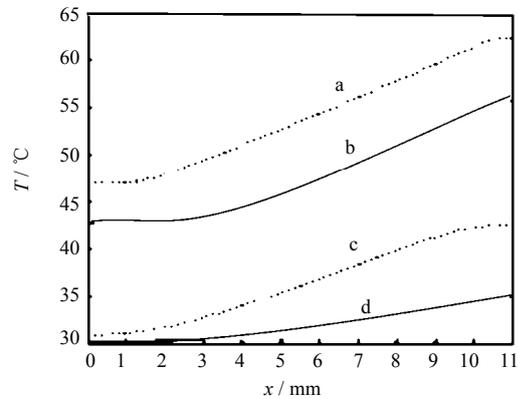


图6 不同流速时多孔微热沉不同表面的温度分布($q = 2 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig.6 Temperature distributions in different plane ($q = 2 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

a. $u = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，heated surface; b. $u = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，heated surface; c. $u = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，bottom surface; d. $u = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，bottom surface.

表面的温度沿 x 方向平均降低 5°C 以上, 加热表面的最高温度也从 62°C 降到 54.5°C ; 同时增大入流速度还可以较大地降低微热沉的底面温度水平, 其最大降低幅度达到 8°C 以上。因此, 提高回流液体的入口速度可以大大地降低微热沉加热表面以及底面的温度水平, 非常有利于高热流密度电子元器件的有效散热以及提高器件性能和使用寿命。

图7所示为不同的回流液进口位置时多孔微热沉的温度场分布, (a)所示为进口位于入口上部, (b)为进口位于入口下部。从图中可见, 进口位于上部时, 在上壁面区域相同位置处其温度水平低于进口位于下部时温度, 这主要是由于上部进口时入口液体能迅速的将热量带走, 而在下壁面区域相同位置处, 其

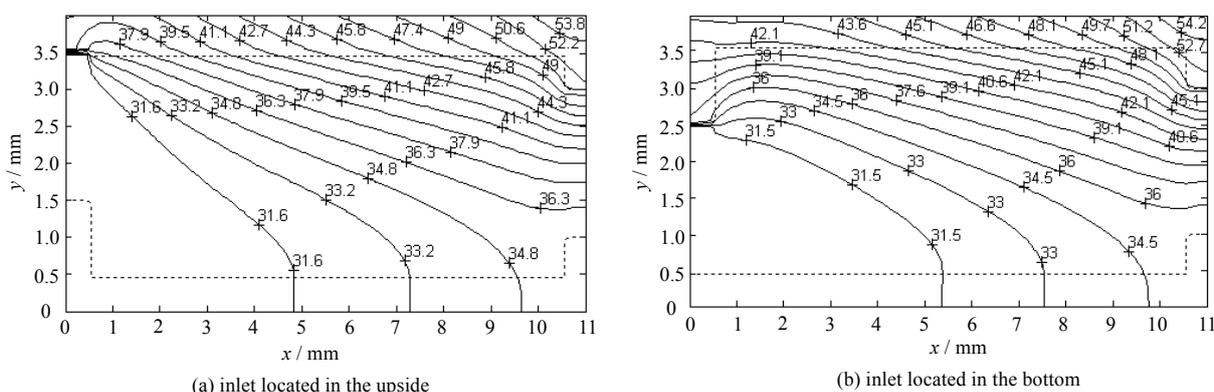


图7 不同进口位置微热沉内的温度场($u=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $q=2\times 10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig.7 Temperature fields in the porous micro heat sinks with different inlet locations ($u=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $q=2\times 10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)

温度却高于入口在下部时的情况。图8所示为不同进口位置时微热沉加热表面的温度分布, 从图中可见, 在微热沉的中下游处, 不同的入口位置对微热沉加热表面的温度影响较小, 而在上中游处, 进口位于下部时, 加热表面的温度水平最高, 进口位于中部时次之, 进口位于下部时最低, 可见, 进口位于上部区域对于降低电子元器件表面的温度水平是有利的。但是, 影响电子元器件性能和寿命除了加热表面的温度水平外, 还与加热表面的温度均匀性有关。在允许的温度水平范围内, 散热表面温度越均匀, 对于提高电子元器件的寿命和可靠性是非常有利的, 反之, 散热表面大的温度梯度容易降低器件的可靠性, 导致器件失效^[13]。从图8可见, 进口位于上部, 虽然能够在一定程度上减小加热表面温度, 但是其温度不均匀性最大, 温度的梯度最大, 进口位于中部时次之, 而进口位于下部时加热表面的最高温度增加得非常小, 最高温度在允许的范围, 温度变化最平缓, 波动较小, 温度的均匀性相对最好。因此, 多孔微热沉的下进口方式能够减小散热表面温度的不均匀性, 使其更加适合于高热流密度、超高热流密度电子元器件散热的需求。

