

电子封装用针翅式金刚石/铜板材制备与水冷验证

曹文鑫^{1,2}, 韩凯^{1,2}, 叶之杰^{1,2}, 赵坤龙^{1,2}, 苏振华^{1,2}, 姚泰¹, 王建东³, 赵继文⁴,

朱嘉琦^{1,2}, 韩杰才¹

(1 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150080)

(2 哈工大郑州研究院, 郑州 450000)

(3 哈尔滨工程大学, 哈尔滨, 150001)

(4 河南碳真芯材科技有限公司, 郑州 450000)

摘要: 电子封装热管理问题是阻碍集成电路发展的重要技术瓶颈之一, 金刚石/铜复合材料在热管理领域具有优异性能, 但其异构成型困难导致在电子封装水冷领域的应用十分受限, 针对此问题, 本研究利用银掺杂策略来改善坯体与复合板材之间的烧结性能, 制备出复合底板和针翅式复合底板, 并验证了复合底板、针翅式复合底板分别在间接水冷、直接水冷场景中的应用效益。研究结果表明: 银掺杂铜坯体可以与镀钨金刚石/铜复合板材具有良好的烧结性能; 复合底板、针翅式复合底板在水冷测试中分别使得发热量温度下降 5-6°C 和 4-5°C 其数值模拟结果与试验数据吻合良好, 验证了其复合结构良好的均热特性, 解决了传统封装部件热导率低以及金刚石/铜复合材料制备异型结构难的问题。

关键词: 电子封装; 金刚石/铜复合材料; 水冷; 模拟

中图法分类号: TG???

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)0?-0??-0?

1 引言

近年来电子产业高速发展, 高集成度、多功能化和高功率已经成为现在半导体产业发展的必然趋势。随之而来的是高端芯片的功率密度大幅度攀升, 目前其热流密度已突破 300W/cm², 在某些极端条件下高端芯片的热流密度甚至突破 1kW/cm², 使得热管理问题成为阻碍集成电路发展的重要技术瓶颈^[1-3]。

电子封装是通过特定工艺和材料对半导体芯片等元器件进行包裹和固定以提供机械保护、电气连接和环境隔离, 同时实现信号传输、散热管理以及确保芯片在复杂的工作环境下具有可靠性和稳定性, 最终形成可用于各种电子系统的功能模块和组件的综合性技术^[4-6]。随着电子器件集成度不断提高与功率不断增大, 芯片运行时会放出大量热量, 若不进行有效的电子封装热管理, 过高的温度将导致电子封装内部芯片性能下降、加速材料老化、引发电迁移等多种失效机制, 严重时会影响电子器件的可靠性、稳定性与使用寿命。据相关研究统计,

集成电路超过一半的失效原因可以归咎于芯片运行时的热失控, 芯片使用温度较高时, 每升高 1°C 芯片失效概率会增加 5%。因此, 科学的热管理技术是保障电子封装高性能和高可靠性的关键, 对推动电子封装技术的发展和应用拓展具有决定性意义。

实现电子封装的热管理有多种途径: 在封装结构设计层面, 依据热传导理论进行优化, 综合考量几何形状、尺寸等参数以降低热阻; 选用高导热系数的封装材料, 如高性能金属基复合材料、陶瓷材料等^[7-9]; 设计合理的散热通道, 借助流体力学原理优化气流组织以确保热量顺利排出, 避免热量积聚从而有效维持电子封装系统的热稳定性。目前常用的散热方案是利用流体介质(如水、空气等)通过高比表面的换热器将芯片热量带走以实现高效散热目的^[10-11]。

单面水冷是目前热管理散热结构中较为常用的方式。单面水冷可以分为两大类, 一类为冷板冷却型, 也被称为间接式水冷, 其结构从热端至冷端分别为芯片、焊料、覆铜绝缘基板、焊料、金属底板、热界面材料、换热器;

收到初稿日期:

基金项目: 国家青年科学基金(资助号: 52102039); 中国博士后科学基金(资助号: 2021M700036, 2023T160156); 黑龙江省重点研发计划(资助号: GA21D001, 2022ZX06C05, 2024ZX12C08, JD2023SJ13); 中国航空科学基金(资助号: 2022Z065077001)

作者简介: 曹文鑫, 男, 1989 年生, 博士, 研究员, 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江省 哈尔滨 150080, E-mail: caowenxin@hit.edu.cn;

韩凯, 男, 2002 年生, 硕士生, 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江省 哈尔滨 150080, E-mail: BaoWenBei2024@163.com。

通讯作者简介: 姚泰, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江省 哈尔滨 150080, E-mail:

yaotai@hit.edu.cn; 王建东, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江省 哈尔滨 150001, E-mail: wangjiandong@hrbeu.edu.cn。

另一类为底板冷却型，也被称为直接式水冷，其结构从热端到冷端分别为芯片、焊料、覆铜绝缘基板、焊料或烧结银、金属底板换热器。底板冷却型相比较于冷板冷却型最大的优势是不使用高热阻的热界面材料，将金属底板和换热器合二为一，大幅提升散热效率，但这种工艺也对基板和金属底板的钎焊工艺提出了更高的要求，由于两者之间的热膨胀系数存在较大差异，因此常常使用低膨胀系数的材料作为金属底板，如碳化硅铝、硅铝等。

