

树形微通道热沉仿生建模及三维热流特性数值分析

徐尚龙 郭宗坤 秦 杰 蔡奇或 胡广新 王伟杰
电子科技大学,成都,610054

摘要:对几种典型树叶进行参数测量,获得了各级叶脉直径、交角值及直径比例关系,在此基础上建立了树形微通道热沉的 CAD 模型,并对不同分形级数的双层微通道系统内的温度和流动特性分布进行了数值分析。结果表明,树形微通道具有更好的均温性,7 级分形的树形微通道与 6 级和 8 级分形的树形微通道相比,所冷却芯片的温度更低,压降更小,具有更好的冷却效果。

关键词:微通道;压降;传热;流动

中图分类号: TB131

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.09.010

Three Dimensional Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Tree-shaped Microchannels

Xu Shanglong Guo Zongkun Qin Jie Cai Qiyu Hu Guangxin Wang Weijie
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054

Abstract: The microstructures of several typical leaves were measured and analyzed to get the diameter, angle and diameter ratio for each levels of leaf vein. The CAD model and simulation of heat and flow in a two-layer dendritic microchannel network for chips cooling were conducted. The simulation results show that the temperature distribution is more uniform in the tree-like microchannel than that in the paralell microchannel. The temperature and pressure drop are lower in the tree-like microchannel with 7 level branches than that with 6 and 8 level branches.

Key words: microchannel; pressure drop; heat transfer; flow

0 引言

电子芯片的微小化和集成化给电子芯片的有效散热带来了巨大挑战,芯片级的热流密度超过 100 W/cm^2 ,风冷技术已无法满足散热要求^[1],自从 Tuckerman 等^[2]开创性地研究微通道散热技术以来,国内外开展了大量的生物仿生微通道结构的研究^[3-6]。如:文献[3]研究了树状分形结构在电子芯片冷却中的应用;文献[4-6]研究了分形微通道的换热性能、压降等特性并与平行微通道进行了比较。将三维仿生微通道热沉用于芯片散热可取得较好的结果,但这方面的研究较少。

本文通过测量树叶脉分布与参数,结合生物仿生学和现代 CAD 技术,进行芯片三维微通道结构仿生设计,进一步分析树形结构中各级分支的散热特性及微管内液流的流动性和传热特性,为开发高效散热的微通道散热器提供理论基础。

1 树叶脉显微实验分析

在光学显微镜下对收集的一定数量的几种树叶进行观察(图 1),并对树叶叶脉的尺寸形态进行分析,利用光学显微镜对各种树叶的微结构进行测量,并用相机对观测树叶进行拍照,将测量的数据在统计软件中进行处理,得到几种自然树叶的整个叶脉系统的管径、夹角等规律。光学显微镜的型号为奥林巴斯 bx51、放大倍率为 10 倍、图

收稿日期:2013-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176025)

[4] 王东屏. CFD 数值仿真建模技术的研究及其在高速动车组中的验证[D]. 大连:大连理工大学, 2006.

[5] 龚竹青. 理论电化学导论[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1988.

[6] 蔡铎昌. 电化学研究方法[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2005.

[7] Heinemen W R. Electroanalytical Chemistry[M]. New York: Marcel Dekker, 1984.

[8] 李荻. 电化学原理[M]. 北京:北京航空航天大学出

版社, 1989.

[9] 徐家文,云乃彰,王建业,等. 电化学加工技术——原理、工艺及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.

(编辑 苏卫国)

作者简介:王 颖,女,1985 年生。南京农业大学工学院博士研究生。主要研究方向为 CAD/CAM 在特种加工中的应用。
康 教,男,1965 年生。南京农业大学工学院教授、博士研究生导师。

