

考虑布线-通孔的陶瓷封装基板嵌入式微流道设计

彭 博^{1,2}, 王明阳², 淦作腾², 刘林杰², 杜平安¹

(1. 电子科技大学, 四川成都 610054; 2. 中国电子科技集团有限公司第十三研究所, 河北石家庄 050051)

摘要: 芯片热流密度持续增加对封装散热提出了新的挑战, 液冷微流道散热技术是解决封装热控制问题的重要研究方向. 针对陶瓷封装高功耗芯片散热需求, 本文提出在陶瓷基板上嵌入微流道, 以缩短芯片与热沉距离, 降低热阻, 同时减小热控系统体积, 实现热控、电气互连与结构的集成. 嵌入式微流道结构设计的关键是如何考虑基板上的密集布线和通孔, 避免布线、通孔和微流道的相互干涉. 考虑布线和通孔的微流道结构, 提出了微流道-布线-通孔的陶瓷基板一体化工艺方法. 测试结果表明, 微流道层位置的影响大于结构参数影响, 微流道入口主流道汇流层与散热层应设计在同一结构层. 设计的微流道陶瓷基板满足功耗 100 W 的芯片散热要求.

关键词: 布线; 通孔; 微流道; 陶瓷封装; 散热

基金项目: 国家自然科学基金(No.52175218)

中图分类号: TN305.94

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)11-3899-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230998

Design of Embedded Microchannels for Ceramic Packaging Substrate Considering Wiring and Through Hole

PENG Bo^{1,2}, WANG Ming-yang², GAN Zuo-teng², LIU Lin-jie², DU Ping-an¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract: As the heat flux of the chip continues to increase, the heat dissipation of package is a new challenge. Liquid cooling micro-channel heat dissipation technology is an important research direction to solve the problem of packaging thermal management. In this paper, microchannels embedded in ceramic substrate is proposed to solve the heat dissipation requirement of high power chip. This structure can shorten the distance between chip and heat sink, and reduce thermal resistance. It can also reduce the volume of the thermal control system, and realize the thermal control, electrical interconnection and the integration of the structure. The design of embedded microchannels structure needs to consider the dense wiring and through hole in the ceramic substrate to avoid the interference between them. An embedded microchannels structure considering wiring and through hole is designed, and an integrated processing method of micro-channel-wiring-via is proposed in this paper. The test results show that the location of embedded microchannels is more important than the structural parameters. The convergence layer and the heat dissipation layer of the main channel of the embedded microchannels should be designed in the same layer. This embedded microchannels for ceramic packaging substrate can meet the heat dissipation requirement of the 100 W chip.

Key words: wiring; through hole; microchannels; ceramic package; heat dissipation

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52175218)

1 引言

芯片热流密度持续增加对封装散热技术提出了新的挑战. 随着芯片热流密度不断增加, 一些高性能芯片的平均热流密度可达 500 W/cm², 局部热点的热流密度接近 1 000 W/cm²[1]. 自然风冷散热能力最大可达

20 W/cm², 已趋于极限. 因此出现了很多新的散热技术, 如微流道散热、相变散热、喷雾散热、石墨烯材料散热等[2,3].

图 1 所示为散热技术从空气冷却到液态冷却的演变. 可知嵌入式微流道散热具有自身优势, 因此受到广

泛重视和重点研究^[4-9]. 本文建立了微流道液冷散热和热沉风冷散热的热仿真模型(图2),通过数值仿真分析对比了两者散热效果的差异,从表1可知,在芯片功耗一定情况下,微流道液冷的散热效果明显优于热沉风冷技术.

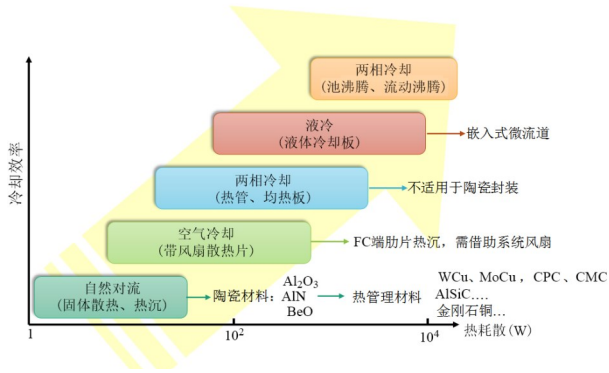


图1 散热技术从空气冷却到液态冷却的演变

但是,目前研究工作主要集中在微流道作为芯片独立的散热冷板^[10-14],用于代替传统翅片型散热器. 随着5G、人工智能、物联网等技术的飞速发展,为了充分利用空间资源,通常将多种有源芯片、无源器件集成在

十分有限空间内^[15],即系统级封装(System in Package, SiP)需求不断增加,迫切需要在有限封装空间内,既能实现电互联作用,也可满足高功率芯片的散热需求. 金属散热片和均热板等仅可实现散热要求,无法实现考虑布线-通孔的电互联作用,因此不适用于高密度、高集成度的系统级封装.

