

不同载板 FC 微焊点热应力行为与可靠性研究

左 标^{1,2} 李妍龙^{1,2} 刘俊夫^{1,2}

1.中国电子科技集团公司第四十三研究所 安徽 合肥 230088

2.微系统安徽省重点实验室 安徽 合肥 230088

【摘 要】：当前高密度 FC 工艺的载板主要来源于有机多层载板和陶瓷载板两大类，这两类载板在线条材质及制备工艺上存在本质差异，使得 FC 微焊点在复杂工况下的环境适应性、服役稳定性表现出显著区别。目前针对这两类载板倒装微焊点的失效机理和可靠性对比研究鲜有报道，为此本文针对 ABF 与 AIN 两种不同载板，对其倒装芯片微焊点的互联结构和可靠性差异开展研究。采用有限元仿真与试验相结合的方式，研究不同载板对 FC 微焊点的应力应变分布的影响规律，揭示不同载板 FC 微焊点的微观结构及其在环境服役过程中的演化规律。研究发现载板材料属性差异改变了微焊点热应力分布状态，进而造成 IMC 生长、裂纹萌生扩展行为不同，最终形成两类载板焊点可靠性的差距。

【关键词】：倒装微焊点；有限元仿真；温度循环；SEM

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.027

1 引言

多芯片异质集成是实现微系统集成的一种有效方式，将成为集成电路先进封装发展的关键路径和突破口，MCM 高密度封装电路主要通过预制微焊点和高精密倒装技术将不同芯片在一块或多块载板上实现集成。微焊点尺寸随着集成电路制造特征尺寸的不断缩减而缩小，载板层数和密度也随之增加，微焊点结构可靠性将直接影响封装整体的可靠性^[1-5]。目前 MCM 封装研究微焊点结构可靠性的规律变化是分析倒装焊焊点的应力变化趋势的关键手段^[6-7]。特别是温度循环过程中，焊点失效机制是蠕变与疲劳的相互作用，属于周期性应变作用积累而导致的塑性应变。热循环条件下，不仅要分别考虑到焊点的塑性行为和蠕变行为，更要将焊点塑性和蠕变行为互相影响的因素综合在一起分析^[8-10]。

目前国内外学者对 BGA 封装的可靠性研究已经较为全面，但大多数研究集中在 BT、FR4 载板上，针对 AIN 陶瓷载板跟树脂载板倒装微焊点可靠性差异的研究较少。王海燕等人^[10]研究分析了 BGA 焊点 SAC305/ENEPIG/Cu 界面反应的演化及力学性能的尺寸效应，发现随时效时间增长和焊球直径减小，IMC 生长速率增大，焊点剪切强度降低。高强等人^[11]分析了 BGA 焊点在功率循环载荷下的应力应变分布情况，建立了焊盘直径、焊点直径、焊点高度、载板厚度与焊点应力间的定量关系，发现焊盘直径对焊点应力的影响最为显著。陈亚军等人^[12]研究了温度循环和随机振动载荷下的 BGA 封装焊点可靠性，通过计算耦合寿命模型，BGA 封装角落焊点与 PCB 板相接触的位置通常为结构应力、应变最大位置，最容易发生失效，

低焊球高度、大焊球直径的 BGA 封装器件随机振动寿命更长，得出最优设计焊球高度为 0.3mm，焊球直径 0.6mm。

本文从载板材质角度，针对这两种不同材质载板制备的样品，主要采用温度循环为主体的环境应力试验，参考国家军用标准 GJB548C-2021 中的方法 1010.1 条件 C，将两种倒装样品进行 -65℃~150℃ 温循 20 次、100 次、500 次后，进行 SEM 扫描电镜分析。

2 建立模型及材料制备

2.1 有限元模型

样品制备所需原材料包括多层陶瓷载板、ABF 载板、硅芯片、焊球、底部填充胶等，根据某款高密度载板进行有限元建模，模型示意图如图 1 所示，芯片尺寸为 16*10mm 和 12*12mm 两种，焊球直径为 100um，两种芯片表面分别是 3024 和 2500 个焊球 Pad，平均间距 220um，由于焊球数量过大，采用二分之一模型进行计算。

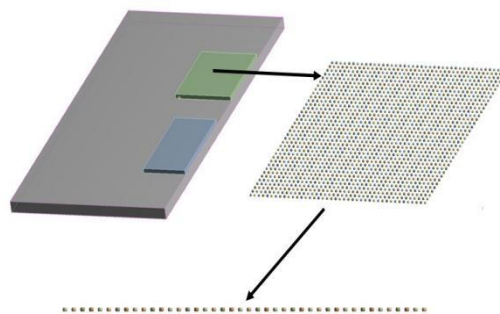


图 1 MCM 倒装有限元模型

2.2 材料准备

利用植球+热压倒装焊方式制备两种状态的载板倒装样品,载板材质分别是多层 AlN 和 ABF 载板。ABF 载板表面化镀 Ni(3-10um)/Pd(0.03-0.09um)/Au(0.03-0.09um),多层陶瓷载板表面溅射膜层为 WTi(0.1um)/Cu(0.5um)/Ni(0.3um)/Au(0.3um)。

