

基于埋置式基板的三维多芯片组件的翘曲研究

徐高卫, 罗 乐, 耿 菲, 黄秋平, 周 健

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 传感技术国家联合重点实验室, 上海 200050)

摘 要: 采用粘塑性有限元焊球模型以及大形变理论研究了三维多芯片组件(3D-MCM)的翘曲形态特征及其成因, 结果表明基板腔室的存在使埋置式基板形成了双弓形翘曲形态, 焊球的粘塑性使组件在温度循环中出现了翘曲回滞现象. 基板中心空腔能改变基板翘曲形态, 有利于减小基板翘曲, 并有利于提高倒扣焊器件的热机械可靠性. 底充胶能够增强 3D-MCM 的互连强度, 并且能够有效降低 3D-MCM 温度循环后的残留翘曲度. 底充胶的热膨胀系数(CTE)过高可能引发 3D-MCM 新的失效模式. 3D-MCM 的云纹干涉实验结果与数值分析结果相符较好.

关键词: 三维多芯片组件; 埋置式基板; 翘曲; 有限元模拟; 热机械可靠性; 云纹干涉

中图分类号: TN6, TG4, TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)05-1006-07

Warpage of Three Dimensional Multi-Chip Module Based on Embedded Substrate

XU Gao wei, LUO Le, GENG Fei, HUANG Qiu ping, ZHOU Jian

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The warpage issue of three dimensional multi chip module (3D-MCM) was discussed by using finite element (FE) simulation with viscoplastic solder model and large deformation theory. The comparison results show that the existence of the cavity in the embedded substrate results in the double bow warpage mode of substrate, the viscoplasticity of solder balls results in the residual warpage of 3D-MCM during the temperature cycling. The cavity in the center of substrate can decrease the warpage of 3D-MCM. The application of underfill could strengthen the interconnection between device and substrate, and decrease the residual warpage of 3D-MCM after temperature cycling. However, the large CTE (coefficient of thermal expansion) of underfill might incur other new failure models. Finally experimental results by Moiré fringes pattern validated the predication of warpage by the simulation with viscoplastic solder model.

Key words: 3D-MCM; embedded substrate; warpage; FE simulation; thermal mechanical reliability; Moiré fringes

1 引言

翘曲是电子封装中普遍存在的问题. 其中以有机材料基板的器件如塑封球栅阵列(PBGA)器件等面临的翘曲问题更为显著. 众知其原因为多种材料间的热膨胀系数(CTE)的失配^[1]. 组装体在诸如回流焊等与温度变化相关的工艺过程中因 CTE 失配造成的残余应力和翘曲, 会对后续组装工艺及最终可靠性形成潜在危害. 在产品的服役过程中, 器件会经历周期性温度变化, CTE 失配可造成周期性的翘曲即应力和应变, 从而导致互连结点疲劳破坏. 所以翘曲问题不仅影响封装的工艺环节而且最终会影响器件的疲劳寿命, 从而加速失效.

各种封装形式的翘曲现象早已引起电子封装界的注意和兴趣^[2,3]. Zhang 等利用线性小变形和非线性大

翘曲对层叠 BGA(球栅阵列)结构进行了仿真, 并研究了叠层 BGA 阵列的翘曲特性^[4,5]. Mousley、Ume 等人早期对印制板(PCB)工艺过程中的翘曲现象进行了研究^[6,7]并采用云纹干涉等方法进行了观测^[8], Egan 等采用响应面方法分析了翘曲现象^[9], Pohl et al 对基于倒装焊的芯片叠层封装结构进行了优化研究, 结果表明封装结构很小的变化对三维封装的翘曲特性有很多的影响^[10]. 国内也有部分关于翘曲的研究, 但主要局限于单芯片器件或者 2D 的多芯片组件(2D-MCM), 所用器件或模块集成度不高, 如文献[11]用三维有限元方法分析了影响单芯片封装器件和 MCM 翘曲的结构因素.