为实现微流道技术在陶瓷封装中的工程化应用,本文提出在封装的陶瓷基板上嵌入微流道,开展考虑布线-通孔的基板微流道结构研究. 设计一种考虑布线-通孔的微流道,提出微流道-布线-通孔的一体化成型工艺. 通过测试分析多层微流道结构对散热能力的影响,并通过微流道优化,提高微流道散热能力,满足芯片功耗100 W的散热要求.

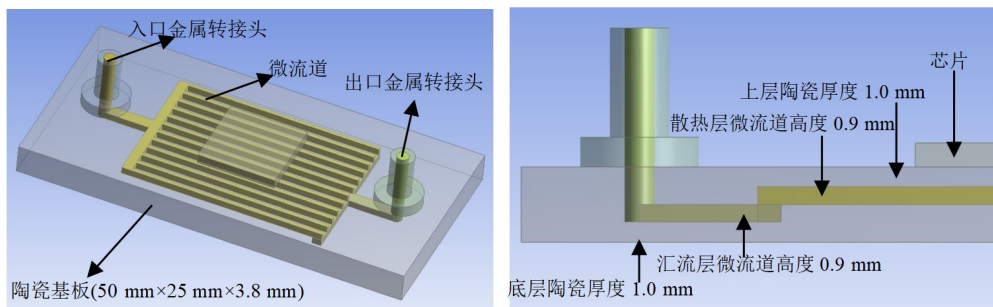
2 考虑布线-通孔的陶瓷封装基板微流道设计

2.1 微流道设计方法

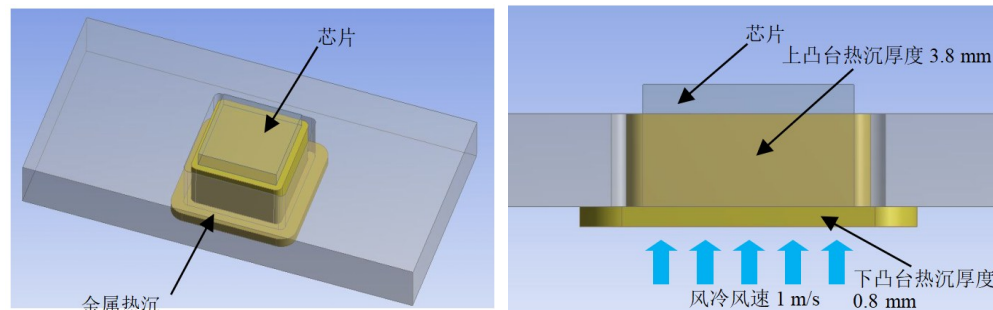
陶瓷封装是将集成电路芯片安装固定在气密性腔体内,实现对芯片的机械支撑、电气互连、散热、环境保护和电磁屏蔽. 将微流道嵌入在陶瓷基板内部,可减小芯片与热沉距离,降低热阻,同时不增加热控系统体

表1 微流道液冷技术和常规热沉风冷技术的热仿真结果

环境温度/°C	散热方案	材质	导热系数/(W/(m·K))	功率/W	散热驱动	芯片最高温/°C
25	微流道液冷	水	0.60	100	入口流量100 mL/min	132.4
25	热沉风冷	金刚石-铜	600	100	风速1 m/s	500.9



(a) 微流道液冷散热模型



(b) 热沉风冷散热模型

图2 热仿真模型示意图

积,实现热控与结构的集成. 由于封装内部存在高密度的布线和垂直通孔,本文提出考虑布线-通孔的微流道协同设计流程,如图3所示.

根据设计信息,首先设计产品外形结构,满足安装使用要求;根据电气互连要求进行布线-通孔设计,满足电性能要求;根据芯片功耗在布线-通孔约束下进行微流道设计及仿真,微流道设计会修改部分布线和通孔设计;微流道设计完成后需再次进行电性能仿真,如不满足要求则需多次迭代,直至达到设计要求.

