

引用格式: 于浩然, 吉喆, 严英占. 基于 LTCC 基板直线型微流道散热设计与仿真 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(4): 494-500.
YU H R, JI Z, YAN Y Z. Design and simulation of straight microchannel heat dissipation based on LTCC substrate[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(4): 494-500.

基于 LTCC 基板直线型微流道散热设计与仿真



于浩然¹, 吉喆^{1*}, 严英占²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 石家庄 050043; 2. 中国电科智能科技研究院, 北京 100041)

摘要: 聚焦于结构相对复杂的 LTCC 基板直线型微流道散热效率较低的问题, 在微流道封装层上设置了一种金属银导热柱结构, 旨在提高直线型微流道散热器的散热效果。首先采用 ANSYS 有限元数值构建了 3 种不同流道数量及 10 种增设金属柱结构的直线型微流道散热器有限元模型, 并进行了热-流耦合仿真分析。随后研究了不同流道数量、不同金属柱结构的排列方式和金属柱直径、长度等尺寸对散热效果的影响。仿真结果表明, 采用 13 条流道和 0.25 mm 直径、0.625 mm 长度的金属银导热柱的微流道散热器, 在散热性能上表现最为优异。与优化前的直线型微流道结构相比, 散热效果提高了 8.72%。

关键词: 散热; LTCC 基板; 微流道; 金属柱热通孔; 直线型

中图分类号: TN305.94

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024318

Design and simulation of straight microchannel heat dissipation based on LTCC substrate

YU Haoran¹, JI Zhe^{1*}, and YAN Yingzhan²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Institute of Intelligent Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China)

Abstract: Focusing on the issue of relatively low heat dissipation efficiency of complex structures in straight microchannels on LTCC substrates, a metal silver heat conduction column structure is set on the microchannel packaging layer to enhance the heat dissipation effect of straight microchannel heat sinks. Firstly, three different numbers of flow channels and ten metal column structures are added to the straight microchannel heat sink finite element model, which was constructed by using ANSYS finite element numerical simulation, and thermal-fluid coupling simulation analysis is carried out. Then, the impact of different flow channel numbers and different metal column structure arrangements as well as metal column diameters and lengths on the heat dissipation effect is studied. The simulation results show that the microchannel heat sink with 13 flow channels and a metal silver heat conduction column with a diameter of 0.25 mm and a length of 0.625 mm performs the best in heat dissipation performance. Compared with the straight microchannel structure before optimization, the heat dissipation effect is improved by 8.72%.

Key words: heat dissipation; LTCC substrate; micro channel; metal column thermal via; straight type

低温共烧陶瓷 (low temperature co-fired ceramic, LTCC) 技术因其高品质因数、高传输速度、耐高温及适应大电流等特性, 在微机电系统散热领域得到了广泛应用^[1-3]。随着电子元件集成度的不断提升, 其功率模块在工作时产生的热耗散功率也随之增加, 若不能及时有效地散热, 将导致模块温度急

剧上升, 严重影响芯片的可靠性和寿命。研究表明, 功率放大器的结温每升高 9°C, 其故障率将增加 1 倍, 而电子产品的温度每急剧上升 10°C, 其可靠性就会降低 50%。因此散热技术对于电子元件至关重要^[4]。

微流道散热技术因能够在微尺度下实现高效的

收稿日期: 2024-11-24

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2022106)

作者简介: 于浩然, 主要从事机械设计和工程热物理等方面的研究。

*通信作者 E-mail: jiyouyou1001@126.com

热交换而成为一种有效的散热方式。微流道散热系统通过液体在微小通道内流动,将热量从热源芯片快速带走,从而降低芯片温度,保障其正常工作和长期稳定性。目前常见的微流道结构有直线型、折线型、蛇型和螺旋型等^[5],其中直线型微流道相比折线型、S型等微流道结构简单,有利于制造和维护,同时由于流体在直线型微流道中的流动路径直且无转弯,因此其压降相对较低,有助于减少泵送功率。文献[6]验证了相比复杂的微流道结构,直线型微流道存在一定的局限性,没有充分利用流道空间来增强换热,导致散热效果不均匀,散热效率上存在不足;文献[7-8]对比验证了直线型相较于蛇形和螺旋型结构的微流道散热效果较差。

