

芯片散热微通道仿生拓扑结构研究

吴龙文, 卢 婷, 陈加进, 王明阳, 杜平安
(电子科技大学机械电子工程学院, 四川成都 611731)

摘 要: 为提升高热流密度芯片的散热能力, 借鉴自然界中众多具有优良传质传热特性的网络拓扑, 设计了多种仿生微通道拓扑结构. 利用数值模拟方法, 分析了不同拓扑结构的散热效果及压降特性, 结果表明不同拓扑结构的散热能力存在一定差异, 且芯片热流密度越高差异越明显. 对数值分析中综合性能优秀的蜘蛛网结构的散热特性进行了理论分析, 并通过3D打印加工了微通道散热器, 测试表明其散热能力和压降相对现有平直微通道均有明显提高.

关键词: 芯片; 仿生; 微通道; 拓扑结构; 散热特性

中图分类号: TB131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1153-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.020

A Study of Bionic Micro-channel Topology for Chip Cooling

WU Long-wen, LU Ting, CHEN Jia-jin, WANG Ming-yang, DU Ping-an

(School of Mechatronics Engineering University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: In order to improve the heat dissipation capacity of chip with high heat flux density, this paper presents some bionic micro channel topologic structures which are designed based on naturerel network topologies with excellent heat and mass transfer characteristic. Then the heat dissipation and pressure drop of different topologies are analyzed by numerical simulation. The calculation results indicate that there exists differences in the heat dissipation capacity of different topologies. With the increasing of heat flux density, the differences become more obvious. The heat dissipation characteristics of the spider web structure with excellent performance are analyzed theoretically. The micro-channel heat sink is fabricated by 3D printing. The testing results indicate that the heat dissipation capacity of the spider web structure has a better performance than current existing flat micro-channel.

Key words: chip; bionics; micro-channel; topology; characteristic of heat transfer

1 引言

电子设备的高集成度和高功率密度给芯片散热带来了巨大挑战^[1], 传统散热方式已无法满足高热流密度芯片的散热要求. 自 Tuchenman^[2] 等开创性地研究微通道散热技术以来, 微通道散热技术成为提高芯片散热能力的一个主要研究方向. 随着微细加工技术的成熟和进步, 使微通道散热技术的工程应用成为可能^[3].

微通道截面积小, 通道易阻塞, 因此微通道多设计成多条通道的并联, 目前多采用多条直通道平行的平直微通道散热结构. 为探索综合散热性能更优的微通道散热器, 陈运生^[4] 等分析了分形微管道网络内部微流体的换热与压降特性, Chen^[5] 等分析了一种呈 T 形树状分形流体网络结构的散热特性, 周建辉^[6] 等提出

了太阳花散热器参数化设计和流场分析程序. 研究发现, 多条并联通道的布局(即拓扑结构)对散热能力和流动特性具有较大影响, 因此研究微通道的拓扑结构对提高芯片散热能力、降低压降具有明显的工程意义.

本文借鉴自然界众多具有优良传质传热特性的网络拓扑, 设计了多种仿生微通道拓扑结构. 利用数值模拟分析了各种拓扑结构的散热效果, 并对蜘蛛网拓扑结构的散热特性进行了理论分析和测试, 结果表明其散热性能相对现有平直微通道有明显提高.

2 微通道仿生拓扑结构设计

2.1 仿叶脉微通道拓扑结构

植物需要用最快的速度、在最少能量消耗下通过叶脉分形网络将养分运输到叶脉的各个部位, 植物

叶脉分形网络具有优良的流动性能. 图 1(a) 显示了典型网状植物叶脉, 通过去掉叶脉中的细脉, 可抽象出具有植物叶脉特征的物理模型(图 1(b)).