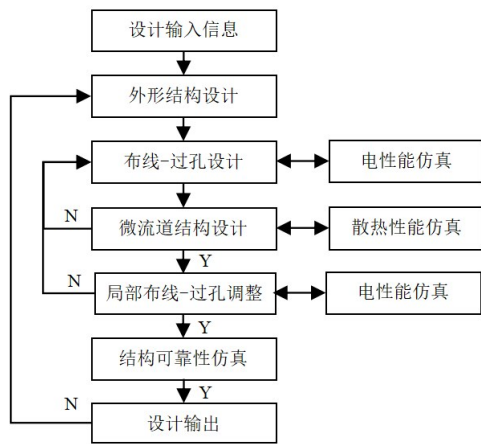


图3 设计流程

2.2 考虑布线和通孔的微流道样件设计

本文设计一款CLGA717陶瓷封装基板. 设计输入为824个电气互连网络,布线层14层,通孔数量7940个,芯片功耗100 W,芯片额定温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$. 根据图3设计流程,设计基板结构如图4所示. 样品尺寸 $53.00\text{ mm}\times 35.00\text{ mm}\times 15.65\text{ mm}$,外置通液用输入和输出口各一个,芯片安装区尺寸 $17.85\text{ mm}\times 15.20\text{ mm}$,设计3层共计812个键合区,引出端焊盘717个.

依据电气互连网络关系,设计14层电气互连网络分层及多层布线-通孔如图5所示.

将形成的多层布线-通孔(图5)作为微流道设计约束,将微流道工艺特性研究结果^[16]作为微流道结构设计规则. 设计微流道宽度 0.27 mm ,并将微流道设计在芯片安装区下方,达到微流道与芯片之间垂直距离最短.

由于基板微流道为嵌入式结构,不能设计在芯片安装区层和背面层,因此L10、L11、L12层为微流道可用层. 鉴于高温共烧陶瓷(HTCC)的工艺特点,微流道散热层与进出口汇流层不能同时位于同一层,需设计双层微流道结构. 根据L10、L11、L12各层的布线-通孔分布,本文设计分流式微流道拓扑(图6),该结构具有简洁、易于加工、流道排布紧凑等优点,设计微流道结构如图7所示.

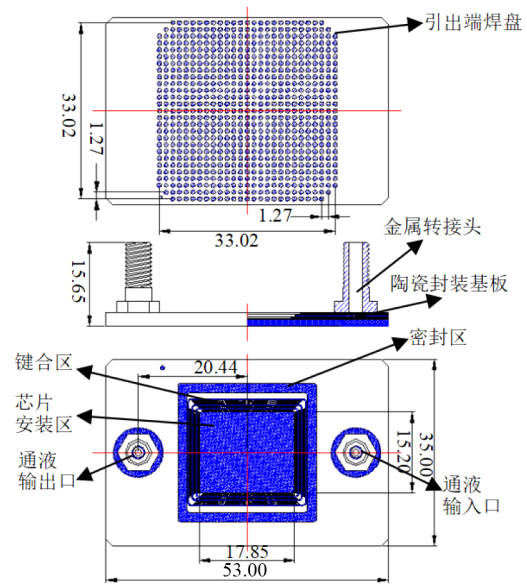
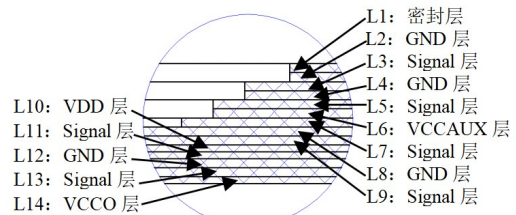
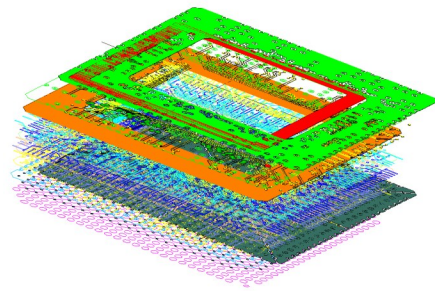


图4 陶瓷基板结构设计图(单位: mm)