针对散热效率不高这一不足,本文对传统直线型微流道增设了金属导热柱结构,基于LTCC基板设计并优化了一种直线型微流道散热结构,并通过仿真分析了其散热性能。

本文设计了11、13和15条流道数量的直线型微流道结构,通过控制流体流速、进出口截面尺寸以及微流道布局结构等参数对散热性能的影响进行热-流耦合仿真分析,得出散热效果最优的流道数量。随后对其增设金属导热柱结构,分析了金属柱深入封装层和流道层时,位于流道上方和流道间隔处两种不同金属柱排列方式的散热效果。再分析了直径分别为0.1、0.15、0.2、0.25 mm和长度为0.6、0.625、0.667、0.75、1 mm的金属银导热柱对散热效果的影响,以揭示直线型微流道散热的规律和特点。最后,通过分析热量在LTCC基板内的传导和对流过程,评估基板中流道数量和金属导热柱排列位置及尺寸对散热效果的影响,从而优化设计出高效散热直线型微流道结构。

1 设计原理

1.1 直线型微流道及蠕动泵的参数选择

微流道基板结构主要包括模拟热源、基板密封层、流道层、导流层和制冷剂进出口层5个部分^[9-10],图1为微流道基板整体结构图。进出口为矩形,分别连接蠕动泵^[11-12]。蠕动泵的流量精度高且可以改变转子数量进而调整流量,其工作原理是通过泵的弹性输送,软管交替进行挤压和释放来泵送流体。根据该结构尺寸及流量精度要求,选用6转子2通道的蠕动泵,最大流量为65 mL/min,表1为微流道几何尺寸,表2为关键材料参数及边界条件设定。

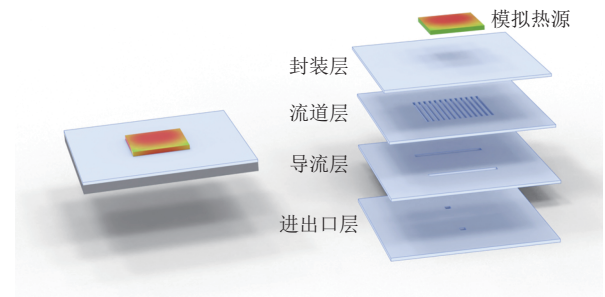


图1 微流道基板结构示意图

表1 微流道几何参数设置

结构名称	尺寸
LTCC基板长×宽×高/mm ³	30×30×2.1
模拟热源长×宽×高/mm ³	10×10×0.8
微流道宽×深/mm ²	0.4×0.5
导流层流道长×宽×深/mm ³	12.4×1×1.5
流道到热源芯片的距离/mm	0.5
相邻流道的间距/mm	0.6
矩形进出口长×宽×深/mm ³	1×1×0.6
流道数量/条	11/13/15
金属柱密度/个·cm ⁻²	100
金属柱直径/mm	0.1/0.15/0.2/0.25
金属柱间距/mm	1
金属柱长度/mm	0.5/0.6/0.625/0.667/0.75

表2 关键材料参数及边界条件设定

名称	值
LTCC导热系数/W·(m·k) ⁻¹	3.3
LTCC密度/g·cm ⁻³	3.1
LTCC热膨胀系数/K ⁻¹	5.8×10 ⁻⁶
LTCC恒压热容/J·(kg·k) ⁻¹	300
砷化镓芯片的导热系数/W·(m·k) ⁻¹	130
砷化镓芯片的密度/g·cm ⁻³	5.31
砷化镓芯片的热膨胀系数/K ⁻¹	5×10 ⁻⁶
砷化镓芯片的恒压热容/kg·K ⁻¹	360
去离子水的导热率/W·(m·K) ⁻¹	0.599
去离子水的传热系数/W·(m ² ·k) ⁻¹	0.55
去离子水的动力黏度/μ·(Pa·s) ⁻¹	1.308×10 ⁻³
去离子水的恒压热容/J·(g·K) ⁻¹	4.18
去离子水的密度/g·cm ⁻³	0.998
金属银导热柱的导热系数/W·(m·k) ⁻¹	429
参考温度设定/K	293.15
热源功率/W·cm ⁻²	15
外表面热通量/W·m ⁻²	0.6
出入口压力/MPa	0.1~0.2