随着分形结构上下级水力直径、分形角度的改变, 植物叶脉的网络结构会发生相应变化, 也会影响其传热传质性能. 为适应芯片形状, 将微管分形夹角假定为 90° , 不直接采用叶脉分形特征^[7]; 另一方面, 为汇聚流

体工质并将热量从出口带走, 将两枚叶片镜像对置, 既能适应芯片形状, 还可避免增大冷板体积; 此外, 为进一步强化芯片的散热能力, 将更多的流量引入芯片正下方, 特将仿叶脉状微通道拓扑的干道设置成变宽度阶梯状, 取上下级水力直径比为 0.8 ^[7]. 最终构造的仿叶脉型微通道拓扑结构如图 1(c) 所示.

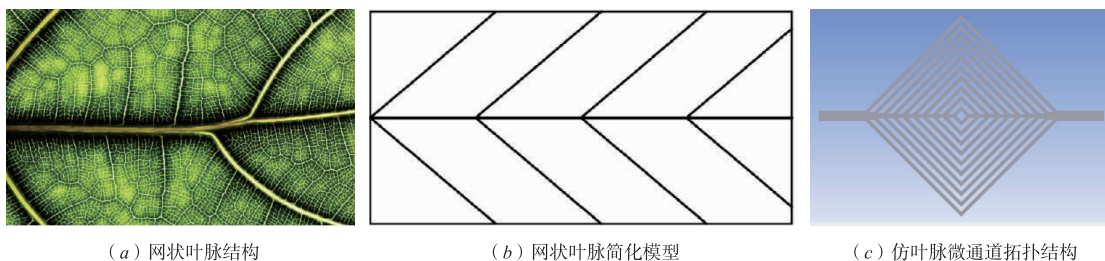


图1 叶脉结构

2.2 仿肺部气管微通道拓扑结构

众多生物系统进化出了与其本身特征尺寸相匹配的传输系统, 以输送水分和溶解营养物质. 以人的气管为例, 该管网系统输运效率高、分布均匀、物质和能量

交换效率高. 据解剖学资料^[8], 人体气管经多级分叉后与肺泡相连, 整个支气管形状如一棵倒置的树, 如图 2(a) 所示.

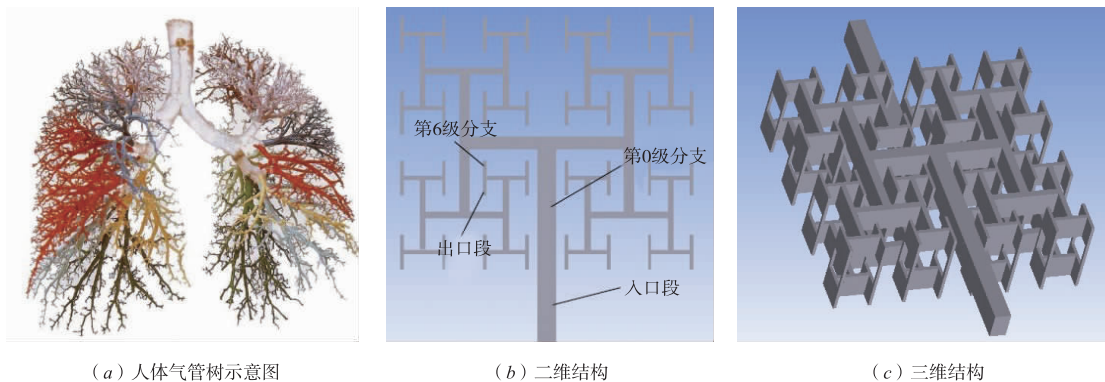


图2 肺部气管型结构

为得到该网络的分形参数, 可借助 Murray 定律^[9,10]表示为

$$D_j^\gamma = D_{j1}^\gamma + D_{j2}^\gamma \quad (1)$$

上式描述了第 j 级二分叉的父分支与子分支直径的关系, γ 是分形尺度因子, 对于大部分分形结构, $\gamma \approx 3$, 进化程度越高的动物 γ 越接近 3. 取 $\gamma = 3$, 分形级数 $k = 6$, 结合其分形特点并映射到二维平面, 令同一级子分支的直径相等, 且为适应芯片形状, 设定微通道夹角为 90° , 得到二维拓扑结构如图 2(b) 所示. 此外, 为避免分形结构出现分支交叉, 对分形参数 r 进行以下限制:

$$\gamma^2 \frac{1-\gamma^m}{1-\gamma^n} \leq 1 \quad (2)$$

$$L_{k+1}/L_k = \gamma_1, \quad (k=0,2,4) \quad (3)$$

$$L_{k+1}/L_k = \gamma_2, \quad (k=1,3,5) \quad (4)$$

式中, r 为分形通道上下级长度比. 为保证微通道均匀布置, 取 $r_1 = 0.5, r_2 = 1$. 最终设计的仿肺部气管型微通道拓扑结构如图 2(c) 所示. 该微通道具有两层, 每层各有 6 个分支, 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, 以保证流体在上下两层微通道内充分流动.

2.3 仿蜘蛛网微通道拓扑结构

蜘蛛网是由蜘蛛吐丝编成的网状物(图 3(a)), 用以捕获昆虫或结巢居住. 尽管蜘蛛网并不是一种微管运输系统, 但其结构特点在构造微通道拓扑结构时同样值得借鉴. 蜘蛛网由众多正多边形层层嵌套而成, 结构紧凑, 比表面积大, 各端点通过多边形对角线连接. 为避免过多的进出口, 此处只保留一组对角线, 如图 3

(b)所示.

为使芯片得到可靠冷却,多数情况均要求微通道网络能够“均匀密布”散热表面.几何学已发现^[11],能“均匀密布”任意形状平面的正多边形仅有正三角形、正四边形和正六边形;特别地,在密布相同面积的前提下,正六边形具有最小的网络周长,这一特点有利于降

低流体网络系统的阻力,还可避免正四边形直角拐角形成局部流动死区而降低换热效率的缺点.故选用正六边形层层嵌套形成图3(c)所示的仿蜘蛛网微通道拓扑结构,同样将干道设置成变宽度阶梯状,取上下级水力直径比为0.8.

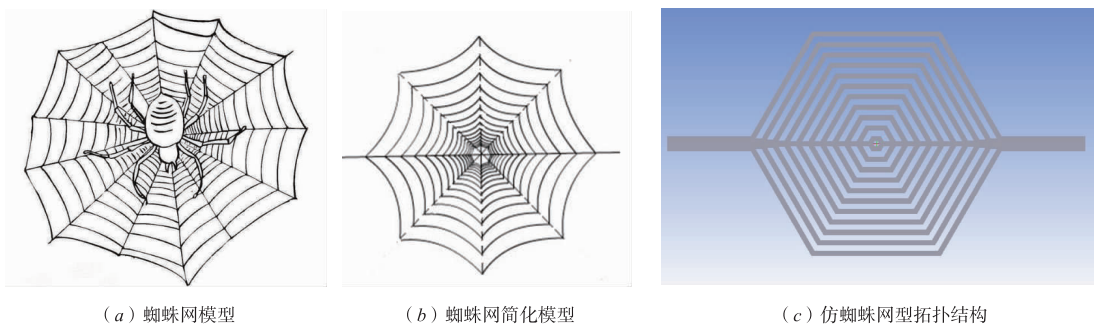


图3 蜘蛛网结构

2.4 其他仿生微通道拓扑结构

经过漫长的自然选择,许多生命和非生命系统已进化出各种最优、或接近最优的结构,如河流、蜂窝、昆虫翅脉等.基于实际工程应用需求,借鉴上述拓扑提取

方式,采用分形几何方法捕捉其结构特征,设计另外3种微通道结构.图4(a)为仿河流网络微通道,图4(b)为仿蜂窝微通道,图4(c)为仿昆虫翅脉微通道.