无论是冷板冷却型还是底板冷却型，其水冷方式都希望电子封装材料有较高的导热系数和较低的热膨胀系数，尤其是底板冷却型更是希望换热器能够与金属底板能够直接异构型，能够显著的提升生产效率与器件工作效率^[12-14]。金刚石作为自然界热导率最高的物质，其热导率可以达到 2400W/mK，是常用的电子封装材料纯铜的 5 倍以上，金刚石与铜进行复合后能够兼顾金刚石的热导率与铜的延展性，其热膨胀系数还可通过调整金刚石含量等手段进行调控，被视为下一代高效热管理材料的理想候选^[15-17]。然而，金刚石本身的硬度极高，且与铜基体间界面结合性较弱，使得金刚石/铜复合材料(D/Cu)本身制备较为困难。金刚石与纯铜坯体的烧结性能也较差，使得其金刚石/铜复合材料的异构型难以实现，严重的限制了金刚石/铜复合材料优异导热性能在高功率场所下的应用^[18-20]。

当前，粘结剂喷射 3D 打印技术为解决金刚石/铜复合材料高功率场景应用提出了新的思路与方法。相比于传统的粉末冶金、熔渗工艺，粘结剂喷射 3D 打印能够制备形状复杂的复合材料。相比于选择性激光熔化、电子束熔化等技术，粘结剂 3D 打印可以在低温下成型，可以大幅度减少样品的热裂纹、高温翘曲等缺陷^[21-24]。目前利用粘结剂喷射 3D 打印技术实现复合材料异构型少有报道，关于金刚石/铜复合材料异构型的 3D 打印的研究则更为稀少。

本研究针对金刚石/铜复合材料异构型难、无法直接应用于电子封装散热的问题，利用粘结剂喷射 3D 打印技术在金刚石/铜复合板材表面打印坯体，制备出针翅式金刚石/铜复合冷板，并将金刚石/铜复合底板与针翅式复合冷板分别在间接水冷、直接水冷场景中进行应用验证，深入探讨其在高功率电子器件热管理中的应用潜力，为高效电子封装散热提供创新的解决方案，具有非常重要的理论意义与实际应用价值。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料与表征

本实验所使用的金刚石原料购于中南钻石有限公

司(3型料，30/32目)，所使用到的钨粉、氧化钨粉、铬粉、铜粉、银粉均购于上海麦克林生物科技有限公司，铜片即为普通商用铜片。粘结剂喷射 3D 打印的粘结剂为热引发型丙烯酸酯体系胶水，由三乙二醇二甲基丙烯酸酯(80wt%)、聚乙二醇 400-二丙烯酸酯(20wt%)及过氧化苯甲酸叔丁酯(2wt%)组成。陶瓷发热体基材为氧化铝，内部发热体为烧结钨，接通电源后发热，陶瓷发热片的整体尺寸为 10mm*10mm*1.2mm，发热区域尺寸为 5mm*5mm*1.2mm。导热硅脂为商用导热硅脂，其热导率约为 5 W/mK。

金刚石表面镀钨、冷板表面镀钨均采用粉末覆盖扩散镀钨方法，其镀覆细节在之前的研究中有详细介绍^[25]。采用型号为 PCM450 的粘结剂喷射 3D 打印机成型坯体，采用型号为 LFA 467 MicroFlashTM 的激光导热仪测量样品的热扩散系数(α)和比热容(C_p)，采用阿基米德排水法得到材料的密度(ρ)，通过公式 $\lambda=\alpha\cdot\rho\cdot C_p$ 计算得到材料的热导率(λ)。采用电子万能试验机测试坯体烧结后与底板的剪切强度，具体过程为：坯体为直径 6mm、高 6mm 的圆柱体，将底板固定在测试台上，控制压头下压速度为 0.5mm/min，由电子万能试验机记录剪切强度。采用配备了能谱(EDS)、背散射(BSE)等探头的泰斯肯 MAGNA 高分辨场发射扫描电子显微镜对材料的微观结构进行观察。采用高精度红外热成像仪(型号 H16 PRO)对材料散热情况进行拍摄。

2.2 冷板的制备

2.2.1 复合底板的制备

Cr 元素具有比 W 元素更高的反应活性，可以促进制备底板过程中 W 镀层与金刚石表面反应生成碳化物，从而促进界面结合，故选择使用 Cr 对镀 W 金刚石进行掺杂。其具体制备流程如下：将 Cr 掺杂的 30/32 目镀钨金刚石铺于 0.18mm 厚的铜片上，堆叠 4 层后在其上方额外放置一片 0.18mm 厚的铜片将裸露的金刚石覆盖；将叠层后的金刚石/铜复合材料板材置于热压炉内，以 30MPa 压力在 1050℃ 保温 2 小时后冷却；将金刚石/铜板材双面均匀研磨，直至尺寸达到 2 mm 厚度；使用绿光激光将金刚石/铜板材切割成规定形状。所制备的金刚石/铜底板如图 1(a)所示。通过研磨加工处理，将金刚石/铜复合板材表面铜层去除，在复合板材表面均匀地裸露出大量的金刚石增强相。在 0℃ 至 150℃ 区间内对研磨后的复合材料热导率进行重新测试，结果如图 1(b)所示，金刚石/铜复合板材的热导率在 580 W/mK 至 750 W/mK 之间。