1.2 散热理论分析

雷诺数用于表征流体流动状态,即惯性力与黏性力的相对大小。对于非圆形截面流道一般采用水利直径或等效直径来定义雷诺数 Re,在考虑边界

层和摩擦因子的条件下, 水利直径更接近实际流动特征, 本文采用水利直径来计算雷诺数。

$$D_h = \frac{4A}{C} = \frac{4wh}{2(w+h)} = \frac{2wh}{w+h} \quad (1)$$

式中, A 为截面面积; C 为截面周长; w 和 h 分别为矩形的长和宽。由表 1 参数的设置计算得到 $D_h=1$ 。

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; v 为流体流速; D 为圆形微流道直径; μ 为流体的动力黏度。当雷诺数 $Re < 2\ 300$ 为层流状态; $2\ 300 \leq Re \leq 4\ 000$ 为过渡状态; $Re > 4\ 000$ 为湍流状态。本文根据设计要求计算出雷诺数 Re 约为 7 630, 为湍流状态。

根据傅里叶定律, 通过材料单位面积的热流量与材料两侧的温度差成正比, 与材料的厚度成反比, 且与材料的导热系数有关。傅里叶定律的数学表达式为:

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

式中, Q 是热流密度, 即单位面积上的热流量; k 是材料的热导率; $\frac{dT}{dx}$ 是温度梯度, 即单位长度上的温度变化量; 负号表示热量总是从高温区域流向低温区域。

因此, 理论上提高垂直于横截面的温度梯度变化率或截面面积^[13]可有效提高基板上金属柱的热流量, 直观地讲就是提高金属柱的截面积, 减小金属柱的高度, 从而提高 LTCC 基板的热导能力。

2 流道数量对散热效果的影响

为验证微流道散热器的散热效果, 本文首先利用 ANSYS Icepak 软件对电子设备的自然散热性能进行仿真分析。在自然散热条件下, 模拟芯片在环境温度为 20℃ 时的热流密度和温度分布情况。根据图 2 自然散热仿真结果表明, 在未添加散热器的情况下, 模拟热源的最高温度高达 171℃ 远远超出其正常工作的温度范围 (-40℃~+85℃)。显然, 这样的高温条件不利于芯片的稳定运行, 凸显了微流道散热器在散热解决方案中的重要性。

直线型微流道结构在一定范围内增加流道数量

可以提升散热效果, 这是因为更多的流道意味着更多的流体流动路径, 从而增加了散热面积和效率。但是, 持续增大流道数量对散热性能的改善有限, 且会造成流道阻力成倍增大, 削弱液冷板能耗性能。为验证流道数量与散热效果的关系, 本文基于芯片大小尺寸建立了 3 种不同流道数量的模型, 分别为 11、13 和 15 条流道, 并对其进行模拟仿真, 图 3 为模拟热源温度仿真结果对比图, 图 4 为 3 种不同流道数量微流道结构下模拟热源温度变化曲线。

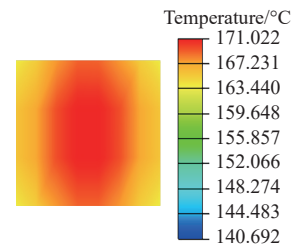


图 2 模拟热源自然散热温度云图

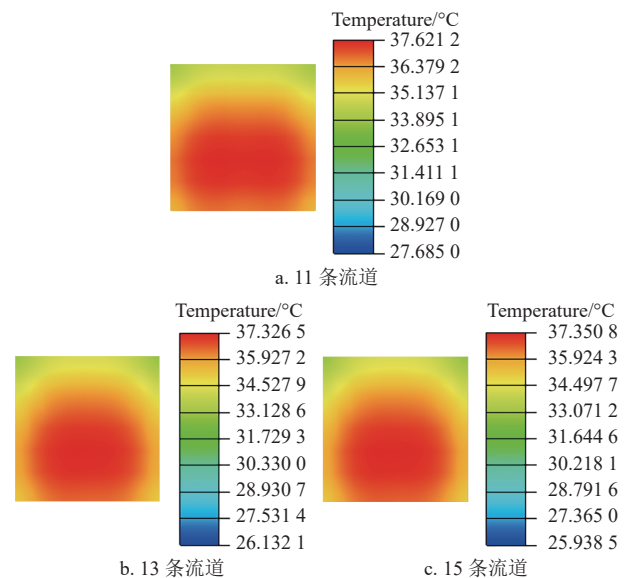


图 3 模拟热源温度仿真结果对比图

由表 3 仿真结果表明, 流道数量为 11 条时, 热源的最高温度约为 37.62℃; 流道数量为 13 时, 热源的最高温度约为 37.33℃; 流道数量为 15 条时, 热源的最高温度为 37.35℃。随着流道数量 (即散热面积) 的增加会导致流体的流阻变低, 使制冷剂的流动速度降低, 而制冷剂流速又与换热效率成正比, 因此流道数量不是越多越好。流道数量为 13 条时, 模拟热源的最高温度最低, 散热效果较好。