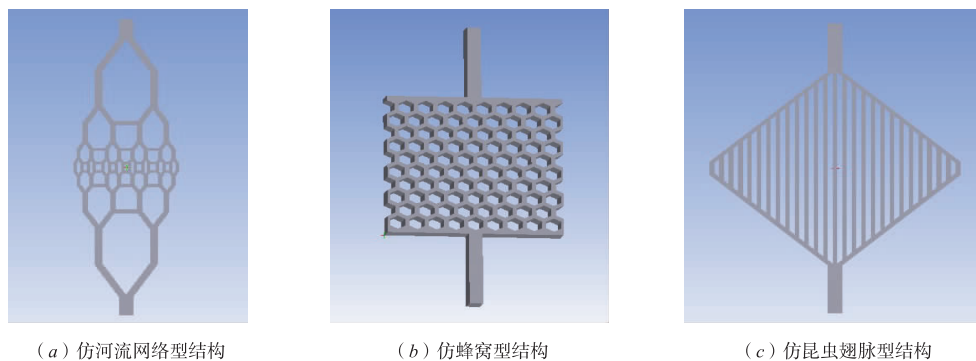


图4 其他仿生拓扑结构

3 仿生拓扑结构散热特性的数值分析

为分析比较各种仿生微通道结构的散热特性,特做以下设定:冷板材料、尺寸相同;通道尺寸一致,距离热源的距离相等,截面均为矩形;流体工质相同,热载荷相同.此外,为在有限的待散热区域内设计出高效的微通道冷板结构,令各微通道结构的覆盖面积基本相等.表1是在此约束下,各仿生结构的实际对流换热面积.

3.1 计算模型

利用8mm×8mm×1.5mm的铝合金冷板进行微通道拓扑结构设计,发热芯片采用2mm×2mm的面热源模拟,且为保证对芯片的充分冷却,保证流道覆盖区域面积为16mm²,完全覆盖整个芯片.冷却工质选用60%体积浓度的乙二醇溶液,冷却液入口流量40ml/min,入

口温度20℃,环境温度20℃,出口为静压条件.忽略自然对流和辐射传热,通道壁面绝对光滑,考虑芯片与微通道冷板贴装时的接触热阻.图5显示了普通矩形平直微通道冷板的热仿真模型.

表1 各种微通道拓扑结构的实际换热面积

结构类型	换热面积(mm ²)
矩形平直	100
河流网络	50
昆虫翅脉	101
叶脉型	104
蜂窝型	85
肺部气管	138
蜘蛛网	110

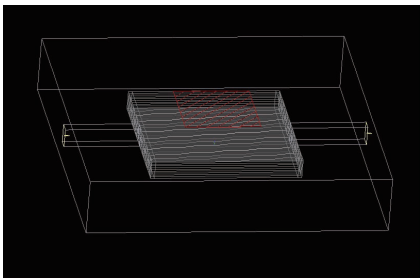


图5 矩形平直微通道散热器热仿真模型

3.2 数值计算结果

建立各种拓扑结构微通道散热器的热仿真模型,保持边界条件一致,令芯片功率分别为 5W、10W、20W、40W,利用 Icepak 进行流固耦合计算.表 2 按芯片的温升高低顺序列出了各种拓扑结构的芯片最高温度及压

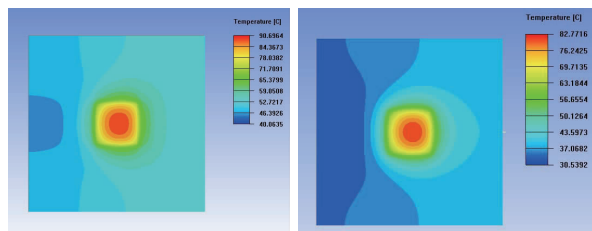


图6 散热器温度分布

分析表 2 数值计算结果,不难发现:

(1)在相同工况下,不同微通道拓扑结构的散热能力确实存在差异.除河流网络结构外,其他仿生微通道凭借各自独有的分形特点,较普通矩形平直微通道具有更优秀的散热能力;在不同芯片功耗下,不同微通道拓扑结构散热能力的相对强弱不发生变化,即散热能力不随芯片功率变化而改变.