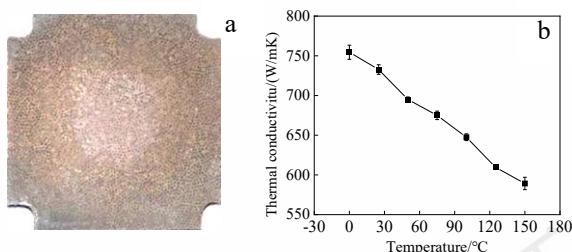


图 1 金刚石/铜复合底板和热导率变化

Fig.1 Diamond/Cu composite base plate and thermal conductivity variation

(a) Composite base plate; (b) Thermal conductivity variation

2.2.2 针翅式冷板制备

Cr掺杂镀钨金刚石/铜复合材料板材底座制备后,对板材进行磨削,通过选择性镀覆工艺对底座中裸露的金刚石进行表面镀钨,通过原位固化粘结剂喷射3D打印工艺在板材底座表面打印含10wt%Ag粉末的铜基粉材,得到针翅结构毛坯,其直径为3.6mm,高度为5mm。将打印后底座表面的粉尘去除,置于1000℃的氢气气氛箱式电阻炉内保温1h后随炉冷却并取出,得到的复合冷板针翅高度约4.4mm、直径约3.3mm且底座平整无翘曲。图2为金刚石/铜复合针翅式冷板成形工艺流程图。图3为金刚石/铜复合针翅式冷板实物图。

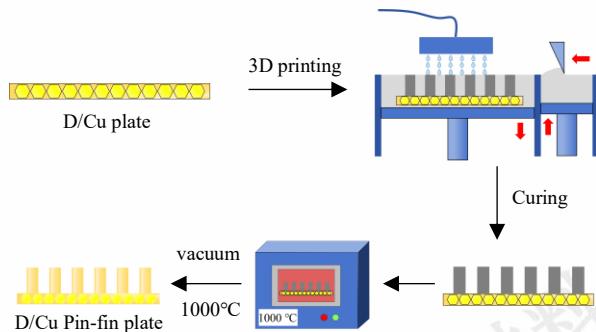


图 2 金刚石/铜复合针翅式冷板成形工艺流程图

Fig.2 Process flow chart of diamond/copper composite pin-fin type water-cooled plate forming

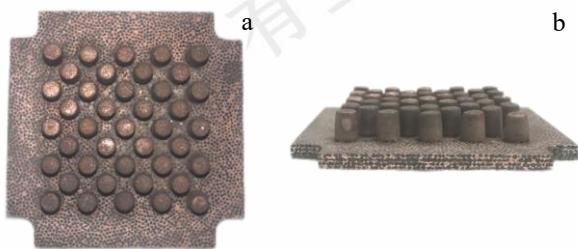


图 3 金刚石/铜复合针翅式冷板实物图

Fig.3 Physical picture of diamond/copper composite pin-fin type water-cooled plate
(a)Main view; (b)Side view

2.2.3 水冷散热平台搭建与数值模拟

搭建底板间接水冷和冷板直接水冷散热结构,其结构图如图4所示。底板间接水冷结构包括:压板、陶瓷发热片、导热硅脂、底板、导热硅脂、针翅式水冷板、水冷壳体,其中底板为金刚石/铜或者纯铜。冷板直接水冷结构包括:压板、陶瓷发热片、导热硅脂、针翅式水冷板、水冷壳体,其中针翅式水冷板为金刚石/铜或纯铜。针翅式水冷板、水冷壳体、底板的具体结构如图5所示。当材质为铜材时,底板、冷板以及壳体由T2紫铜数控机械加工而成;当使用金刚石/铜时,底板和冷板先通过双面研磨设备研磨至规定厚度,再结合激光切割或3D打印工艺实现所需结构加工。冷板和壳体间通过螺栓紧固并安装密封圈防止漏水。

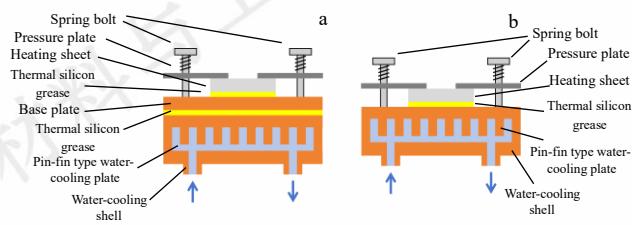


图 4 水冷测试平台结构

Fig.4 Structure of water cooling test platform

(a) Indirect water-cooled structure; (b) Direct water-cooled

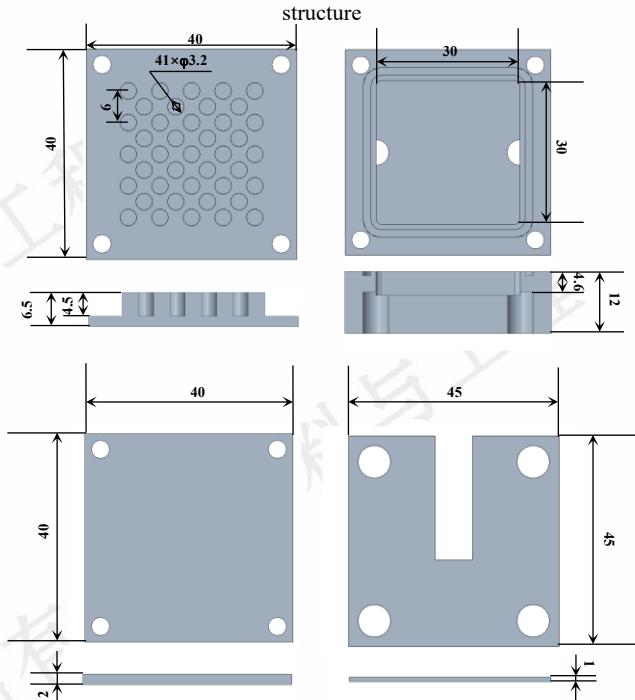


图 5 水冷头主要结构尺寸

Fig.5 Key structural dimensions of water block

(a) Pin-fin type water-cooling plate; (b) Water-cooling shell

(c) Uniform heating base plate; (d) Metal pressure plate

散热测试平台示意图如图6所示,除水冷头部件外主要组成包括:(1) 直流电源,最大输出功率为300W,

输出电压为 30 V, 输出电流为 10 A; (2) 涡轮流量计, 可监控水流流量, 在本论文中水冷流量为 40 L/h; (3) 水泵, 通过电源无极调节出水量, 配合流量计确保测试平台水冷一致; (4) 流体温度计, 在水冷壳体入水口处设置一个水流温度计, 记录实验过程中冷却水温度的变化情况; (5) 红外测温仪, 记录陶瓷发热片的温度变化, 在测试时保持发热体与相机距离不变。