三维(3D)封装是当今电子封装发展的一大趋势, 尽管 3D 封装可有效地缩减封装面积, 进行系统的初步整合, 但由于其结构复杂, 与单芯片封装相比, 其翘曲

度、可靠性与组装合格率控制更具有挑战性, 高密度及多种封装材料的介入, 使器件的翘曲问题更加突出. 本文所研究的对象是一个面向用户开发的三维多芯片组件(3D-MCM)形式的模块. 被封装对象既有裸芯片, 又有 PBGA 封装形式的数字信号处理器(DSP); 互连方式既有共晶焊球倒装焊, 又有引线键合, 采用了埋入器件式有机复合材料基板^[12]. 当这些 CTE 各异的材料组装成 3D-MCM 后, 其随温度变化而翘曲的特征是复杂的. 本文采用有限元方法对 3D-MCM 的翘曲特性进行了研究, 对其结构设计进行了评价. 并将预测结果与实验结果相比较, 以验证建模和计算的准确性和可信性. 从而为封装的结构设计与组装工艺优化提供理论依据.

表 1 3D-MCM 的相关材料属性

项目	杨氏模量 (GPa)	泊松比	CTE(ppm/K)
DSP 焊球 (63Sn37Pb)	30	0.35	24.5
DSP 基板 (聚酰亚胺)	22	0.28	18
DSP 模封料	25.4	0.3	16
底充胶	3.45	0.35	25~ 50
铜焊盘	117	0.3	16
阻焊层	3.45	0.35	30
基板 (FR-4, 8 层)	22	0.28	xz: 30, y: 45
基板 (FR-4, 2 层)	22	0.28	xz: 45, y: 50
半固化片	2.6	0.17	xz: 7.15, y: 7.56
ASIC 芯片	131	0.3	2.8
芯片下铜盘	117	0.3	16
芯片粘结剂	3.45	0.35	60
ASIC 包封胶	25.4	0.3	32

注: 数据来源于 LOCTITE, TI, SHENGYI 等公司以及文献[13].

2 翘曲分析

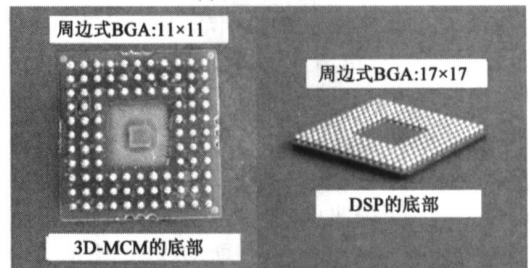
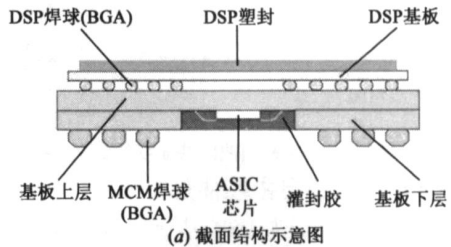
2.1 研究对象

研究对象为某无线通讯传感网基站用 3D-MCM, 该模块具有对称的正方形结构, 尺寸为 18mm × 18mm × 4.7mm. 封装引出形式为周边式 BGA(11 × 11). 基板为有机多层基板, 分上下两层并用特殊半固化片粘结, 上层为高密度多层 PCB, 下层为双面 PCB. 基板下表面正中央有一正方形空腔埋置专用集成电路 (ASIC). 该 ASIC 即基带芯片为裸芯片 (Bare die), 经引线键合后用环氧胶灌封, 上表面以倒扣焊方式互连周边式 PBGA(17 × 17) 封装形式的 DSP. 3D-MCM 及其基板和 DSP 的外形结构如图 1 所示. 3D-MCM 相关材料属性列于表 1.

2.2 建模

采用二维有限元分析方法, 所用工具为 ANSYS 商用有限元分析软件. 二维面模型取 MCM 结构对角线截面, 如图 2(a) 所示的 OX 位置. 由于该截面对称, 取其二分之一即可, 如图 2(b) 所示. 沿 MCM 厚度中心线(即 OY)施加对称边界条件, 并约束基板底部中心点(O 点)的位移为零, 即 $U_x = U_y = 0$

63Sn37Pb 焊球采用包含粘塑性和蠕变的 Anand 模型, 其二维有限元类型选用相应的 VISCO108, 并引入大应变选项. DSP、ASIC、基板、灌封胶等采用线弹性模型, 相应的二维单元类型选用 PLANE82^[14]. DSP 模型简化为“塑封+ 基板”结构. 由于基板下焊球悬空不影响翘曲分析, 故不予考虑.