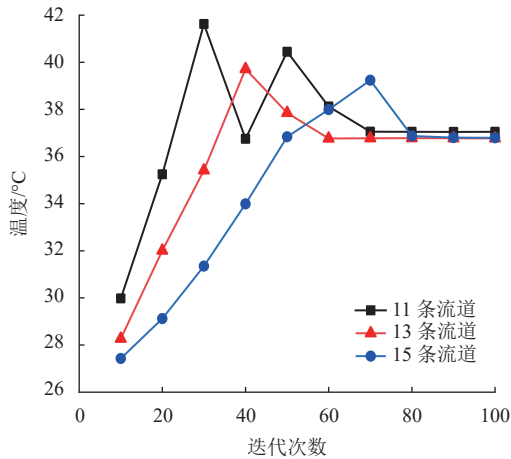


图 4 3 种不同流道数量微流道结构下模拟热源温度变化曲线

表 3 不同流道数量的微流道结构仿真结果数据表

流道条数	热源最高温度/°C	流体温度/°C	基板温度/°C	流体流速/m·s ⁻¹
11	37.62	32.48	36.63	1.55
13	37.33	32.09	36.33	1.49
15	37.35	32.23	36.35	1.48

3 直线型微流道结构优化

3.1 金属柱位于封装层

针对上述结论, 为了更好地将热量传入冷板中, 对散热效果相对较好的 13 条流道的基板上添加了金属银导热柱^[14], 即在模拟热源与封装层接触部分嵌入材料为纯银的金属柱。

针对金属柱位于封装层, 本文对比了两种金属柱排布的方式, 分别是金属柱位于流道上方(图 5a 所示)和金属柱位于流道间隔上方(图 5b 所示)。金属柱位于流道上方的排布方式共嵌入金属柱 156 个, 这种排布方式金属柱会直接接触流道中的去离子水, 导热性会更好, 但对制造工艺方面要求更高, 封装的密封性要求严格; 而金属柱位于流道间隔上方, 基板受热会更加均匀, 且仅需嵌入 144 个金属柱, 因不影响微流道结构的密封性, 其制造难度较低。

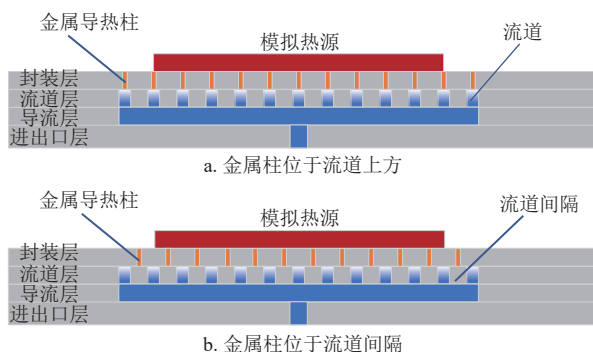


图 5 金属柱排布方式

为验证两者散热效果的差异, 设置金属柱直径尺寸为 0.25 mm 进行仿真, 图 6 为模拟热源温度分布云图。

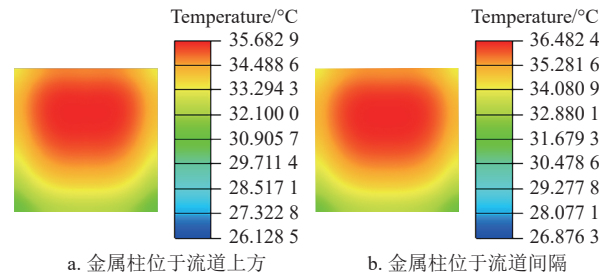


图 6 模拟热源温度分布云图

综上, 当金属导热柱位于流道上方, 模拟热源的最高温度为 35.68°C; 当金属导热柱位于流道间隔, 模拟热源的最高温度为 36.48°C, 两种结构模拟热源的最高温度相差约为 0.8°C, 说明金属柱位于流道上方的散热效果更好, 相比于没有金属柱结构的直线型微流道散热器散热效果提升了 2.1%。