(a) 电气互连网络分层



(b) 多层布线-通孔

图5 布线-通孔设计图

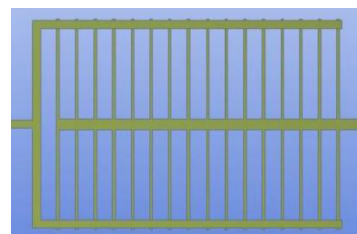


图6 微流道拓扑结构

采用腔体加工方式制备微流道. 在单层结构设计时,将微流道视为腔体结构,可依据布线-通孔设计规则确定微流道与布线、通孔的间距值. 依据此设计微流道

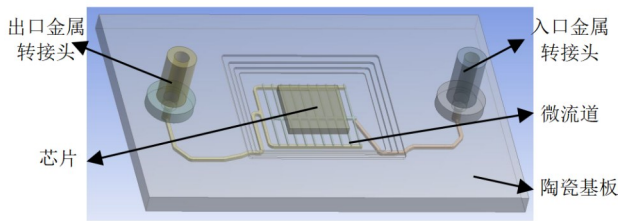
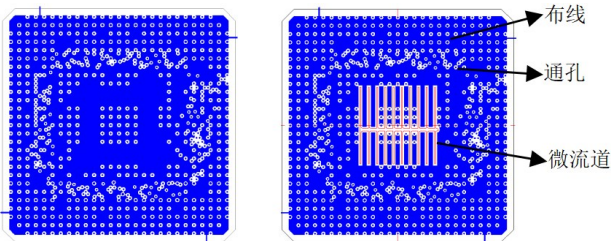
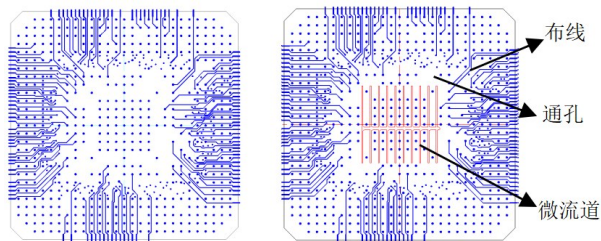


图7 微流道结构

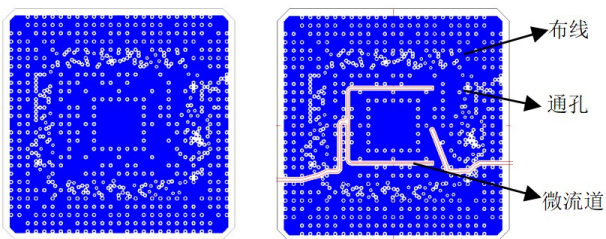
结构,并将微流道所在区域原布线-通孔进行相应调整,布线调整后对比图如图8~10所示.



(a) 原布线-通孔 (b) 增加微流道后布线-通孔
图8 CLGA717的L10层微流道与布线-通孔设计示意图



(a) 原布线-通孔 (b) 增加微流道后布线-通孔
图9 CLGA717的L11层微流道与布线-通孔设计示意图



(a) 原布线-通孔 (b) 增加微流道后布线-通孔
图10 CLGA717的L12层微流道与布线-通孔设计示意图

2.3 微流道结构设计

微流道结构设计包括微流道截面参数和微流道层的位置,本节在2.2节基础上,设计3种微流道结构,用于分析不同微流道结构对通液和散热效果的影响.

方案1:设计微流道截面高度为0.30 mm,进出口主流道截面高度为0.20 mm,微流道宽度0.27 mm,汇流层与散热层设计在不同结构层,如图11所示.

方案2:在微流道宽度和微流道结构位置不变的基础上,微流道截面高度由方案1的0.30 mm设计为

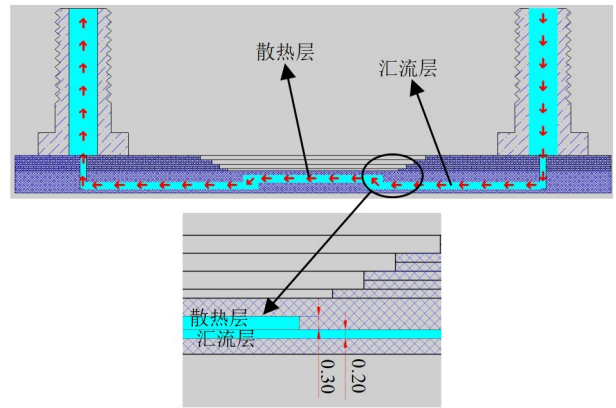


图11 方案1微流道结构设计图(单位:mm)

0.60 mm,进出口主流道截面高度由方案1的0.20 mm设计为0.60 mm,如图12所示,用于与方案1对比分析微流道截面参数的影响.

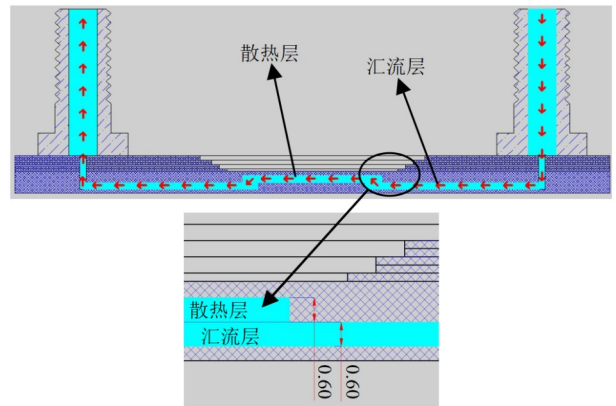


图12 方案2微流道结构设计图(单位:mm)

方案3:微流道宽度和高度均与方案2一致,将入口主流道汇流层与散热层设计在同一结构层,如图13所示,用于与方案2对比分析微流道层位置的影响.