(a) 截面结构示意图
(b) 3D-MCM基板以及DSP的BGA布局照片
图1 3D-MCM外形图

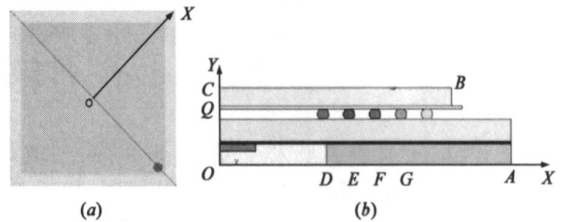


图2 (a)二维有限元模型在MCM上的截面取向位置(俯视图);
(b)二维模型的二分之一截面图

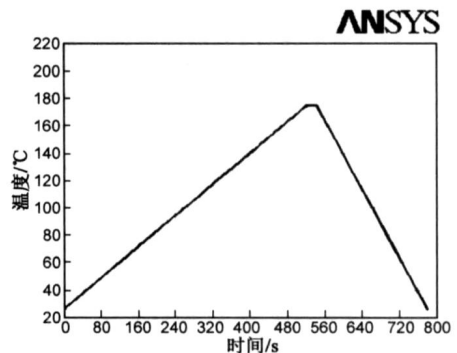


图3 温度加载时间曲线

假设 MCM 在常温下为零应力力和零位移、无翘曲形态, 并取常温为零翘曲参考温度. 结合云纹干涉实验的测试温度范围, 温度载荷按从常温 26℃- 175℃- 26℃ 进行加载, 如图 3 所示. 基板下表面翘曲度定义为基板边角 A 点, 如图 2(b) 所示, 与基板中心点(即坐标原点)的 y 值之差; DSP 上表面翘曲度定义为 DSP 塑封边角 (B 点) 和 DSP 上表面中心 (C 点) y 值的差, 如图 4(a)

所示. 差值为正即为正翘曲, 为负即为负翘曲.

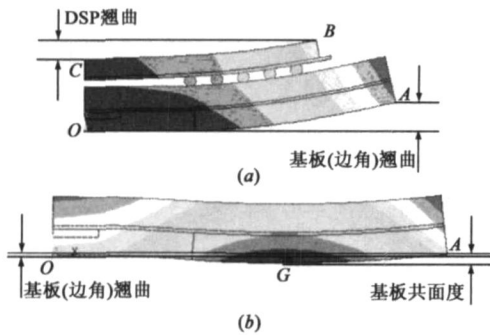


图4 3D-MCM翘曲和共面度的定义

2.3 DSP和基板的自由翘曲形态

图5(a)、(b)分别为DSP、基板在160℃时的自由翘曲形态和翘曲度随温度变化曲线. 从分析可知, DSP的翘曲是正翘曲, 边角B点高度始终高于中心点C点, 所以呈弓形. 而基板的翘曲出现了奇特的现象, 从26℃到175℃, 最大翘曲点并非处于基板下表面边角A点, 而是在图2(b)所示的G点, 且为负翘曲. 尽管基板下表面边角是最大正翘曲点, 但量值很小, 几乎与中心点O处于同一水平. 这样基板下表面的翘曲呈“W”形(双弓形). 形成该现象的原因是由于基板腔室的存在. 从MCM的任一轴心旋转剖面看, 腔室将基板分割为两个近乎独立的复合基板, 各自形成了独立的弓形翘曲形态, 从而在整个基板形成了中央高边缘高的“W”形翘曲形态.

鉴于此, 定义表面最大y值点(如A点)与最小y值点(如G点)的y值差的绝对值为共面度, 如图4(b)所示, 并将共面度同翘曲度结合起来表示基板的翘曲形态. 对于弓形翘曲, 共面度与翘曲度是相等的; 对于双弓形基板, 共面度值越大, 翘曲起伏越大.