(2)随着芯片热流密度增加,不同拓扑结构的散热能力差异越来越大.例如芯片发热功率为 5W 时,散热能力最强的蜘蛛网结构相对普通矩形平直微通道的芯片最高温度下降仅 1.1℃.但当芯片功率增至 40W 时,蜘蛛网结构相对普通矩形平直微通道降低达 8℃.因此在对高热流密度(大于 100W/cm²)芯片进行热设计时,合理设计流道拓扑结构是很有必要的.

(3)不同拓扑结构在散热方面有着不同的特点:受微通道拓扑结构各自分形特征的约束,在有限的待散热面积内,各仿生结构的实际对流换热面积存在差异;仿河流网络结构用于矩形热源冷却时受其 Y 型分形特征限制,实际流固接触面积过小,散热能力差,应适用于蝶状热沉设计(双层结构);仿肺部气管结构散热能力较强,但流程过长,进出口压降较大,且两层结构对单侧热源冷却作用不大,反而导致冷板体积重量增加;蜘蛛网结构则综合了叶脉型结构紧凑、散热比表面积

降,图 6 和图 7 显示了 2 种微通道拓扑散热器的温度分布和冷却液压力分布.

表 2 各种微通道拓扑结构的热仿真结果

拓扑结构	芯片最高温度(℃)				压降(kpa)
	5W	10W	20W	40W	
河流网络	29.4	38.8	57.7	95.4	148.1
矩形平直	28.7	37.7	55.3	90.7	97.1
昆虫翅脉	28.3	36.7	53.4	86.7	110.5
叶脉	28.1	36.4	52.7	85.5	96.2
仿蜂窝	27.9	36.2	52.4	84.9	90.8
肺部气管	27.8	36.1	52.2	84.4	203.3
蜘蛛网	27.6	35.7	51.4	82.8	93.1

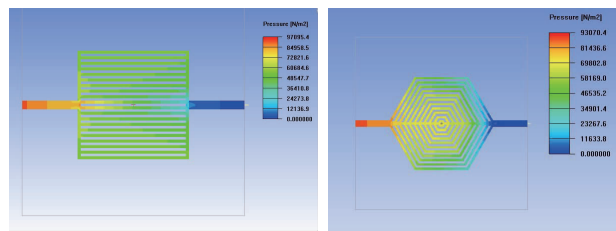


图7 冷却液压力分布

大以及蜂窝型流体流动性能好、压降低的优点,还可与蜂窝型流道嵌套使用,解决大面积散热区域的温度一致性问题,具有很好的工程应用价值.

(4)仿生微通道拓扑结构相对复杂,分形和流道拐角较多,且由于进口端突缩段不可逆过程引起的进口压力损失,使得仿生微通道会牺牲少量的进出口压降.综合散热能力和压降两个因素,仿蜘蛛网型拓扑结构的综合散热性能最佳.

4 蜘蛛网微通道结构的换热特性分析

为进一步分析各仿生微通道拓扑结构在散热方面的优越性能,下文以综合散热性能最优秀的仿蜘蛛网型结构为代表,以普通矩形平直微通道结构为参照,对蜘蛛网型结构的优良散热性能进行了理论分析:

我们知道,微通道散热器结构的主要冷却方式为强制对流换热,不考虑自然对流和辐射传热,其总换热量为:

$$Q = \Delta T * h * A \quad (5)$$

可以看出,对流换热热量正比于微通道结构暴露在运动流体下的表面积 A 、对流换热系数 h 以及传热温差 ΔT .由于各微通道结构的热边界条件一致,故影响其换热性能的因素为对流换热系数 h 和对流换热面积 A .下面对微通道结构散热性能进行单因素影响分析:

首先,分析蜘蛛网结构与普通矩形平直结构在相同流道覆盖面下的实际流固接触面积的差异. 设流道底部覆盖面积均为 S_b 、槽宽均为 W_c 、槽深均为 H_c 、占空比均为 0.5.

不考虑进出口管路,蜘蛛网结构近似由多层正六边形环形流道嵌套而成,如图 8 所示.