方案1与方案2微流道位置、长度、截面宽度均一致,截面高度不同.根据哈根泊肃叶定律对应的电路中的欧姆定律,其中压差对应电压,体积流率对应电流,

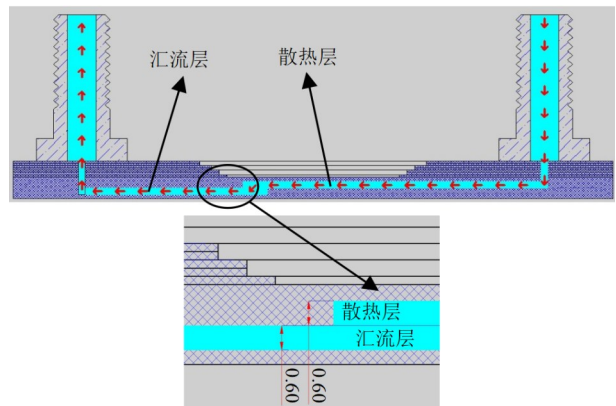


图13 方案3微流道结构设计图(单位:mm)

微流道阻力对应电阻见式(1). 从式(1)可知,微流道有效阻力 R 和微流道半径 r 倒数的四次方成正比,因此微流道半径减半会使得微流道的阻力变为原来的 16 倍.

$$R = \frac{8\eta\Delta x}{\pi r^4} \quad (1)$$

对于本文非圆形的微流道,将式(1)中的 r 替换为水力直径 d :

$$d = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

式中, A 为微流道截面面积, P 为截面润湿周长. 对于本文微流道宽度 a 、高度 b 的矩形微流道, d 为

$$d = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (3)$$

由式(3)计算可知,方案1的水力直径为 0.23 mm,方案2为 0.37 mm,方案1的水力直径是方案2的 0.62 倍,则阻力约增大 6.77 倍,阻力增大会导致进出口压差增大.

方案2与方案3微流道结构和参数均一致,只是微流道结构位置不同. 依据 Phillips 提出的测量压差公式(如式(4)所示),压差的测量结果包含了微流道弯道损失、进出口损失、发展流区影响、摩擦损失的综合作用,以及与弯道损失成正比关系,并且弯道的增加也会引起面积变化. 方案3将入口主流道汇流层与散热层设计在同一结构层,减少了弯道,并且减少了方案2在发展流区中所受的水重力和惯性阻力(图14),有效提高了通液效果.

$$\Delta p = \frac{\rho u_m^2}{2} \left[\left(A_c/A_p \right)^2 (2K_{90}) + (K_c + K_e) + \frac{4f_{app}L}{d} \right] \quad (4)$$

式中, u_m 为微流道内的平均流速; A_c 和 A_p 分别为总微流道面积和总静压室截面积; K_{90} 为 90° 弯道处的损失系数; K_c 和 K_e 为面积变化引起的收缩膨胀系数; f_{app} 为发展流区摩擦损失和附加损失的综合作用; L 为微流道长度; d 为水力直径.

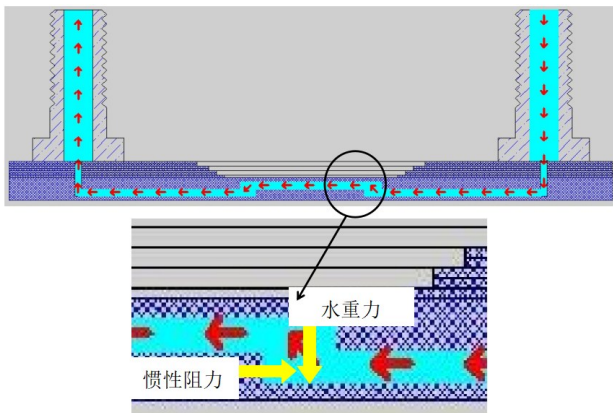


图 14 方案2#中局部受力示意图

3 考虑布线-通孔的基板微流道制备

3.1 工艺流程设计

本文采用 HTCC 工艺制作包括微流道-布线-通孔的陶瓷基板. 为满足一体加工后微流道结构及其截面形貌保持良好,并且布线和通孔的互联结构完整,本文提出一种微流道-布线-通孔一体化加工工艺,如图 15 所示. 该工艺包括生瓷片流延和组料、激光加工通孔、钨浆印刷填充通孔、钨浆印刷布线、激光冲制微流道结构腔体、多层生瓷片定位和层压、热切、高温烧结、镀镍、钎焊、镀镍和镀金等工序,其中与仅有微流道结构加工方法不同之处在于增加了形成布线的印刷工序以及制备通孔的冲孔和填孔工序,并明确了加工顺序,即先加工通孔,再做布线加工,最后加工微流道.