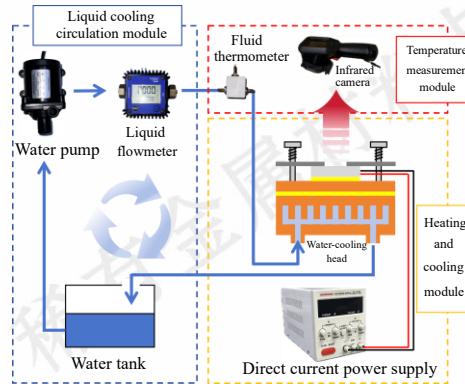


图 6 水冷测试平台示意图

Fug.6 Schematic diagram of the water cooling test platform

基于有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 建立了水冷测试平台的三维流体传热数值模型, 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对针翅式水冷板内流体流动与传热过程进行模拟计算。图 7 为间接水冷测试平台结构图与网格图, 主体区域网格尺寸 0.5mm, 热源区域网格加密至 0.2mm, 直接水冷采用相同的方法进行网格划分。鉴于模拟工况温度波动范围较小, 在 FVM 数值模拟中采用恒定物性参数假设, 设定材料热物性参数保持稳定 (详见表 1), 其中冷却水动力黏度采用 25°C 值 1.003 mPa · s。冷却水入口温度为 300 K, 流量设置为 40 L/min 与实验平台水流量保持一致。忽略空气的自然对流和热辐射对系统的影响。在发热体、底板以及冷板之间接触的对应位置处建立厚度为 0.1mm 的界面层作为导热硅脂。

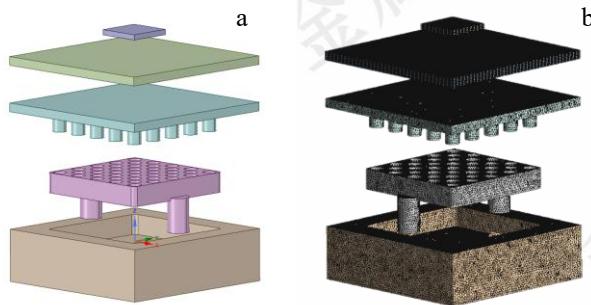


图 7 间接水冷散热平台结构图与网格图

Fig.7 Structure diagram and grid diagram of the indirect water-cooling heat dissipation platform
(a) Structure diagram; (b) Grid diagram

表 1 材料参数

Table.1 Material parameters

Material	Thermal conductivity(W/m·K)	Density (kg/m ³)	Specific heat capacity (J/kg·K)
Cu	400	8950	385
Silicone grease	5	2000	1500
Alumina	30	3920	880
Water	0.6	1000	4182

3 结果与分析

3.1 坯体掺杂与复合板材表面镀覆

表 2 列出了胚体与未磨削复合底板烧结后的部分性能, 考察了烧结后胚体的致密度、胚体与底板的剪切强度、烧结铜的热导率以及底板的热导率。由银铜二元平衡相图可得, 在 1000°C 时 5wt% 银的掺杂时, 平衡态下几乎全部为固态铜相; 10wt% 银掺杂时, 固相与液相比例约为 2:1; 20wt% 银掺杂时, 几乎全部为液相。固相状态原子扩散速度慢, 各项性能较差; 固液共存态利于原子扩散, 各项性能较好。纯液态无法达到成型目的。因此, 选用 10wt%Ag 掺杂铜为烧结坯体。

表 2 烧结后胚体与底板的性能

Table.2 Properties of green body and base plate after sintering

Sample	Temperature (°C)	Compa ctness	Shear strength (MPa)	Thermal conductivi ty (W/mK)	Thermal conductiv ity (base plate) (W/mK)
Cu	1000	0.764	12.28	166.8	635.1
0.95Cu0.05Ag	1000	0.846	23.81	235.1	635.1
0.9Cu0.1Ag	1000	0.929	64.73	342.5	635.1

为改善坯体与磨削后底板表面裸露的金刚石之间的结合强度, 对磨削后底板表面进行镀钨处理。图 8(a)为磨削后的复合底板镀钨处理后表面形貌与元素分布图。金刚石表面覆盖致密的钨单质, 无金刚石裸露, 铜基体处未检测到大量钨元素附着。经测量, 金刚石/铜复合板材经过磨削直接与 10wt%Ag 坯体烧结, 其剪切强度为 14.2 MPa, 经磨削并镀钨处理后, 10wt%Ag 坯体与复合基板烧结后的剪切强度为 44.52 MPa, 力学性能显著提升。图 8(b)(c)为镀钨处理后复合底板与坯体的断口形貌与元素分布图, 金刚石一侧残留钨镀层, 说明钨镀层与金刚石具有一定结合强度; 大部分钨镀层粘附在烧结坯体一侧, 表明镀层与铜银合金结合良好。镀钨处理可以改善