3.2 金属柱深入流道层

为了进一步提高 LTCC 基板的散热效果, 本文对上述结构进一步优化, 在金属柱排列方式不变的前提下, 将金属柱深入流道层, 进而将热源的热量更好地传至流道内。图 7a 是金属柱深入流道层中的每一条流道的间隔, 这种结构只是相对于上述金属柱位于流道间隔的结构增加了金属柱的长度, 金属柱并不接触流道; 图 7b 是金属柱深入流道层的每一条流道, 金属柱深入流道内。在此情况下, 金属柱的置入会占据流道内的空间, 不可避免地导致制冷剂在流道内流动时阻力增大。而流体动力学原理表明, 流体的流速与其流经的流道横截面面积成反比关系, 即流道横截面减小(如因金属柱占据空间), 则流体流速会相应增加。因此, 虽然金属柱的存在增加了流阻, 但同时也会促使流体在剩余空间内的流速加快。流体流速与管道截面之间的关系为:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

式中, v 为制冷剂流速; Q 为单位时间通过的制冷剂流量; A 为管道截面积。当流体流速越快, 则换热能力越强, 进而散热效果越好。

为了验证两种不同金属柱排列的优化结构的散热效果, 金属柱直径尺寸设置为 0.25 mm, 对上述两种结构进行仿真实验, 结果如图 8 所示。图中金属柱深入流道间隔结构的模拟热源最高温度为

35.48℃；金属柱深入流道中结构的模拟热源最高温度为 35.24℃，两者相差 0.24℃，表明金属柱嵌入流道层中的流道底部的结构散热效果较好。

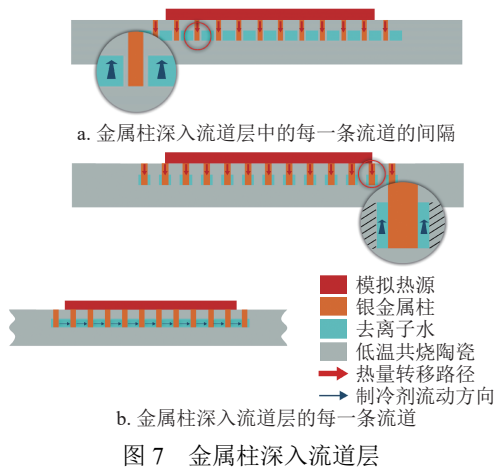


图 7 金属柱深入流道层

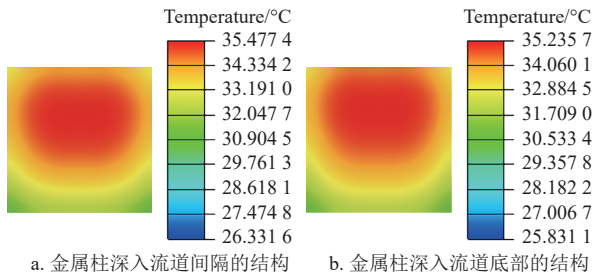


图 8 两种结构模拟热源温度云图

产生以上结果的原因主要有两个^[15]：1) 金属银的导热系数要比 LTCC 导热系数高很多，金属柱深入流道内更有利于将热量传递至制冷剂中；2) 金属柱占了一部分流道的空间，使流道中形成了一个狭小的空间，加快了制冷剂的流速，进而提高了换热效率。图 9 为两种结构制冷剂的流速分布。

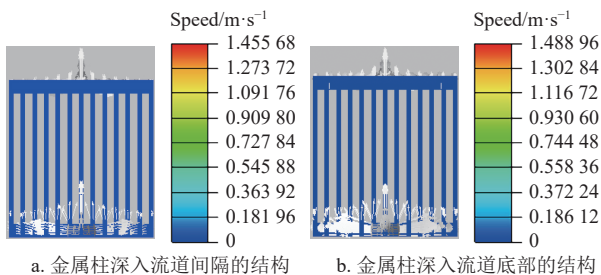


图 9 制冷剂的流速分布

上述制冷剂流速矢量图表明，当金属柱深入流道底部时，制冷剂的最大流速达到了 1.49 m/s。相比之下，当金属柱深入流道间隔时，制冷剂的最大流速为 1.46 m/s。这两种结构之间的流速差异约为 0.03 m/s。