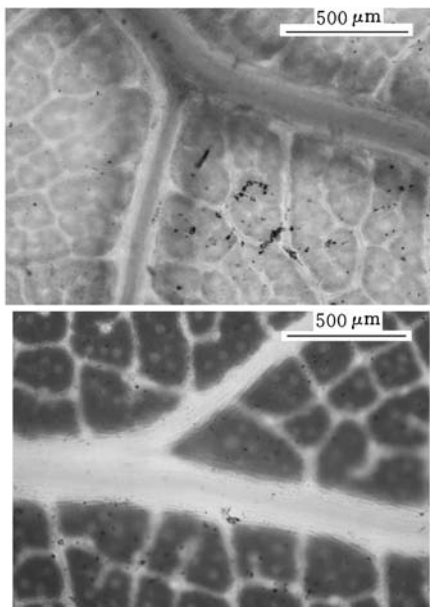


图 1 树叶脉络显微镜

像分辨率为 2040×1536。

从光学显微镜能够看清的树叶分叉处开始算起,即第一级,测量其直径、同级间的夹角,以及与下一级之间的夹角,下一级即为第二级,再移动光学显微镜的镜片,并再次调整显微镜的放大比例,然后调微距、对焦。从该级的根部开始测量以上的几何参数(为了尽可能地减小误差,使测得数据更接近于生物体微结构的实际值,多测几组数据,找出最大值与最小值,并求其平均值),逐级测量,并记下实验中所需要的几何参数。通过显微镜能够观察到的树叶叶脉直径和分叉角度,根据测量的数据,得出如下结论:①各叶子叶脉的每一级直径与上一级直径的比值大多数集中在 0.75~0.85 之间;②叶脉的夹角范围为 50°~75°,几种树叶的叶脉各级夹角基本上在同一个范围以内,且夹角平均值为 63°±12°。

2 树形微通道热沉仿生建模

利用叶子的分形尺寸测量得出角度的大概范围以及相邻各级直径之间的比例关系。根部(K=0)枝的当量直径 D_K 设为 0.667 mm,按照 0.8 比例向下分级,即第二级尺寸为 0.667×0.8 mm,第三级直径尺寸为 0.667×0.8² mm,第 n 级为 0.667×0.8ⁿ⁻¹ mm,为更好地适应芯片形状,本文将微管夹角假定为 90°,不直接采用树脉角度特征。

根据叶脉分形,本文提出了一种具有分形结构的三维微通道,如图 2 所示。该微通道具有上下两层,入口和出口微通道高 H_K 为 1 mm,宽 W_K 为 1 mm,高宽比为 1:1。入口位置在下层,而出

口位置在上层,从而保证了流体在微通道内的充分流动。每层各具有 m 级分支,即从第 0 级分支到第 m-1 级分支。各级分支微通道具有相同的深度,为 1 mm,下一分支的水力直径 D_{K+1} 和上一分支的水力直径 D_K 之间的关系为 $D_{K+1}/D_K = \alpha$ 。而各级长度 L_K 之间的关系为 $L_{K+1}/L_K = \beta_1 (K=0, 2, 4, \dots), L_{K+1}/L_K = \beta_2 (K=1, 3, 5, \dots)$ 。从第 0 级分支到第 6 级分支,每个微通道分为两个下一分支微通道,且夹角为 180°。最小分支微通道用与其高度和宽度相同的微通道上下连通,从而保证流体在上下两层微通道之间的流动,如图 3 所示。

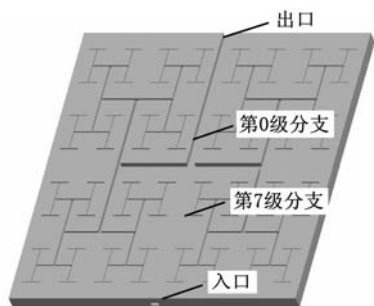


图 2 双层微通道结构示意图

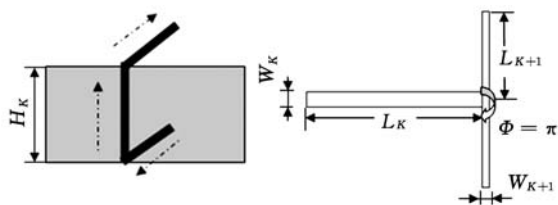


图 3 两级分支微通道的上下连通示意

树形微通道采用大小为 35 mm×35 mm 的硅片进行设计,根据树叶脉测量数据确定仿生微通道结构相关参数,其水力直径比 $\alpha = D_{K+1}/D_K = 0.8$,为了力求微通道均匀布置,取 $\beta_1 = 0.5, \beta_2 = 1$ 。为找出最合适的分形级数,分形级数 m 分别取 6、7、8。具体的微通道尺寸见表 1,分形级数 $m=6$ 的微通道尺寸取 0~5 级,分形级数 $m=7$ 的微通道尺寸取 0~6 级,分形级数 $m=8$ 的微通道尺寸取 0~7 级。

表 1 树形微通道的尺寸参数 mm

K	L_K	D_K	H_K	W_K
0	17.500	0.667	0.5	1.000
1	8.750	0.529	0.5	0.562
2	8.750	0.420	0.5	0.362
3	4.375	0.333	0.5	0.250
4	4.375	0.265	0.5	0.180
5	2.188	0.210	0.5	0.133
6	2.188	0.167	0.5	0.100
7	1.094	0.132	0.5	0.076