复合基底与坯体烧结强度，有助于提升力学性能并降低界面热阻。

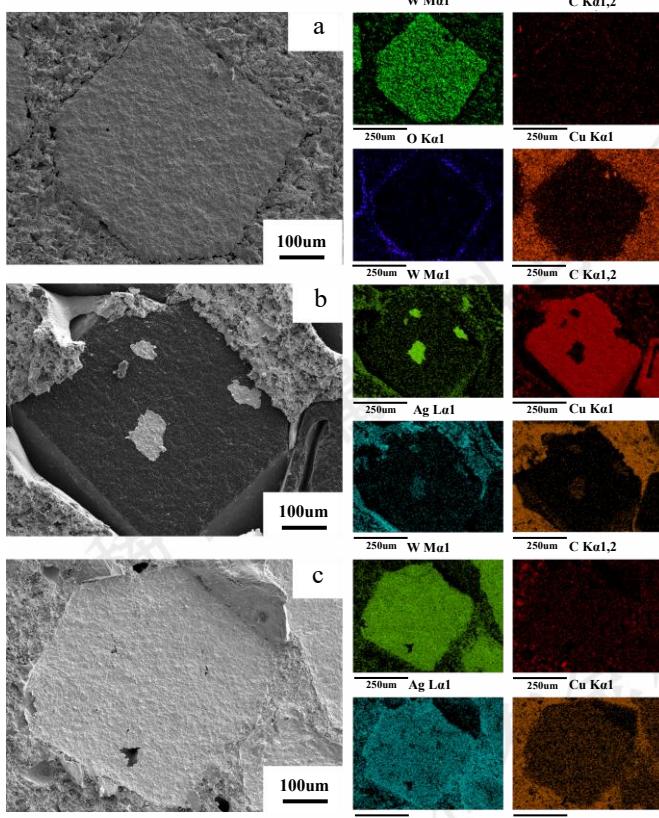


图 8 镀钨处理后复合底板与胚体断口

Fig.8 W-coated composite plate and green body fracture surface

- (a) W-coated composite plate;
- (b) Side fracture of base plate;
- (c) Side fracture of green body

3.2 复合材料底板间接水冷测试

图 9 为发热功率 70 W 时发热片的温度分布状态。其中图 9(a)(b)为 FVM 数值模拟结果，图 9(c)(d)为实物测试平台结果。由于有效发热区只占发热片的一半面积，因此实际发热功率达到了 140 W/cm²，发热端温度达到了 80°C，接近实际工程中的应用场景。发热片的热源区域内的功率密度不是均匀分布，而是集中在热源区域的中间部分，因此红外相机成像结果显示发热片中心区域温度最高，热源边缘温度低。在 FVM 模拟过程中，为了简化模型，热源内的功率均匀分布，因此在温度分布云图中显示有效发热区域没有呈现出心部温度高、边缘温度低的特点，而是呈现出下端温度高、上端温度低的特点。图 10 展示了不同条件下发热片的最高温升以及金刚石/铜替换铜后在温度变化上的收益。在测试范围内，数值模拟的结果与试验数据吻合度良好。尽管在具体数值和温度分布状况上存在部分差异，但这些差异并不会对测试的结果造成显著的影响，数值模拟依然可以作为实际测试平台的参考。根据温度分布状态可知，使用金刚石/铜复合底板对铜底板的替代，发热片的温升得到了缓解，在 70 W 功率下可以使发热片最高温度下降 5-6°C，

可提升间接水冷封装的散热表现。

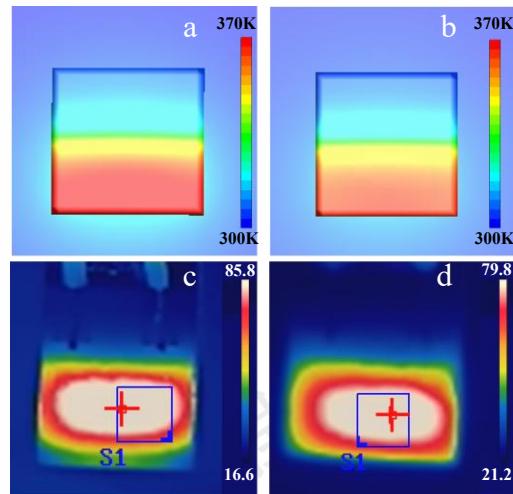


图 9 发热片温度分布云图

Fig.9 Temperature distribution contour of the heating element

- (a) Cu-Simulation; (b) D/Cu-Simulation; (c) Cu-Experiment;
- (d) D/Cu-Experiment

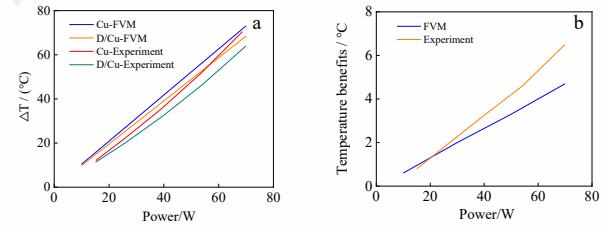


图 10 发热片最高温升和收益

Fig.10 Maximum temperature rise and efficiency gains of the heating element

- (a) Maximum temperature rise;
- (b) Efficiency gains of the heating element

图 11 分别展示了铜底板和金刚石/铜复合底板的温度分布情况。热传导问题得傅立叶公式为：

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中 Q 为单位时间通过计算区域界面垂直方向总热流， k 为热导率， A 为垂直热流方向截面积， x 为距离， T 为温度。当热流 Q 和截面面积 A 固定时，温度梯度越小则热导率更大，即具有更好的均热效果。由图 11 可看出金刚石/铜复合底板的温度梯度低于铜底板的温度梯度，表明金刚石/铜底板可以实现对热源的高效均热，从而加速热量从热源传递到冷板。