2.3 倒装焊接

采用单点式激光植球机对硅片样件进行激光植球,焊球规格为 100um 的 Sn3.0Ag0.5Cu。采用倒装焊接机进行热压倒装,其对准精度达到 $\pm 1\mu\text{m}$,采用热压倒装参数为温度 230℃,压力 3N。

3 有限元结果分析

考虑军用高可靠考核条件,对微凸点模型施加 -65-150℃ 温度循环载荷,高低温停留时间至少 10min。使用 ANSYS Workbench 中的稳态热分析模块对不同载板材质的 MCM 模型进行温度循环仿真分析,将结构的外表面设置对流,观察不同状态的等效应力应变分布情况。

ABF 载板的等效应力云图如图 2 所示,可以发现芯片边缘角落区域受到的等效应力明显大于中间区域,边缘焊球的最大等效应力位置发生在与芯片接触的节点处,给出的 von-Mises 应力最大值为 2.63MPa,比 AlN 载板的微焊球等效应力大了将近一倍。中间区域的焊球应力普遍处于低值,受到稳循考核带来的影响较小。ALN 载板的等效应力应变云图如图 2 所示,等效应力分布更为均匀,最大与最小应力极差值为 0.31MPa,远低于 ABF 载板的 2.53MPa,这归功于 ALN 载板与芯片更加适配的热膨胀系数。同时在边缘焊球的应力分布上 ALN 载板具有与 ABF 载板相似的趋势,最大等效应力均发生在芯片与焊球连接处,这一点在后续试验中也得到了进一步验证。因此,对于相同的稳循加载条件,ALN 载板倒装结构相较于 ABF 载板倒装可以承受更大的热应力,发生的应变分布更为均匀,整个结构的应变更小。

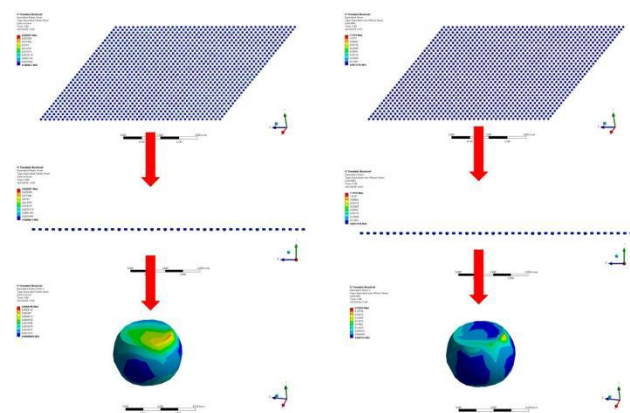


图 2 ALN 载板倒装结构应力云图

(左: ABF 载板, 右: AlN 载板)

4 试验可靠性分析

通过对不同载板制备的倒装焊接样品进行温度循环考核,切片制样后观察微焊点剖面情况。对比了不同材质载板以及温度循环次数下的倒装芯片焊点的微观形貌及两侧界面放大图。对于 ABF 载板而言,随着温度循环次数的增加,焊点下界面处的金属间化合物(IMC)层厚度逐渐增加,说明各元素的扩散与反应逐渐加剧。值得注意的是,结合能谱分析结果可知此处的 IMC 层为 (Cu,Ni)-Sn 金属间化合物,呈现典型的扇贝状结构,但随着温度循环次数的增加形貌逐渐变得平坦,这是表面能逐渐降低的结果;而焊点上界面处,在 100 次温度循环时出现了裂纹,随着温度循环次数的增加裂纹逐渐扩展,到达 500 次时裂纹的长度已经超过一半的焊点宽度。对于 AlN 载板而言,到达 100 次温度循环时焊点的形貌仍然完整,上界面和下界面处的结合仍然紧密,而 500 次时在焊点的上界面和下界面处都出现了裂纹,而且两道裂纹都是从焊点边缘处开始往中间扩展。综合以上分析可知,AlN 载板能承受更多次数的温度循环,相应的可靠性也更高;但与 ABF 载板相比,AlN 载板会在上界面与下界面处都形成裂纹。