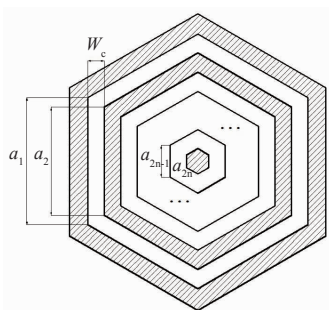


图8 蜘蛛网结构平面几何图

其对流换热面积为

$$A_z = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \quad (6)$$

$$n = \lfloor \frac{\sqrt{3}a_1}{4W_c} \rfloor \quad (7)$$

$$A_i = 6(W_c + H_c)(a_{2i-1} + a_{2i}), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

$$a_{2i} = a_{2i-1} - \frac{2}{3}\sqrt{3}W_c, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中, n 为正六边形环形流道嵌套层数, A_i 为第 i 层正六边形环形流道的对流换热面积.

因此,蜘蛛网结构的总对流换热面积 A_z 为:

$$A_z = 6(W_c + H_c) \lfloor \frac{\sqrt{3}a_1}{4W_c} \rfloor \left[2a_1 - \left(2 \lfloor \frac{\sqrt{3}a_1}{4W_c} \rfloor - 1 \right) \frac{2\sqrt{3}}{3}W_c \right] \quad (10)$$

将蜘蛛网结构的对流换热面积与矩形平直微通道进行对比,蜘蛛网微通道换热器的流道底部覆盖面积 S_b 为:

$$S_b = \frac{3\sqrt{3}}{2}a_1^2 \quad (11)$$

取矩形平直微通道长度 $l = 3a_1$, 微通道数目为 m , 则其底部覆盖面积为:

$$S_b = 2mlW_c = 6ma_1W_c \quad (12)$$

则平行微通道数目为:

$$m = \lfloor \frac{\sqrt{3}a_1}{4W_c} \rfloor \quad (13)$$

同理,矩形平直结构的总对流换热面积 A_p 为:

$$A_p = 2ml(W_c + H_c) \quad (14)$$

因此,在有限的待散热面积内,蜘蛛网结构与矩形平直结构的实际对流换热面积之比为:

$$\frac{A_z}{A_p} = \frac{6}{\sqrt{3}} \frac{2W_c \left(2 \lfloor \frac{\sqrt{3}a_1}{4W_c} \rfloor - 1 \right)}{a_1} \quad (15)$$

由式(15)看出,由于 a_1 远大于 W_c , 特将上式进一步简化得 A_z/A_p 大于 1, 即在同等流道覆盖面积下,蜘蛛网结构中冷却工质与固体壁面间的对流换热面积比矩形平直微通道结构更大. 说明在有限待散热面积内,蜘蛛网结构具有结构紧凑、散热比表面积大的优点.

其次,保证蜘蛛网结构与普通矩形平直结构的对流换热面积 A 一致,分析两种微通道结构平均对流换热系数 h 的差异. 不考虑自然对流和辐射传热,利用一维热阻对微通道散热器模型温度场进行近似,强迫对流冷却总热阻为:

$$R_{\max} = \frac{T_{\text{source}} - T_{\text{environment}}}{Q} = \frac{1}{hA} \quad (16)$$

其中, T_{source} 为芯片最高温度, $T_{\text{environment}}$ 为环境温度.

建立两种微通道散热器的热仿真模型,保证微通道的流固接触面积均为 105mm^2 ; 模型参数及边界条件与上文数值分析中的计算模型保持一致. 计算完成后,提取相关数据,得到不同雷诺数下对应微通道散热器的对流换热系数 h 如图 9 所示.