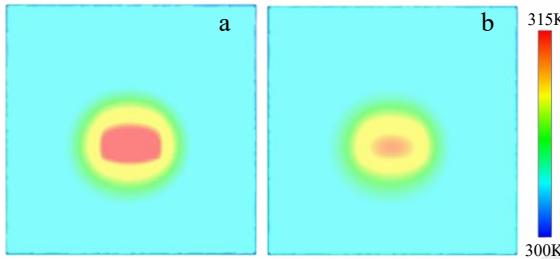


图 11 底板温度分布

Fig.11 Temperature distribution of the base plate

(a)Cu plate; (b) D/Cu plate

复合板材替换铜底板的收益可以通过由冷板引起的热阻表示^[26]:

$$R = R_c + R_{1D} \quad (2)$$

$$R_{1D} = \frac{t}{kA} \quad (3)$$

式中, R 总热阻, R_c 扩散热阻, R_{1D} 一维热阻, t 为温度, k 为热导率, A 为平面得面积。

热阻收益可以表示为:

$$\Delta R = \Delta R_c + \frac{t}{A} \left(\frac{1}{K_{Cu}} - \frac{1}{K_{D/Cu}} \right) \quad (4)$$

式中, ΔR 为总热阻变化, ΔR_c 为扩散热阻变化, K_{Cu} 铜的热导率, $K_{D/Cu}$ 金刚石铜热导率。

图 12 为不同条件下系统的热阻和总热阻收益。在 FVM 中系统热阻基本上不随着功率的变化而改变, 而试验结果表明系统总热阻与功率存在关联。这是因为在模拟中认为导热胶和发热片的热导率恒定, 而实际情况是两者的热导率均受温度影响显著。当温度上升时, 导热胶和发热片的热导率下降。因此, 当功率提升时, 系统温度上升, 导热胶和发热片热阻提升导致整体热阻上升。图 12(b)是复合底板替换后的热阻收益。在 FVM 中平台热阻收益与功率基本没有关系, 金刚石/铜底板可以使该系统的总热阻下降约 0.06 K/W。根据热阻公式, 其中垂直底板热阻的收益为 0.00238 K/W, 扩散热阻的收益为 0.0576 K/W, 占总收益的 96%, 说明金刚石/铜底板所带来的收益主要来自于均热效果。在试验平台中, 热阻的收益与功率相关, 即功率越高, 热阻收益越大, 表明除了底板材料替换所带来的直接热阻的改变外还存在其它因素影响着热阻收益的变化。这是由于金刚石/铜底板替换后, 降低了导热硅脂和发热片的温度, 从而进一步降低了系统整体的热阻。当功率为 70 W 时, 总热阻下降了约 0.1 K/W, 使整体热阻降低了约 10 %, 显著提升了间接水冷封装的散热表现。

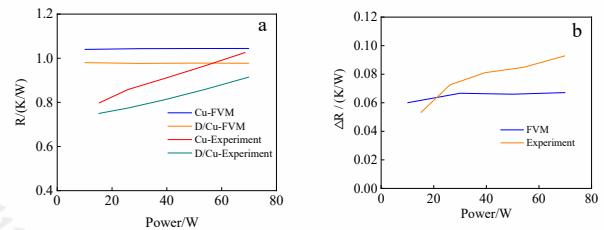


图 12 系统热阻和热阻下降值

Fig.12 System thermal resistance and thermal resistance reduction

(a) System thermal resistance; (b) Thermal resistance reduction

3.3 针翅式冷板直接水冷测试

图 13 是发热功率为 70 W 时发热片的温度分布情况。图 13(a)和(b)是 FVM 模拟的发热片温度分布云图, 其有效发热区为发热片的下半部分, 发热功率密度为 140 W/cm², 且分布均匀。根据温度云图显示, 有效发热区下端的温度高, 上端温度低。使用金刚石/铜复合冷板时, FVM 结果显示发热片的温度较纯铜冷板相比明显下降。图 13(c)和(d)是红外相机对直接水冷平台实物发热片温度分布成像图。其温度分布与 FVM 结果有一定差异, 呈现出有效发热区的心部温度高, 四周温度低的特点, 这是由于发热片的发热功率分布不均匀导致的。但与 FVM 结果一致的是, 使用金刚石/铜复合冷板替代纯铜冷板后, 发热片的最高温度明显下降。

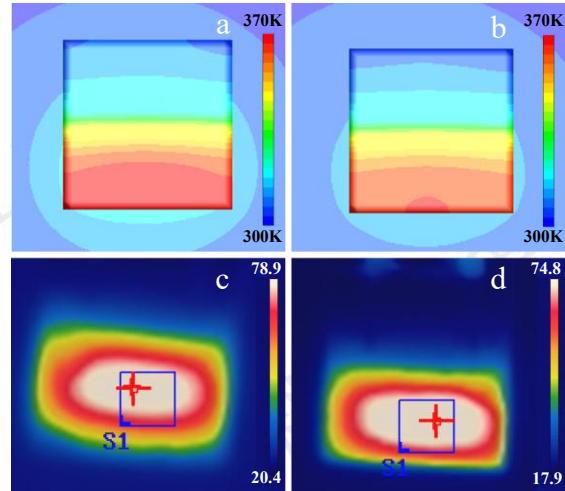


图 13 发热片温度分布云图

Fig.13 Temperature distribution contour of the heating element
(a)Cu-Simulation; (b)D/Cu-Simulation; (c)Cu-Experiment;
(d)D/Cu-Experiment

图 14(a)展示了直接水冷平台发热片的最高温升结果, 无论是 FVM 数值模拟还是实物平台, 随着发热功率的变化金刚石/铜复合冷板平台的温升始终低于纯铜冷板平台的温升。FVM 结果与实物平台结果保持高度相似性, 说明 FVM 数值模拟可以准确反映金刚石/铜复合直接水冷散热封装的性能表现。图 14(b)展示了复合冷板替代纯铜冷板时的最高温度收益情况, 当发热功率达到