3 微通道热层热流特性数值分析

微通道散热主要是通过液体与热源进行热交换,由液体将热量带出芯片,流体的流动状态满足连续介质理论,液体假定为不可压缩流体。

所使用的热沉是在硅片上直接刻蚀的微通道结构,其热导率为 $150 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,芯片的功率为 30 W ,冷却液体进口初速为 1 m/s ,液体进口温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,出口压力为 $101\ 325 \text{ Pa}$ 。冷却液采用去离子水,其热物理特性参数如下:密度为 $103 \text{ kg}/\text{m}^3$,动力黏性系数为 $8.55 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,质量热容为 $4179 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,热导率为 $0.613 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

采用树形微通道散热器冷却芯片的分析结果如表 2 所示。分析结果显示,并不是级数越多,树形微通道的散热效果越好,在相同的边界条件下,7 级树形微通道的壁温低于 6 级和 8 级树形微通道的壁温,压降也低于 6 级和 8 级树形微通道的压降。因此,7 级分形的散热微通道具有更好的散热效果,且只需更低的泵送功率。

表 2 微通道分析结果

<i>m</i>	6	7	8
最高壁温($^\circ\text{C}$)	28.8	28.6	29.0
平均壁温($^\circ\text{C}$)	27.7	27.5	28.0
最低壁温($^\circ\text{C}$)	26.2	26.0	26.4
压降(Pa)	7497	4853	5900

为进一步研究微通道内液体的温度变化情况,对散热器的底层微通道内的液体节点温度进行了统计分析,各级微通道内液体平均温度的分布变化趋势如图 4 所示。在树形双层网络微通道中,流体从底层最低分支向高级分支逐层分流流动,而在上层则由最高分支向最低分支逐渐聚合

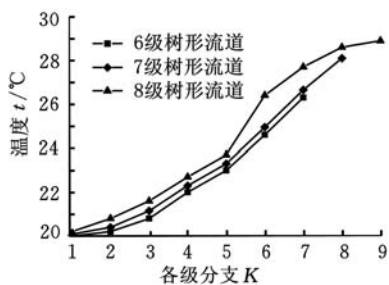


图 4 底层树形微通道各级分支流体温度分布

流动,在此过程中,流体逐渐被加热。在流体流动的初始阶段,流体温度较低而微通道覆盖范围小,因此芯片在前几个微通道分支附近温度较低;由于流体流动过程中被加热,故在微通道分支较大附近的芯片温度相对较高。6 级和 7 级树形微通道的各级节点温度可以近似拟合成高次曲线,而

8 级树形微通道的前 7 级节点也类似于同样的曲线,但是最后一个节点与前一节点温差不明显,加大了曲线拟合的误差,这也说明最后一级分形冷却效果不明显。

3.1 树形微通道的流动特性

由于上下两层的结构完全一样,故其流动和压力分布形态相似,为简化分析并给出更直观的图形,本文仅分析底层各级微通道的压降和流阻。图 5 为树形微通道的底层各级微通道压降分布图,从图中可看出:前三级微通道的压降逐渐上升,然后随着流速降低,压降逐渐降低,但是在第 7 级以后,压降又有所提升。7 级树形微通道和 6 级树形微通道的压降分布比较相似;因为第 8 级微通道的影响,8 级树形微通道压降分布的总体趋势没变,但数据的波动增大了。根据哈根-泊肃叶定律,可以根据压降得出各级分支的流阻。

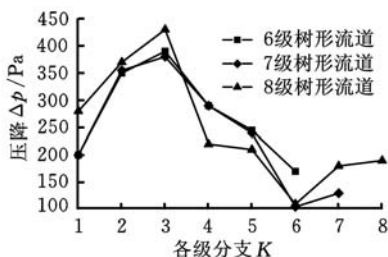


图 5 底层树形微通道各级分支压降分布

图 6 为树形微通道底层结构的流阻分布图,从图中可以看出:随着分支级别的不断增大,微通道流阻逐级增大,6 级树形微通道和 7 级树形微通道的各级微通道流阻增大平缓,8 级树形微通道的第 8 级微通道流阻增大明显。