从图5(b)可以看出, DSP的翘曲度同共面度相等; 基板共面度大, 但边角翘曲度小, 上表面边缘和中心基本处于同一水平. 结合图5(a)可以看到基板上表面下沉部位平坦, 与DSP下表面保持平行, 给焊球留下了适当的位置. 基板的这种“W”形翘曲态势, 对于倒装焊到基板上的DSP反而是有利的, 即DSP的周边式焊球阵列正好可落在基板翘曲的弓底, 有利于将DSP的翘曲度箝制在较低水平, 有利于提高整个组件的可靠性.

2.4 3D MCM的翘曲分析

图6和图7分别为3D-MCM在升温过程中的翘曲变化历程与DSP和基板的翘曲度随温度变化的关系曲线.

从图7(a)可以看出, 在26℃~75℃温度段, DSP和基板的翘曲均呈弓形. 同图5(b)比较可以看出, DSP上表面和基板下表面的翘曲趋势同其自由翘曲时趋势均保持一致, 出现“同步翘曲”现象. 但DSP和基板随温度

的翘曲程度比自由翘曲时幅度大一些, 这是DSP与基板的CTE失配产生的切应力所致. 从图6可以看出, 在26℃~75℃温度段, 基板的最大负翘曲点从基准点O开始快速向边角方向推进, 在约75℃时, 基板的最大负翘曲点已经处于灌密封胶和基板边缘(如图6(b)所示), DSP和基板的翘曲出现拐点, 如图7(a)所示(DSP和基板的最大翘曲分别为 1.45×10^{-5} m和 2.41×10^{-5} m). 拐点的出现预示着由于DSP和基板CTE失配引起的“翘曲竞争”的开始. 由于基板自身复合材料的翘曲逐渐增加, 焊球正下方基板开始下沉, 带动基板最大正翘曲点G点下降. 此后直到175℃这段温度区间, 焊球下方基板继续下沉, 基板的翘曲模式迅速地从弓形变为双弓形, 如图6(c)所示, 从而其自由翘曲模式成为组件中基板的主导翘曲模式. 这段温度区间DSP翘曲依旧呈弓形, 只是由于基板通过DSP下焊球的牵动, 形成DSP“翘曲回归”, 在160℃时翘曲接近于零.

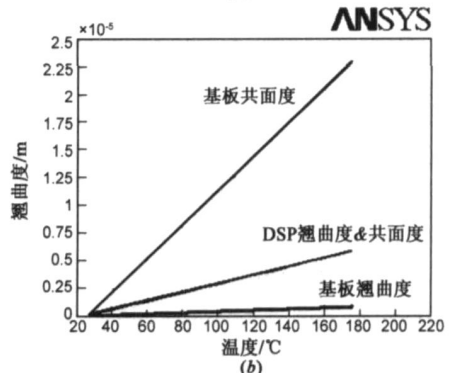
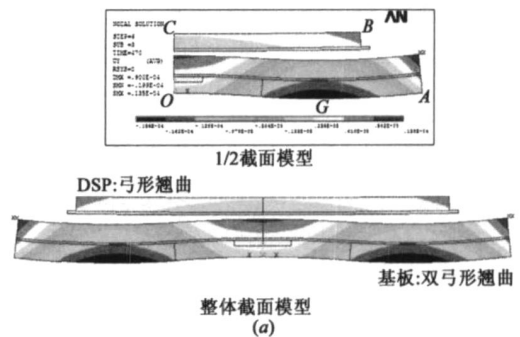


图5 (a) DSP和基板在160℃时的自由翘曲形态;(b)翘曲度和共面度随温度变化曲线

从图6可见基板的最大负翘曲度点随温度漂移, 这样基板的翘曲度和共面度出现差异, 这一点通过比较图7(a)基板的翘曲度曲线与图7(b)基板共面度曲线可明显看出. 在75℃附近随着温度升高, 基板的翘曲度下降, 而共面度值缓慢上升, 基本上处于一个相对平稳的水平.