从横向的角度来看,ABF 载板中间位置焊点的上界面处在 20-100 次温度循环过程中裂纹开始形核,到 100 次时已经观察到明显的裂纹,而随着温度循环次数逐渐增加,裂纹逐渐扩展,500 次时裂纹已经占据一半左右焊点的宽度;而 ABF 载板侧面位置焊点的上界面处在 0-20 次温度循环过程中裂纹就开始形核,到 20 次时已经观察到微小的裂纹,到 100 次时裂纹的长度已经与 500 次时中间位置焊点的裂纹长度相当,到 500 次时裂纹的长度已经贯穿整个焊点,此时焊点已经与 Si 芯片分离。对 AlN 载板而言,无论是中间位置焊点还是侧面位置焊点,上界面与下界面都在 100-500 次温度循环过程中裂纹开始形核,到 500 次时上界面与下界面处的裂纹都十分明显。

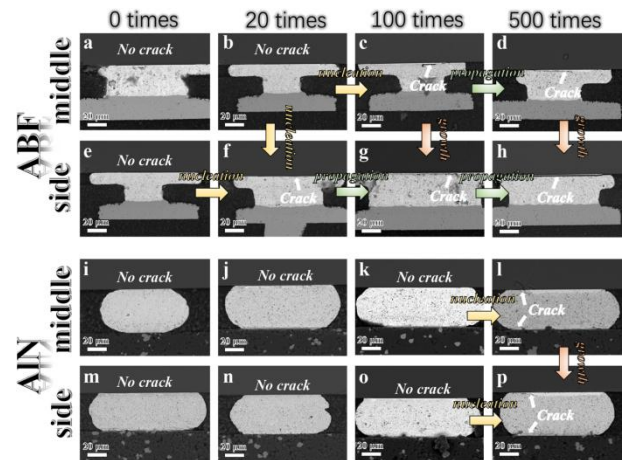


图 3 不同载板材质/温度循环次数下的倒装芯片焊点的微观形貌

5 结论

本文采用试验结合仿真的手段,分别从微焊点应力应变分布规律、金属间化合物生长形貌两个维度,分析不同材质载板对倒装芯片可靠性的作用机制。仿真结果表明,相比于 ABF 载板倒装结构,AlN 载板倒装体系可承受更高热应力,应变分布更加均匀,整体结构应变水平更低。温循试验显示,ABF 载

板焊点边缘裂纹萌生早于中心焊点,500 次温循后边缘焊点完全开裂并脱离芯片,中心焊点裂纹扩展至焊点一半宽度。AlN 载板中心、边缘焊点均至 100-500 次温循才萌生裂纹,500 次循环后裂纹明显显现。结合仿真应力分布与微观观测可知,载板材料属性差异改变了微焊点热应力分布状态,进而造成 IMC 生长、裂纹萌生扩展行为不同,形成两类载板焊点可靠性的差距。

参考文献:

- [1] 刘佳欣,彭洋,胡剑雄等.耐高温微系统气密封装技术及高温可靠性研究[J].中国科学,2023,53(4):803-814.
- [2] 尚拴军,崔凯,赵亚涛等.微小互连高度对倒装芯片组装焊点显微组织及力学性能的影响[J].电子元件与材料,2019,38(4):37-41.
- [3] Yuji Okada,Atsushi Fuji.Reliability Simulation with the Finite Element Analysis(FEA)of Redistribution Layer in Fan-out Wafer Level Packaging,Journal of Photopolymer Science and Technology,2020,33(2):171~176.
- [4] 李祝安,朱思雄,周立彦等.大尺寸气密性陶瓷封装盖板可靠性数值模拟[J].仿真建模与分析,202,39(3):6-10.
- [5] 翟鑫梦.倒装芯片互连焊点可靠性研究[D].上海应用技术大学,2022.
- [6] 许利伟.倒装芯片微凸点焊工艺研究及焊点应变有限元仿真[D].大连理工大学,2016.
- [7] 张伟,祝名,李培蕾等.微系统发展趋势及宇航应用面临的技术挑战[J].电子与封装,2021,21(10):3-11.
- [8] 王剑峰,袁渊,朱媛,张振越.扇外型 BGA 封装的焊球疲劳寿命研究[J].仿真建模与分析,2022,40(4):74-80.
- [9] 刘培生,杨龙龙,刘亚鸿.塑封倒装焊焊点开裂分析及改善研究[J].电子与封装,2023,23(2):1-4.
- [10] 王海燕,石永华,崔国涛等. BGA 焊点 SAC305/ENEPIG/Cu 界面反应演化及力学性能的尺寸效应[J].材料热处理学报,2023,44(8):211-218.
- [11] 高超,黄春跃,梁颖等.功率循环载荷下 BGA 焊点应力与应变分析[J].焊接学报,2023,(7):63-70.
- [12] 陈亚军,肖泽文,王文平.基于随机振动和温度循环寿命预测的 BGA 焊点尺寸优化[J].中国测试,2023-08-04.