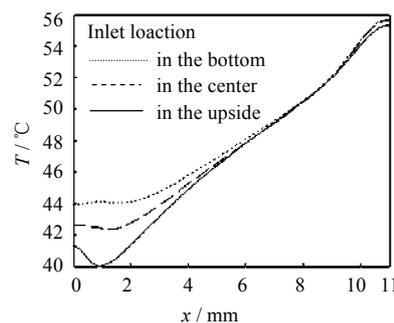


图8 不同进口位置微热沉加热表面的温度分布

Fig.8 Temperature distributions along heated surface for micro heat sinks with different inlet locations

5 结 论

本文提出了一种新型高效的多孔微热沉系统来解决电子元器件由于微型化以及高密集化所带来的高热流密度甚至超高热流密度散热的难题, 该系统具有传热能力大, 传热效率高以及散热灵活性强等优点。分析了多孔微热沉系统的工作原理, 建立了微热沉金属壁面的传热以及多孔区域的流动与传热的耦合数学模型, 并用SIMPLE算法对其进行整场求解。数值研究表明, 在加热热流 $q=1\times 10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 加热表面最高温度低于 46°C , 即使在 $q=2\times 10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 最高温度也低于 62°C 。增加多孔微热沉回流液体的入口速度可以明显的降低微热沉加热表面以及底面的温度水平, 将入口速度从 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

时,微热沉加热表面的温度平均降低 5°C 以上,在 $q=2\times 10^6\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,加热表面的最高温度也从 62°C 左右降到 54.5°C ;当回流液进口位于上部时,加热表面温度的不均匀性最大,进口位于中部时次之,而进口位于下部时加热表面的温度的最高温度增加得非常小,加热表面的最高温度在允许的范围内,温度的均匀性相对最好,多孔微热沉的下进口方式能够有效的减小散热表面温度的不均匀性,提高散热器件的可靠性。因此,新型多孔微热沉系统能有效解决高热流密度电子元器件的散热封装问题,提高器件性能和使用寿命。

符号说明:

C	— 比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	T_0	— 回流液体温度, $^{\circ}\text{C}$
h	— 高度, mm	u	— x 方向上的速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
h_a	— 空气的自然对流换热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	v	— y 方向上的速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
k	— 导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	\vec{v}	— 速度矢量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
k_{eff}	— 多孔介质有效导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	希腊字母	
K	— 流体的渗流参数, m^2	ε	— 孔隙率, %
l	— 微热沉的长度, mm	ρ	— 密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
p	— 压力, Pa	μ	— 流体的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
q	— 加热热流, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	下标	
t	— 时间, s	f	— 液相
T	— 温度, $^{\circ}\text{C}$	m	— 金属壁
T_a	— 环境温度, $^{\circ}\text{C}$	s	— 芯材

参考文献:

- [1] Sreekant N, Andrey T, Desikan B. Numerical simulations of nucleate boiling in impinging jets: Applications in power electronics cooling [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2008, 51(1): 1-12.
- [2] Marco L, Giampietro F, Sandro S. Performance evaluation of a wavy-fin heat sink for power electronics [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2007, 27(6): 969-975.
- [3] WU Xin-yu(吴信宇), WU Hui-ying(吴慧英), ZHENG Ping(郑平). Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in silicon chip microchannels(纳米流体在芯片微通道中的流动与换热特性) [J]. **J Chem Ind and Eng (China)**(化工学报), 2008, 59(9): 2181-2187.
- [4] Luo X B, Liu S. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs [J]. **IEEE Transactions on Advanced Packaging**, 2007, 30(3): 475-484.
- [5] Sydney M W, Sudipta B, Suresh V G. Piezoelectric fans using higher flexural modes for electronics cooling applications [J]. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, 2007, 30(1): 119-128.
- [6] Ryan J M, Roshan J, Song L. Integrated thermal management techniques for high power electronic devices [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2004, 24(8): 1143-1156.
- [7] Jaeseon L, Issam M. Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2009, 52(13): 3341-3352.
- [8] Chein R, Huang G M. Thermoelectric cooler application in electronic cooling [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2004, 24(15): 2207-2217.
- [9] WU Hong-wei(吴宏伟), TAO Zhi(陶智), CHEN Guo-hua(陈国华). Numerical study on conjugate heat and mass transfer process within porous media with dielectric cores during microwave freeze drying(具有电介质核心多孔介质微波冷冻干燥过程的耦合传热传质的数值研究). **J Chem Eng of Chinese Univ**(高校化学工程学报), 2005, 19(2): 181-186.
- [10] Ghajar M, Darahi J, Crews N. A hybrid CFD-mathematical model for simulation of a MEMS loop heat pipe for electronics cooling applications [J]. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 2005, 15(2): 313-321.
- [11] TAO Wen-quan(陶文铨). **Numerical Heat Transfer 2nd ed** (数值传热学) [M]. Xi'an(西安): Xi'an Jiao tong University Press(西安交通大学出版社), 2001.
- [12] Sahiti N, Durst F, Geremia P. Selection and optimization of pin cross-sections for electronics cooling [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2007, 27(1): 111-119.
- [13] Yuri S M. Influence coefficient method for calculating discrete heat source temperature on finite convectively cooled substrates [J]. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, 2006, 29(3): 636-643.