基于流速与散热效果之间的正比关系，深入流道底部的金属柱结构因其较高的制冷剂流速，能够实现最佳的散热性能。

3.3 金属柱直径尺寸对散热效果的影响

为进一步探究金属柱深入流道层中的流道结构，金属柱直径尺寸对散热效果的影响，本文选用了 0.1、0.15、0.2 mm 这 4 种规格的金属柱直径进行了对比仿真实验，其余结构参数与前文相同，图 10 为不同直径金属柱结构的模拟热源温度云图及制冷剂流速矢量云图。

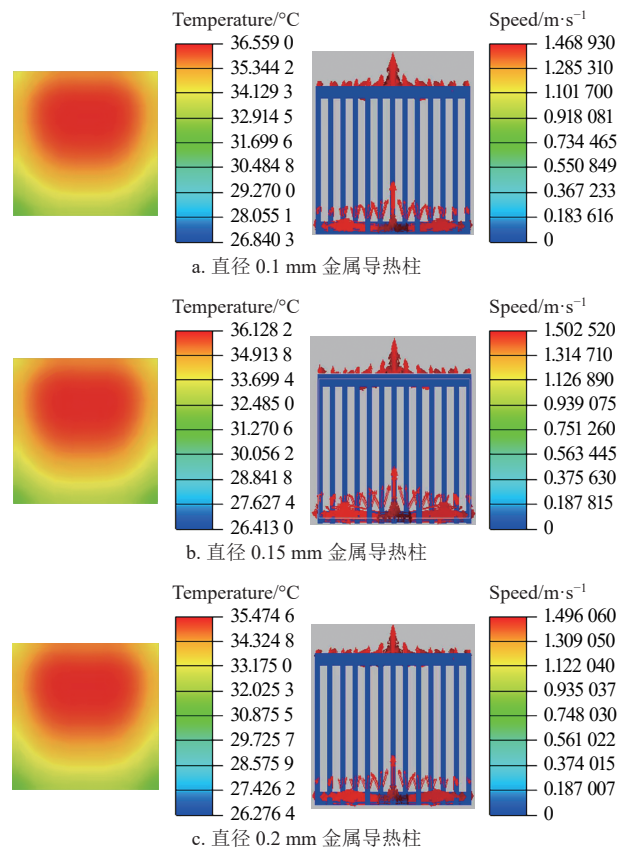


图 10 不同直径金属柱结构的模拟热源温度云图及制冷剂流速矢量云图

综合分析表明，随着金属柱尺寸的增大，微流道散热器的散热性能得到增强。这是因为金属柱深入流道内部，有效减少了流道的横截面积，从而增加了流体的流速。当金属柱的尺寸从 0.1 mm 增加到 0.15 mm 时，流速提升了大约 0.04 m/s。这种尺寸的增加限制了流道空间，加快了制冷剂的流速，使得雷诺数变大，进而努塞尔特数也随之增加，提升了散热效率。

同时，当金属柱的尺寸从 0.15 mm 增加到 0.25 mm 时，观察到散热效果继续改善，流体温度

进一步降低。这一现象表明, 随着金属柱尺寸的增加, 使得金属柱与制冷剂接触面积也逐步提升, 有助于更有效地传递热量, 从而降低流体的温度。尽管随着金属柱尺寸的增加, 流体的流速因温度降低而有所减少, 但整体散热性能的提升趋势仍然明显, 表 4 为不同尺寸金属柱深入流道底部的流道结构参数对比。

表 4 不同直径金属柱深入流道底部的流道结构仿真结果对比

金属柱直径/mm	热源最高温度/°C	基板最高温度/°C	流体最高温度/°C	流体最高流速/m·s ⁻¹
0.10	36.56	35.60	33.40	1.47
0.15	36.17	35.19	33.35	1.50
0.20	35.47	34.54	32.96	1.50
0.25	35.24	34.33	32.89	1.49

上述仿真数据证明, 直径为 0.25 mm 金属银导热柱 13 条直线型好, 相比直径为 0.1、0.15、0.2 mm 金属银导热柱直线型微流道结构散热效果分别提升了 3.6%、2.6% 和 0.67%。