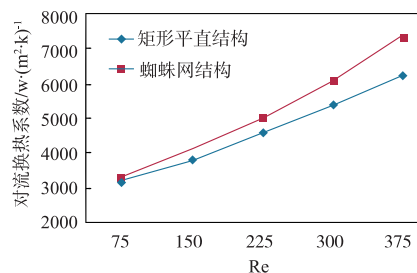


图9 对流换热系数影响曲线

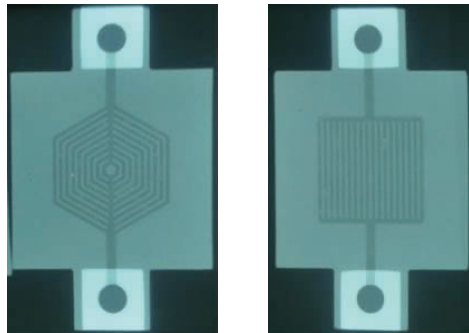
可以看出,在同等条件下,蜘蛛网结构的平均对流换热系数较矩形平直结构更大,且随着雷诺数增大,两种结构的平均对流换热系数差异更加明显. 这是由于蜘蛛网结构中冷却工质受到通道内部肋的干扰,流动方式方向不断改变,进而不断扰动边界层,阻止其不断增厚,可进一步强化散热效果.

综上所述,新型蜘蛛网结构具有散热比表面积大、平均对流换热系数高的优点,由式(5)可知,蜘蛛网结构较普通矩形平直结构具备更优秀的换热性能,工程应用价值显著.

5 蜘蛛网结构散热特性的实验验证

本节对散热性能优秀的蜘蛛网微通道和现有矩形平直微通道的散热和流动性能进行实验对比. 利用金属 3D 打印加工两种微通道散热器,解决了微通道的密封和工质侧流问题,并通过微通道散热器外表面打磨

抛光处理和振动光饰加工尽可能降低了样件表面粗糙度. 样件 X 光扫描图像如图 10 所示.



(a) 蜘蛛网型结构 (b) 矩形平直结构

图10 实验样件的X光扫描图像

发热芯片选用 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的 MCH 高温陶瓷片模拟, 利用导热硅脂作为芯片和微通道的连接介质, 并通过专用夹具进行装夹待导热硅胶完全固化, 最大程度降低导热硅胶的厚度. 压降利用压差变送器测试. 温度测试由 T 型热电偶(测量误差为 $0.4\% \text{ FS}(0.5^\circ\text{C})$) 配合数据采集仪实现, 且为避免周围环境影响测量精度, 特做以下措施: 测量点的热电偶热端完全包裹; 热电偶屏蔽线避开带电装置; 热电偶冷端与数据采集仪相连, 并将负极接地. 实验平台见图 11.

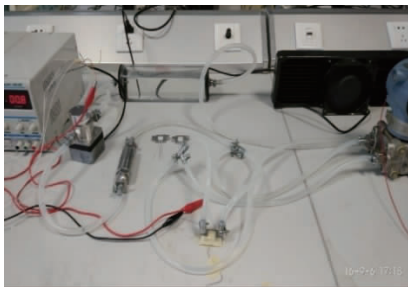


图11 实验平台

控制实验各边界条件一致, 调节齿轮泵电压统一微通道散热器的入口流量为 $210\text{ml}/\text{min}$, 调节芯片电压得到四种不同的工况, 实验结果见表 3.

表 3 微通道散热器的实验测试结果

拓扑结构	芯片最高温度($^\circ\text{C}$)				压降(kpa)
	10W	20W	40W	60W	
矩形平直	35.2	44.3	61.8	78.5	230.5
蜘蛛网型	34.0	42.1	57.3	71.4	184.7

由表 3 可知, 蜘蛛网结构的散热能力和压降特性均优于矩形平直微通道, 且随着芯片热流密度提高, 两者散热能力的差异愈加明显. 尽管受通道及热源尺寸、样件表面粗糙度、环境条件等诸多因素影响, 芯片温度测试值较仿真结果偏低, 且微通道散热器的进出口压

降测量值较仿真结果偏高, 但两者反映的基本规律完全一致, 即蜘蛛网型微通道相较矩形平直微通道具有更加优良的流动和换热性能.