70 W 时，最高温度收益在 4-5℃ 之间。

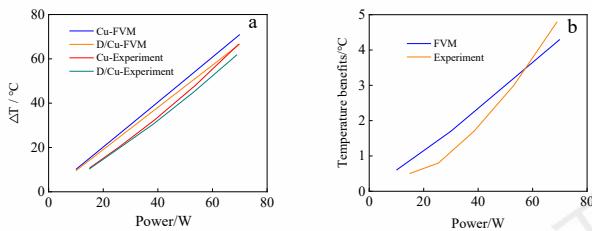


图 14 发热片最高温升和收益

Fig.14 Maximum temperature rise and efficiency gains of the heating element

(a) Maximum temperature rise; (b) Efficiency gains of the heating element

图 15 是冷板的 FVM 温度分布云图。金刚石/铜冷板的温度梯度显著低于纯铜冷板的温度梯度，即中间温度纯铜冷板高，而冷板边缘温度金刚石/铜冷板高，表明金刚石/铜复合底座的良好的均温特性。图 16 为不同条件下系统的热阻和总热阻收益。与间接水冷情况相同，FVM 系统热阻与实际热阻随功率的变化趋势有差别，这也是因为在模拟中认为导热胶和发热片的热导率恒定，而实际上两者的热导率均受温度影响显著。当温度上升时，导热胶和发热片的热导率下降。故而当功率提升时，系统温度上升，导热胶和发热片热阻提升导致整体热阻上升。根据数值模拟的热阻结果，纯铜与金刚石/铜冷板的系统热阻分别为 1.01 K/W 和 0.95 K/W，且与温度无关，复合冷板替换纯铜冷板使系统整体热阻下降了约 0.06 K/W，这与金刚石/铜复合板材间接水冷散热提升效果一致，即主要受到了扩散热阻 RC 改善的贡献。根据实际的试验平台的结果分析，系统的整体热阻与温度呈现正相关关系，即随着温度上升，整体热阻上升，这同样是由于温度对导热硅脂和发热片热导率的影响：温度越高，导热硅脂和发热片热导率越低。当发热功率为 70 W 时，整体热阻分别约为 0.97 K/W（纯铜）和 0.90 K/W（金刚石/铜）。此外，整体热阻收益同样地与温度呈现正相关关系，这是由于金刚石/铜冷板替换纯铜冷板后，降低了导热硅脂和氧化铝发热片的温度，从而进一步降低了系统整体的热阻。当发热功率为 70 W 时，复合冷板替换纯铜冷板使系统整体热阻下降了约 0.07 K/W（约为 7%），显著提升了直接水冷封装的散热效果。

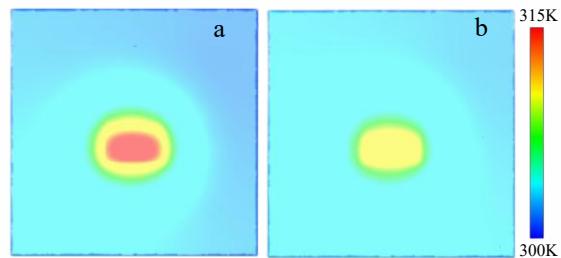


图 15 冷板温度分布

Fig.15 Temperature distribution of the cold plate

(a)Cu plate; (b)D/Cu plate

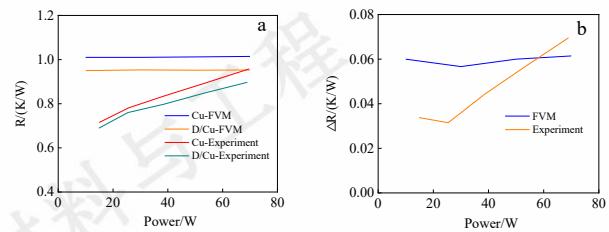


图 16 系统热阻和热阻下降值

Fig.16 System thermal resistance and thermal resistance reduction

(a) System thermal resistance; (b) Thermal resistance reduction

4 结论

利用原位固化粘结剂喷射 3D 打印成型技术在金刚石/铜复合材料表面成功制备银掺杂铜坯体并通过搭建水冷测试平台验证了制品在间接水冷与直接水冷场景中的应用效益，解决了金刚石/铜复合材料异构成型困难的问题，使得高导热金刚石/铜复合材料在电子封装散热领域得以直接应用，具有显著的实际应用意义。其具体结论如下：

(1) 在纯铜粉中掺杂 10wt%Ag 可使得坯体与基板的烧结致密度提升至 92.9%，坯体热导率达到 342.5W/mK，相较纯铜坯体提升 47%；通过底板表面扩散镀镍，使底板与银铜坯体的剪切强度由 14.2MPa 提升至 44.52MPa 且界面热阻显著下降。

(2) 通过间接水冷测试平台对比分析了复合底板与纯铜底板的散热性能，在 70W 发热功率 (140W/cm^2 热流密度) 工况下，复合底板使发热片最高温度降低 5-6℃，系统总热阻下降约 10%；对 FVM 数值模拟结果的热阻分析表明，复合材料使底板的扩散热阻降低了 0.0576 K/W，占总热阻收益的 96%，验证了其作为高效均热板的工程应用价值。

(3) 通过直接水冷测试平台对比分析了针翅式复合冷板与纯铜底板的散热性能，在 70W 发热功率下，复合冷板使发热片最高温度降低 4-5℃，系统整体热阻下降 0.07K/W（降幅 7%）；数值模拟与实验数据高度吻合，验证了复合结构优异的均温特性，温度梯度较纯铜冷板