3.4 金属柱长度对散热效果的影响

在上述结论的基础上, 为验证金属柱长度对散热性能的影响, 本文参照流道深度为 0.50 mm, 金属柱直径 0.25 mm, 分别取金属柱伸入流道层的流道深度 1/5、1/4、1/3 和 1/2 处, 即金属柱长度为 0.600、0.625、0.667、0.750 mm 这 4 种长度, 探讨其散热性能, 图 11 是 4 种不同金属长度结构的模拟热源最高温度, 图 12 是 4 种不同金属长度结构的模拟热源温度变化曲线。

结合图 11 和图 12 表明, 长度为 0.625 mm 金属柱直线型微流道结构中的模拟热源最高温度最低, 为 34.072 °C。金属柱入水越深, 与水接触的面积越大, 理论上可以增加热交换的效率。但随着金属柱长度增加, 会导致水流在金属柱周围形成边界层, 增加水流的阻力, 从而影响热交换效率。同时, 金属柱太长, 会导致热量在金属内部的传递效率降低, 因为热量需要通过更长的距离从金属的一端传递到另一端, 此外, 金属柱的热阻也会增加, 也会降低整体的传热效率。

表 5 为不同长度金属柱深入流道底部的流道结构仿真结果对比, 金属柱长度为流道深度的 1/4 处会产生更优异的散热效果, 相比于金属柱深入流道底部的直线型微流道结构, 散热效果又提升了 3.3%。

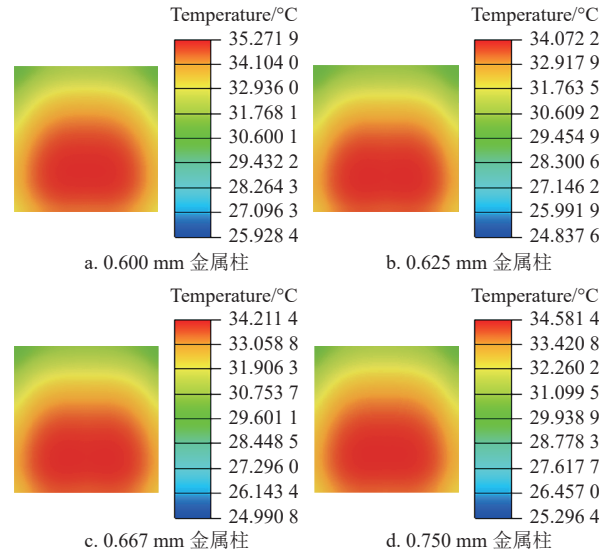


图 11 4 种不同金属长度的模拟热源最高温度

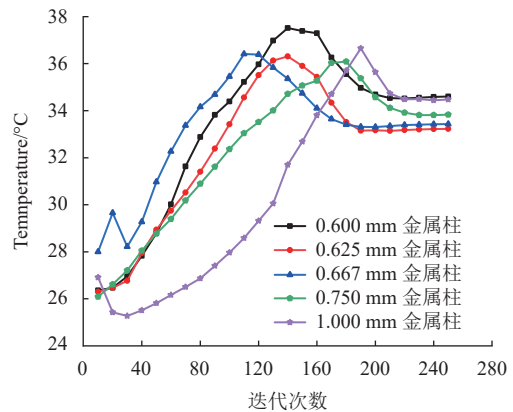


图 12 4 种不同金属长度结构的模拟热源温度变化曲线

表 5 不同长度金属柱深入流道底部的流道结构仿真结果对比

金属柱直径/mm	热源最高温度/°C	基板最高温度/°C	流体最高温度/°C	流体最高流速/m·s ⁻¹
0.600	35.27	34.36	33.56	1.46
0.625	34.07	33.19	31.57	1.46
0.667	34.21	33.31	31.74	1.49
0.750	34.58	33.66	32.14	1.49
1.000	35.24	34.33	32.89	1.46

4 结束语

由于 LTCC 基板集成度高、层数多且器件工作功率密度高, 散热问题是一个关键挑战, 因而限制了 LTCC 在大型、高性能计算机系统中的应用。本文针对散热效率低这一缺点, 对基板内置直线型微流道结构进行了流道尺寸、数量等仿真优化, 同时增设了热通孔金属柱结构。对于 15 W/cm² 甚至更大的热流密度, 13 条流道且直径为 0.25 mm、长度