6 结论

本文将仿生学应用于微通道拓扑结构设计, 得到多种芯片冷却用仿生微通道结构, 且均具有一定的代表性, 能够表征同类拓扑结构的流动与换热性能. 通过各种仿生微通道与普通矩形平直微通道的数值模拟和实验对比发现: 不同拓扑结构在散热方面有着不同的特点. 针对矩形芯片, 除河流网络结构外, 各仿生微通道拓扑结构较普通矩形平直微通道具有更强的散热能力, 且随着芯片热流密度提高, 各种微通道结构散热能力差异更加明显, 故在高热流密度芯片的应用场合, 微通道拓扑结构对芯片散热效果影响较大; 蜘蛛网型结构具有散热比表面积大、平均对流换热系数高、流体流动性能好等优点, 综合散热性能最优, 散热能力较矩形提升近 10% , 进出口压降更低, 具有很好的工程应用价值.

参考文献

- [1] Rosa P, Karayiannis T G, Collins M W. Single-phase heat transfer in microchannels; The importance of scaling effects [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (17 - 18): 3447 - 3468.
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126 - 129.
- [3] 王阳元, 武国英, 郝一龙, 等. 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究 [J]. 电子学报, 2002, 30 (11): 1577 - 1584.
Wang Y Y, Guo ying W U, Hao Y L, et al. Study of Silicon-Based MEMS Technology and Its Standard Process [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30 (11): 1577 - 1584. (in Chinese)
- [4] 陈运生, 董涛, 杨朝初, 等. 芯片冷却用分形微管道散热器内的压降与传热 [J]. 电子学报, 2003, 31 (11): 1717 - 1720.
Chen Y S, Dong T, Yang C C, et al. Pressure drop and heat transfer in fractal microchannel heat sinks for cooling of electronic chips [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31 (11): 1717 - 1720. (in Chinese)
- [5] Chen Y, Cheng P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2002, 45 (13): 2643 - 2648.
- [6] 周建辉, 杨春信. 太阳花散热器优化设计 [J]. 电子学报, 2009, 37 (2): 387 - 392.
Zhou J H, Yang C X. Optimal design for the sunflower heat

- sink[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 387 - 392. (in Chinese)
- [7] 徐尚龙, 郭宗坤, 秦杰, 等. 树形微通道热沉仿生建模及三维热流特性数值分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(9): 1185 - 1188.
Xu S, Guo Z, Qin J, et al. Three Dimensional Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Tree-shaped Microchannels[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(9): 1185 - 1188. (in Chinese)
- [8] 段佐刚, 谭小苹, 裴觉民. 肺气管树分形结构的数学描述[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(4): 64 - 66.
Duan Z G, Tan X P, Pei J M. Mathematical Description of Fractal Structure of Bronchial Tree[J]. Journal of Sichuan University, 2003, 35(4): 64 - 66. (in Chinese)
- [9] 项若飞. 对动脉血管网络血液输运特性的试探性研究[D]. 华中科技大学, 2008.
- [10] 田玉福. 新型分形结构及其电子器件微通道散热应用研究[D]. 华南理工大学, 2013.
- [11] 董涛, 陈运生, 杨朝初, 等. 仿蜂巢分形微管道网络中的流动与换热[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1618 - 1625.
Tao D, Chen Y, Yang Z, et al. Flow and heat transfer in comby fractal microchannel network [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2005, 56(9): 1618 - 1625. (in Chinese)

作者简介



吴龙文 男, 1992年8月出生于四川南充. 2014年毕业于电子科技大学机械电子工程学院, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为有限元数值仿真分析、机械结构设计、流体力学、电子设备热设计.

E-mail: lwuuestc@126.com



杜平安(通信作者) 男, 1962年5月生于重庆开县, 1992年于重庆大学获得博士学位, 03年在美国 Georgia Tech 进修访问, CIMS 研究所所长、教授、博导. 现在电子科技大学机械电子工程学院工作, 主要研究方向为机电系统多物理场特性数值仿真技术、机电一体化与传感技术等.

E-mail: dupingan@uestc.edu.cn