从图5(b)可见, 对于独立的基板, 其共面度随温度呈线性变化, 而从图7(b)可见, 对于组件中的基板, 其共面度随温度呈非线性变化, 曲线斜率变化很大(26℃

~ 80℃: 0.4644μm/℃, 80℃~ 160℃: 0.0429μm/℃). 这是由于 DSP 通过互连焊球反抗基板牵引, 对基板产生

反作用力, 该作用力阻止基板凹区的进一步下陷, 从而抑制了共面度的线性上升.

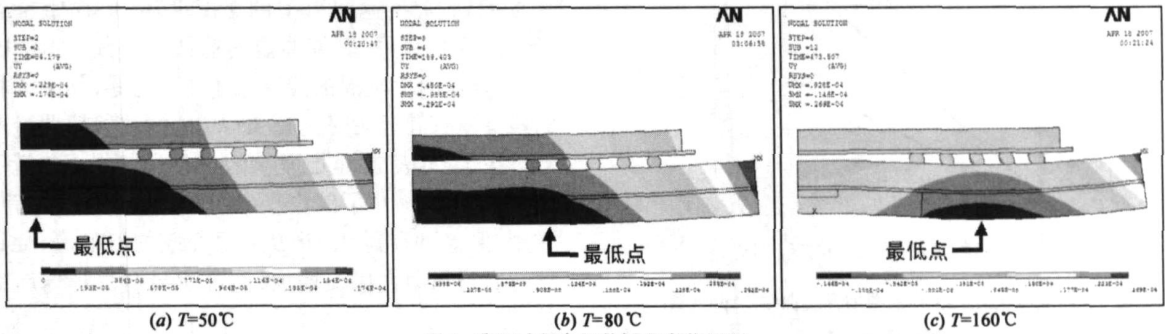
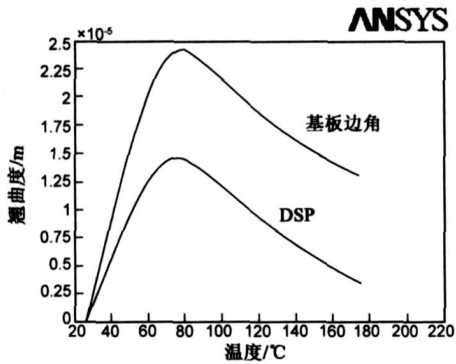
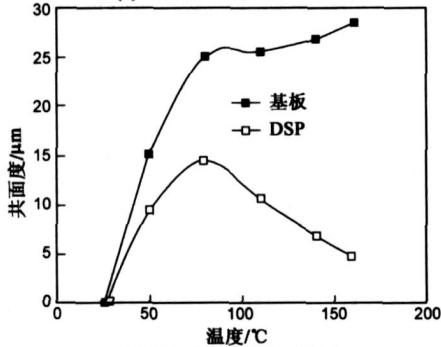


图6 升温过程中组件翘曲变化历程



(a) 翘曲度与温度的关系曲线



(b) 共面度与温度的关系曲线

图7 3D-MCM的DSP和基板的

图 8 为 3D-MCM 从 26℃到 175℃返回 26℃的翘曲特性. 可以看出, 返回初始温度 26℃后, DSP 和基板翘曲并没有归零, 均出现负翘曲. 这是由于焊球的粘塑性所致. 粘塑性是与时间相关的塑性现象, 其中塑性应变的发展, 与载荷率有关. 图 9 为焊球在温度循环下的等效塑性应变变化历程. 由于温度升高使焊料软化, 焊球产生塑性流动和应力松弛, 对 DSP 和基板的翘曲有消减作用. 在降温阶段, 焊球内的应力增加, 并产生了塑性应变硬化. 从图 6(c) 可以明显看出焊球的粘塑变形.

2.5 翘曲因素分析

为了分析双弓形翘曲形态的成因, 进行了对比计算. 一是假设基板中央没有空腔; 二是假设焊球为线性弹性单元; 三是假设 DSP 底部填充了树脂胶.

在基板中央没有空腔的情况下, DSP 和基板的翘曲

形态均为单弓形, 即常见的板上倒装焊(FG-COB)的翘曲形态. 并且 160℃时基板的翘曲为 92.7μm, 明显高于有空腔基板翘曲(14.2μm).