为 0.6 mm 的金属银导热柱深入流道内部的直线型微流道结构具有良好的散热效果, 相比于优化前直线型 13 条流道的微流道散热器, 散热效果提升了 8.72%, 提高了系统的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 张晓辉, 郑欣. 低温共烧陶瓷材料的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(10): 797-805.
ZHANG X H, ZHENG X. Research progress of low temperature cofired ceramic materials[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(10): 797-805.
- [2] 刘俊超. 基于 LTCC 的微流道制作技术研究[J]. 机械, 2016, 43(6): 22-27.
LIU J C. Microfluidic channel fabrication technology research for low temperature co-firing ceramic(LTCC)[J]. Machinery, 2016, 43(6): 22-27.
- [3] 陈磊, 吉喆, 唐小平, 等. LTCC 基板集成微流通道散热技术[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(1): 14-16.
CHEN L, JI Z, TANG X P, et al. Integrated microfluidic cooling technology in LTCC[J]. Electronics Process Technology, 2017, 38(1): 14-16.
- [4] 刘刚, 吴玉庭, 雷标, 等. 电子芯片冷却用微型制冷系统实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 85-89.
LIU G, WU Y T, LEI B, et al. Experimental study on a miniature refrigeration system for electronics cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 85-89.
- [5] 胡独巍, 缪旻, 方孺牛, 等. 内嵌微流道低温共烧陶瓷基板传热性能(英文)[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(6): 135-139.
HU D W, MIAO M, FANG R N, et al. Heat transfer performance of microchannels in LTCC substrate[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(6): 135-139.
- [6] 朱家昌, 张振越, 郭鑫, 等. 大功率微系统的微流道结构散热特性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(6): 19-23.
ZHU J C, ZHANG Z Y, GUO X, et al. Study on heat dissipation characteristics of micro-channel structure in high-power microsystem[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(6): 19-23.
- [7] 胡海霖, 刘建军, 张孔. 基于 LTCC 的微流道散热技术[J]. 电子与封装, 2021, 21(4): 58-61.
HU H L, LIU J J, ZHANG K. The technology of micro-channel heat sink based on LTCC[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21(4): 58-61.
- [8] 刘涓, 苏全永, 施政, 等. 相控阵天线微流道液冷优化设计及性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 1782-1788.
LIU J, SU Q Y, SHI Z, et al. Optimization design and performance research on microchannel liquid cooling of phased array antenna[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(6): 1782-1788.
- [9] 张志模, 张爱兵, 汤莲花, 等. 面向三维立体集成封装的微流道散热技术[J]. 中国集成电路, 2024, 33(3): 82-90.
ZHANG Z M, ZHANG A B, TANG L H, et al. Micro-channel cooling technology for three-dimensional integration[J]. China Integrated Circuit, 2024, 33(3): 82-90.
- [10] ZHANG L Y, ZHANG Y F, CHEN J Q, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics of liquid cooling microchannels in LTCC multilayered packaging substrate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 339-345.
- [11] 李广义, 张俊洪, 高键鑫. 大功率电力电子器件散热研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 8-14.
LI G Y, ZHANG J H, GAO J X. Review on heat dissipation of high power electronic devices[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11): 8-14.
- [12] BADHE P, KALE H, DARVE R, et al. Design, fabrication, and thermal performance evaluation of cold plates for high-performance computing[J]. Sādhanā, 2024, 49(2): 117.
- [13] 王鹏飞. 基于大功率密度热源的芯片级微流道散热技术研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
WANG P F. Research on chip-level microchannel heat dissipation technology based on high power density heat source[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2022.
- [14] 肖刚, 郝沅, 杨宇军, 等. 高热导率 LTCC 基板的散热性能研究[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(2): 91-94.
XIAO G, HAO Y, YANG Y J, et al. Study on heat dissipation performance of LTCC substrate with high thermal conductivity[J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(2): 91-94.
- [15] 钟凯强, 韩飞, 焦永刚, 等. 实现微通道流量均匀分配的集流器优化研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(2): 161-167.
ZHONG K Q, HAN F, JIAO Y G, et al. Study on optimization of collector for uniform distribution of microchannel flow[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(2): 161-167.

编辑 税红