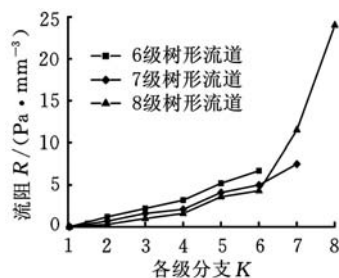


图 6 底层树形微通道各级分支流阻分布

图 7 给出了实际的流速分布,前几级分支的流速逐级下降,接近流阻分布的反比关系,但是 8 级树形微通道的第 8 级微通道流速没有进一步下降。因为尺度效应,第 8 级分支流动已经不能近似处理为哈根-泊肃叶流动,所以用哈根-泊肃叶定律计算出来的流阻与流速缺乏对应关系。

流体通过两层之间连通微通道时也可能产生较大压降,流体通过 6 级树形通道两层之间连通微通道的压降为 3106 Pa ;通过 7 级树形微通道

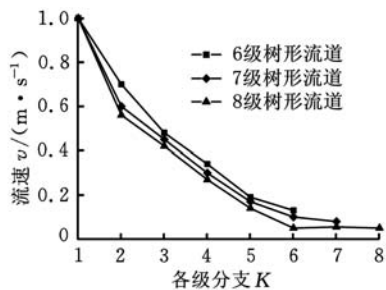


图 7 底层树形微通道各级分支流速分布

和 8 级树形微通道的压降分别为 248 Pa 和 528 Pa。由图 7 可知,6 级树形微通道的末级速度明显高于其他两种微通道的末级速度,因此在通过连通微通道时造成了较大的压力损失。底层微通道压降和流速分析显示出 8 级树形微通道的第 8 级分支压降大、流速低,极大地影响了散热效果,而在通过两级连通微通道时,6 级树形微通道有较大压降;与这两种微通道相比,7 级树形微通道具有更好的流动特性,因而具有更好的散热效果。

3.2 树形微通道与平行微通道散热性能对比

将单层平行微通道与新型树形微通道进行对比,单层平行微通道间距为 1 mm,微通道宽 0.5 mm,深 1 mm,边界条件与 7 级树形微通道相同。分析结果显示,单层平行微通道的平均壁面温度为 27.6 °C,7 级树形微通道的平均壁温为 27.4 °C,非常接近,但两种微通道的均温性相差很大,图 8 给出了沿 7 级树形微通道各节点处的壁面温度与相同坐标处单层平行微通道的壁面温度。由于都是从壁面温度最低处向壁面温度最高处取点,因此壁面温度具有可比性。可以看出,传统平行微通道的散热效果不如树形微通道的散热效果,树形微通道升温平缓,温差较小,具有更高的最低温度和更低的最高温度,温差仅 2.7 °C,低于平行微通道 17 °C。

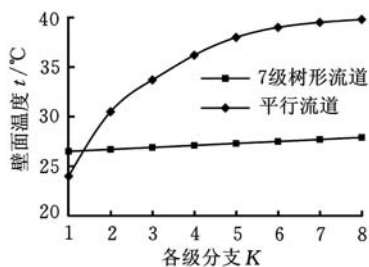


图 8 树形微通道与平行微通道壁温对比

4 结语

将仿生学应用于微通道的设计之中,设计出了双层树形微通道。通过对不同级数的双层树形

微通道散热效果和流动特性进行对比,发现 7 级树形微通道散热效果和流动特性最为理想。过多的树形分形会增大压降,降低散热效果;过少的树形分形会使流体在通过两层之间的过渡微通道时造成更大的压力损失,同时较少的分形使得微通道总体数量不足,影响散热效果。与单层平行微通道比较可以发现,新型树形微通道具有更好的均温性能。

参考文献:

- [1] 刘静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance Heat Sinking for VLSI[J]. IEEE Electronic Device Letters, 1981, 2:126-129.
- [3] 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.
- [4] Pence D V. Improved Thermal Efficiency and Temperature Uniformity Using Fractal-like Branching Channel Networks[C]//Proceeding of the International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Micro Scale. Banff, Canada, 2000: 142-148.
- [5] 徐尚龙,李涤尘,张彦东,等. 自然骨微管的三维仿生重建及两相流分析[J]. 西安交通大学学报,2006, 40(3):265-268.
Xu Shanglong, Li Dichen, Zhang Yandong, et al. Three-dimensional Biomimetic Reconstruct and Two-phase Flow Analysis of the Microtubules of Natural Bone[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3):265-268.
- [6] 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.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:徐尚龙,男,1974 年生。电子科技大学机械电子工程学院副教授、博士研究生导师。研究方向为微系统封装与散热。郭宗坤,男,1990 年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。秦杰,男,1983 年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。蔡奇戎,男,1989 年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。胡广新,男,1983 年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。王伟杰,男,1987 年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。