大幅降低。这种性能提升源于金刚石/铜基底的高热导率与3D打印针翅结构的协同作用，突破了传统封装部件热导率低以及金刚石/铜复合材料难制备异型结构的技术瓶颈。

参考文献 References

- [1] Wu N, Sun M, Guo H, et al. Advanced Engineering Materials[J], 2024, 26(16): 2400566.
- [2] Gao Zhongtang(高忠堂), Duan Di(段迪), Peng Lamei(彭腊梅) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(08): 2321-2330.
- [3] Li X, Yang W, Sang J, et al. Journal of Alloys and Compounds [J], 2020, 846: 156258.
- [4] Zhang Xun(张迅), Wang Xiaolong(王晓龙), Li Yuhang(李宇航) et al. Electronic Components and Materials(电子元件与材料)[J], 2024, 43(10): 1190-1198.
- [5] Li Zhi(李智), Hu Defeng(胡德枫), Ge Yuli(葛毓立) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(06): 2227-2235.
- [6] Gu Y, Huo Y. Materials[J], 2023, 16(6): 2346.
- [7] Li N, Wang L, Dai J, et al. Diamond and Related Materials[J], 2019, 100: 107565.
- [8] Yang W, Chen G, Wang P, et al. Journal of alloys and compounds[J], 2017, 726: 623-631.
- [9] He Wei(何卫), Wu Hao(吴昊), Li Dege(李德阁) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(01): 139-144.
- [10] Zhang Zhimo(张志模), Zhang Aibing(张爱兵), Tang Lianhua(汤莲华) et al. China Integrated Circuit(中国集成电路)[J], 2024, 33(03): 82-90.
- [11] Wang S, Ma X, Gao Q, et al. Microgravity Science and Technology[J], 2023, 35(6): 57.
- [12] Sang J, Zhou L, Yang W, et al. Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 856: 157440.
- [13] Ding M, Fu H, Tian Y, et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2025, 130: 107148.
- [14] Zheng Yongcan(郑永灿), Luo Yiming(罗一鸣), Xu Zixuan(徐子轩) et al. Journal of Materials Engineering(材料工程)[J], 2023, 51(02): 28-40.
- [15] Dou W, Zhu C, Wu X, et al. Carbon Energy[J], 2023, 5(12): e379.
- [16] Ye Z, Su Z, Zhao K, et al. Materials Letters[J], 2023, 336: 133894.
- [17] Zhang X, Lei Q, Yin J, et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2024, 122: 106698.
- [18] Hao J, Zhang Y, Li N, et al. Diamond and Related Materials[J], 2023, 138: 110213.
- [19] Li Y, Zhou H, Wu C, et al. Nanomaterials[J], 2023, 13(5): 878.
- [20] Liu T, Huang J, Zhang Q, et al. Diamond and Related Materials[J], 2023, 140: 110446.
- [21] Liu Yuqing(刘于青), Luo Kai(罗凯), He Yuyu(何玉玉) et al. Materials Reports(材料导报)[J], 2024, 38(S2): 135-138.
- [22] Lv X, Gao L, Cui X, et al. Additive Manufacturing[J], 2024, 93: 104434.
- [23] Li Y, Zhong S, Qian M, et al. Composites Part B: Engineering[J], 2025: 112526.
- [24] Zhao K, Ye Z, Su Z, et al. Additive Manufacturing[J], 2025: 104793.
- [25] Su Z, Han K, Ye Z, et al. Materials Letters[J], 2025, 387: 138229.
- [26] Yovanovich M M, Culham J R, Teertstra P. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A [J], 1998, 21(1): 168-176.

Preparation and Water Cooling Verification of Pin-fin Diamond/Copper Plates for Electronic Packaging

Cao Wenxin^{1,2}, Han Kai^{1,2}, Ye Zhijie^{1,2}, Zhao Kunlong^{1,2}, Su Zhenhua^{1,2}, Yao Tai¹, Wang Jiandong³, Zhao Jiwen⁴, Zhu Jiaqi^{1,2}, Han Jiecai¹

(1.Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(2.Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China)

(3.College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(4.Henan Core-diamond Material Technology Co., Ltd, Zhengzhou, 450000, China)

Abstract: The issue of thermal management in electronic packaging is one of the important technical bottlenecks hindering the development of integrated circuits. Diamond/copper composites have excellent performance in the field of thermal management, but the difficulty in their complex structure formation leads to very limited applications in the field of water cooling in electronic packaging. In this study, we aimed to enhance the sintering performance between the green body and the composite plate by employing a silver doping strategy, thereby addressing the thermal management challenges in electronic packaging. We fabricated composite base plates and pin-fin type composite base plates and evaluated their

application benefits in both indirect and direct water cooling scenarios. Our findings demonstrated that the silver-doped copper billet achieved good sintering performance when combined with tungsten-coated diamond/copper composite plates. The composite base plate and the pin-fin type composite base plate effectively reduced the temperature of the heating sheet by 5-6°C and 4-5°C during water-cooling tests respectively. The numerical simulation results were in good agreement with the experimental data, confirming the excellent thermal uniformity of the composite structures. This study successfully overcame the limitations associated with the low thermal conductivity of traditional packaging components and the challenges in fabricating complex structures using diamond/copper composite materials.

Key words: Electronic packaging; Diamond/copper composite material; Water cooling; Simulation

Corresponding author: Yao Tai, Ph. D., Associate Professor, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, PR China, E-mail: yaotai@hit.edu.cn. Wang Jiandong, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Superlight Materials & Surface Technology, Ministry of Education, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, PR China, wangjiandong@hrbeu.edu.cn.