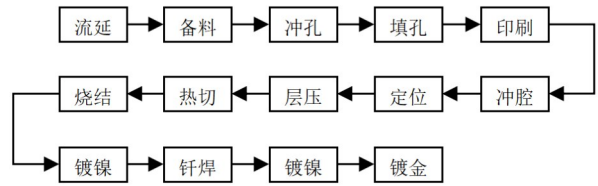


图 15 HTCC 微流道-布线-通孔一体化加工工艺流程图

3.2 样品制备

采用 90% 氧化铝流延制备单层陶瓷片,厚度公差 $\pm 20 \mu\text{m}$,以阵列方式加工. 利用激光加工单层通孔,尺寸公差 $\pm 20 \mu\text{m}$. 填孔采用专用填孔印刷机和印刷漏板,采用厚膜印刷工艺在单层上印制布线. 再利用激光加工单层腔体制备微流道,然后在不同陶瓷片之间涂覆黏结剂,便于层间结合. 再将多层陶瓷片进行叠片和层压,采用干式层压方式,以减少层压过程中生瓷片形变. 最后在热切机上切割成单个样品. 将单个样品放在承烧板上进行 1600°C 高温烧结为陶瓷体,再将表层金属布线和通孔镀镍后,采用银铜焊料将陶瓷体与金属转接头焊接为一体,再经镀镍镀金形成具有微流道-布线-通孔一体化的样品.

工艺方法主要通过控制粉体特性、陶瓷片密度、层压参数和烧结曲线等控制收缩率. 烧结作为关键工艺,主要通过确定装载量、控制烧结气氛、优化烧结曲线实现对碳残量和微流道尺寸的控制. 对于微流道截面形貌,选择 $60\pm 5^\circ\text{C}$ 的层压温度,低压力层压和 15~20 min 的层压时间,在满足层间结合强度的同时保证微流道截面尺寸和形貌良好,布线和通孔互联结构完整. 最终实现微流道-布线-通孔集成在同一陶瓷基板中,如图 16 所示,样品实物如图 17 所示.

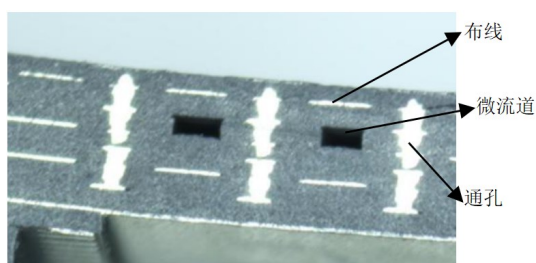


图 16 微流道-布线-通孔集成在同一陶瓷基板

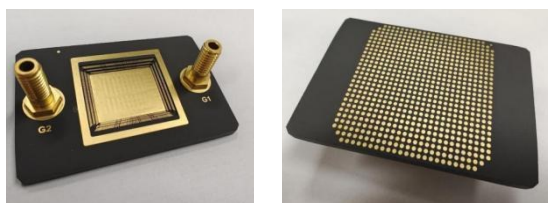


图 17 CLGA717实物图

4 考虑布线-通孔的陶瓷封装基板微流道结构测试分析

4.1 热测试片制备

常规发热片的电阻丝尺寸大,无法用于芯片级封装测试,且受限于硅衬底的材料特性,无法满足 100 W 发热需求. 本文设计一种热测试片用于模拟芯片发热,如图 18 所示. 该热测试片采用氧化铝陶瓷材料,基于 HTCC 工艺,内部采用多层布线串联,层内采用钨浆作为内金属,层间采用钨柱实现互连,表面内嵌凹槽,设置正负极加电. 将制备好的 10 mm × 10 mm × 1.2 mm 的热测试片安装在待测样品的芯片安装区,如图 19 所示.

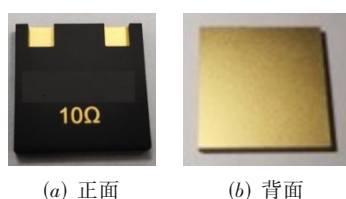


图 18 热测试片实物图

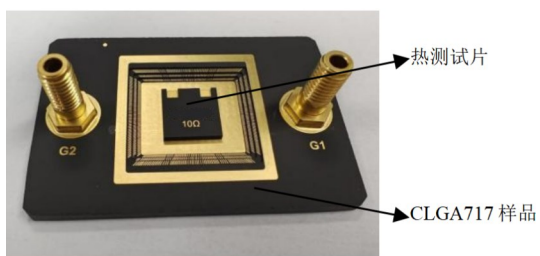


图 19 安装热测试片后样件实物图

4.2 样品热测试

采用自研液冷测试设备进行测试,如图 20 所示.

该设备集成了供液循环系统、供电系统和温度检测系统,其中供液系统提供液冷测试所需的液体工质及其循环,供电系统提供热测试片所需电源,温度检测系统通过热电偶测量芯片结温. 供液、供电和温度检测数据均实时采集与显示.

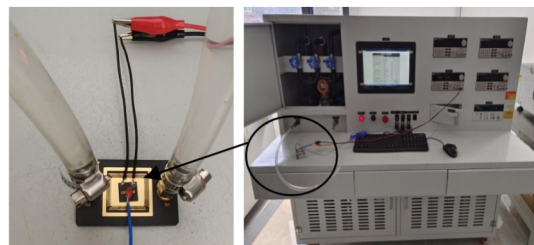


图 20 液冷测试图

4.3 样件测试结果及分析

测试条件:环境温度 22 ± 1 °C,热测试片功耗 100 W,液体工质为水. 入口流量 70 mL/min 时,试验发现方案 1 由于进出口压差过大,设备无法通液;方案 2 流动阻力仍较大,仅可进行液体工质非闭环流动,即使用计量烧杯和秒表计量流量,无法监控进出口压差;方案 3 可正常进行工质闭环流动试验. 与 2.3 节中设计结果一致,验证了设计思路的正确性.

对方案 3 增加不同入口流量及液体工质试验,结果如表 2 所示,测量温度均低于芯片额定温度 125 °C,满足芯片散热要求. 可以看出,液体工质均为水时,入口流量与进出口压差成正比关系,入口流量越大,散热效果越好. 入口流量不变,液体工质更换为导热系数更好的纳米金刚石,散热效果提高了 5%. 但由于纳米颗粒的存在,工质黏度增大,导致进出口压差增大,但仍满足设备进出口压差小于等于 690 kPa 的要求,在可使用范围内. 55% 的电子设备失效率是由温度引起的,每降低 1 °C 最高温,其失效率就会下降 4%^[17],因此在可使用范围内,优选采用纳米金刚石流体作为液体工质.

陶瓷封装产品多带有盖板结构(图 21),增加盖板后进行测试,盖板表面中心温度更低,其原因在于芯片工作所产生的热,部分经过热传导和辐射扩散至外部空气中,一部分传导至盖板上表面,因此盖板表面中心温度低于芯片表面温度.

因此,在保证进出口压差满足设备要求的情况下,微流道结构参数变化影响较小,微流道结构位置设计影响较大. 应将微流道结构层中入口主流道汇流层与散热层设计在同一结构层,采用导热系数高的液体工质,入口流量 100 mL/min,可以满足功耗 100 W 的芯片散热要求.

表 2 方案 3#不同入口流量及液体工质的试验结果

环境温度/°C	工质	工质导热系数/ (W/(m·K))	功率/W	入口流量/ (mL/min)	温度测量位置	测量温度/°C	进出口压差/ kPa
21.2	水	0.60	100	71	热测试片上表面中心	89.1	592
22.6	水	0.60	100	104	热测试片上表面中心	80.4	648
21.7	纳米金刚石	1.09	100	104	热测试片上表面中心	76.2	669
21.7	纳米金刚石	1.09	100	104	盖板上表面中心	31.8	669

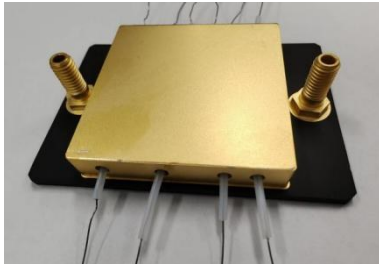


图 21 带盖板结构的嵌入式陶瓷封装产品

5 结论

本文研究了考虑布线-通孔的陶瓷封装基板嵌入式微流道结构,设计了一种考虑布线-通孔的微流道结构,提出了微流道设计流程和原则,将布线设计、通孔设计和微流道设计之间建立联系,达到信息资源共享与协调,部分修改可以同时对其他部分进行相应调整,达到整体性、一致性和共享性,并基于此方法设计了一款 CLGA717 陶瓷封装基板。

基于 HTCC 工艺,提出了一种微流道-布线-通孔一体化工艺方法,并完成样品制备。为满足热测试需要,设计一种热测试芯片用于模拟芯片发热、测试封装散热性能,并且提出一种液冷测试方法,用于解决现有技术中微流道陶瓷封装散热效果不容易验证的问题,完成测试设备的开发制作。

通过加工和测试分析不同方案下多层仿生微流道结构的影响,明确微流道结构位置设计影响大于结构参数影响,微流道结构层中入口主流道汇流层与散热层应设计在同一结构层,满足功耗 100 W 的芯片散热要求,验证了设计方法的可行性,为工程化应用奠定基础。

参考文献

- [1] WANG S, CHEN H H, CHEN C L. Enhanced flow boiling in silicon nanowire-coated manifold microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1043-1057.
- [2] VAN ERP R, SOLEIMANZADEH R, NELA L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. Nature, 2020, 585(7824): 211-216.
- [3] SARVEY T E, ZHANG Y, CHEUNG C, et al. Monolithic integration of a micropin-fin heat sink in a 28-nm FPGA[J].

IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(10): 1617-1624.

- [4] 刘涛. 微通道内单相和相变传热机理与界面特性[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- LIU T. Heat Transfer and Interfacial Characteristics in Microchannels with/without Phase Change[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [5] CHEN Y P, CHENG P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(13): 2643-2648.
- [6] XU S L, WANG W J, FANG K, et al. Heat transfer performance of a fractal silicon microchannel heat sink subjected to pulsation flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 33-40.
- [7] XU S L, LI Y, HU X L, et al. Characteristics of heat transfer and fluid flow in a fractal multilayer silicon microchannel[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 71: 86-95.
- [8] 钱吉裕, 魏涛, 王韬, 等. 高性能硅基微流道优化方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(1): 92-97.
- QIAN J Y, WEI T, WANG T, et al. Study of optimization method on silicon-based microchannel[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(1): 92-97. (in Chinese)
- [9] 孔祥举, 李力, 钱吉裕, 等. 高热流密度功放芯片冷却用两相流技术研究[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 16-19, 61.
- KONG X J, LI L, QIAN J Y, et al. Research on two-phase flow cooling technology for power amplifier chip with high heat flux[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 16-19, 61. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 陈磊, 吉喆, 唐小平, 等. LTCC 基板集成微流道散热技术[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(1): 14-16, 28, 48, 59.
- CHEN L, JI Z, TANG X P, et al. Integrated microfluidic

cooling technology in LTCC[J]. Electronics Process Technology, 2017, 38(1): 14-16, 28, 48, 59. (in Chinese)

- [12] 余怀强, 严阳阳, 彭梓, 等. 低温共烧陶瓷基板内嵌大尺度腔体工艺研究[C]//全国微波毫米波会议论文集. 广州: 中国电子学会微波分会, 2019: 400-402.

- [13] 刘兰, 陈晨, 岳帅旗. 数铣法制作 LTCC 复杂微腔槽[J]. 电子工艺技术, 2019, 40(2): 70-71, 93.

LIU L, CHEN C, YUE S Q. Process of LTCC complex micro-cavity grooves by NC milling[J]. Electronics Process Technology, 2019, 40(2): 70-71, 93. (in Chinese)

- [14] TIAN B H, YANG D M, MA H B, et al. A manufacturing method of integrated ceramic heat spreaders embedded with interconnected microchannels[J]. Materials & Design, 2019, 180: 107969.

- [15] 周礼, 唐旻, 钱佳唯, 等. 面向系统集成的散热天线设计[J]. 电子学报, 2022, 50(7): 1766-1773.

ZHOU L, TANG M, QIAN J W, et al. Design of heatsink antennas for integrated systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(7): 1766-1773. (in Chinese)

- [16] 彭博, 高岭, 刘林杰, 等. 高温共烧陶瓷微流道工艺特性[J]. 半导体技术, 2023, 48(5): 443-447.

PENG B, GAO L, LIU L J, et al. Process characteristics of high temperature co-fired ceramic with micro-channels[J]. Semiconductor Technology, 2023, 48(5): 443-447. (in Chinese)

- [17] 于慈远, 于湘珍, 杨为民. 电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究[J]. 微电子学, 2000, 30(5): 334-337.

YU C Y, YU X Z, YANG W M. A preliminary study on the techniques for thermal analysis/design/test of electronic equipments[J]. Microelectronics, 2000, 30(5): 334-337. (in Chinese)

作者简介



彭 博 女, 1983 年生, 辽宁阜新. 电子科技大学博士研究生, 中国电子科技集团有限公司第十三研究所高级工程师. 主要研究方向为电子封装及热管理技术.

E-mail: pengbo@cetc13.cn



王明阳 男, 1992 年生, 辽宁盘锦. 中国电子科技集团有限公司第十三研究所工程师. 主要研究方向为电子封装仿真及测试技术.

E-mail: wangmy@cetc13.cn



淦作腾 男, 1985 年生, 江西永修人. 中国电子科技集团有限公司第十三研究所高级工程师. 主要研究方向为电子封装工艺技术研究.

E-mail: ganzt07@cetc13.cn



刘林杰 男, 1985 年生, 山东栖霞人. 中国电子科技集团有限公司第十三研究所正高级工程师. 主要研究方向为半导体器件开发和电子封装外壳设计.

E-mail: lj.liu@cetc13.cn



杜平安 男, 1962 年生, 重庆人. 博士, 电子科技大学教授. 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