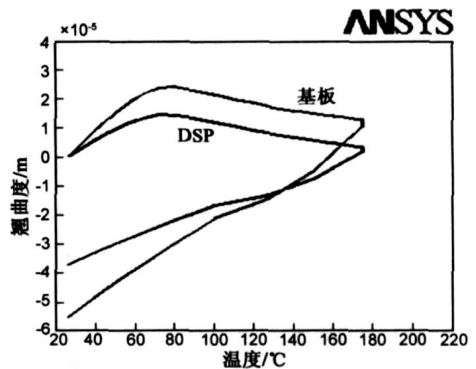


图8 3D-MCM温度循环下的翘曲特性

用线弹性有限元模型描述焊球的模拟结果表明: 焊球变形微小, 3D-MCM 呈单弓形翘曲形态. 图 4(a) 实际上是线弹性焊球假设下的 3D-MCM 翘曲形态图. 在温度循环下没有出现翘曲回滞现象.

综上所述, 可认为基板腔室的存在使基板形成了双弓形翘曲形态, 焊球的粘塑性使组件在温度循环中出现了翘曲回滞现象, 并且腔室的存在和焊球的粘塑性的联合作用使 3D-MCM 的翘曲温度曲线形成拐点.

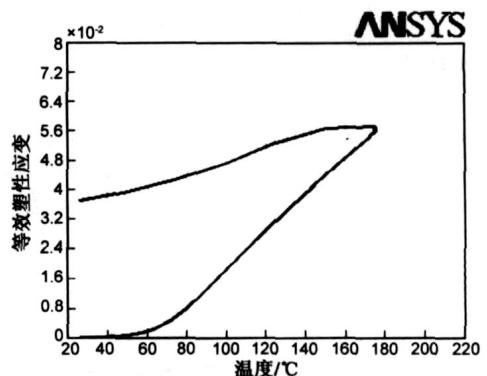


图9 温度循环下焊球的最大等效塑性应变变化

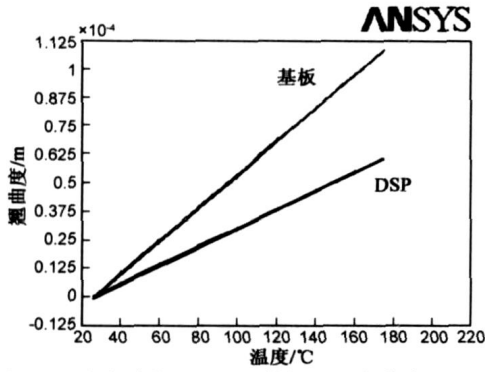


图10 含底充胶的3D-MCM的翘曲温度曲线(21ppm/K)

表 2 同底充胶 CTE 下的翘曲和热机械参量的对比

样品	组件翘曲形态	160℃时翘曲(m)		返回 26℃时翘曲(m)		焊球最大等效应力(Pa)	
		DSP	基板	DSP	基板	26℃	26℃
A 样品 (21ppm/K)	单弓	0.541E-4	0.967E-4	-0.622E-6	-0.769E-6	0.714E7	0.00137
B 样品 (60ppm/K)	单弓	0.502E-4	0.894E-4	-0.289E-6	0.744E-7	0.111E8	0.004241

3 验证

为验证翘曲预测的准确性,进行了云纹干涉实验.云纹干涉法是一种具有非接触测量、可进行全场和实时分析的高灵敏度、大量程的光学测量方法^[15].制样三个如下:1# 为埋置式基板;2# 为无底充胶的3D-MCM;3# 为有底充胶的3D-MCM.采用可修复底充胶:玻璃化温度 $T_g = 69^\circ\text{C}$,CTE 为 63ppm/K (pre T_g)和 210ppm/K (post T_g),加热固化.试样的加温曲线与前面分析时所用升温曲线保持一致.6个测试点分别为 26°C 、 50°C 、 80°C 、 110°C 、 140°C 和 160°C .测试结果为三维和二维翘曲等高线图以及共面度.测试表面的位移数据矩阵的位移最大值与位移最小值的差即为测试面的共面度

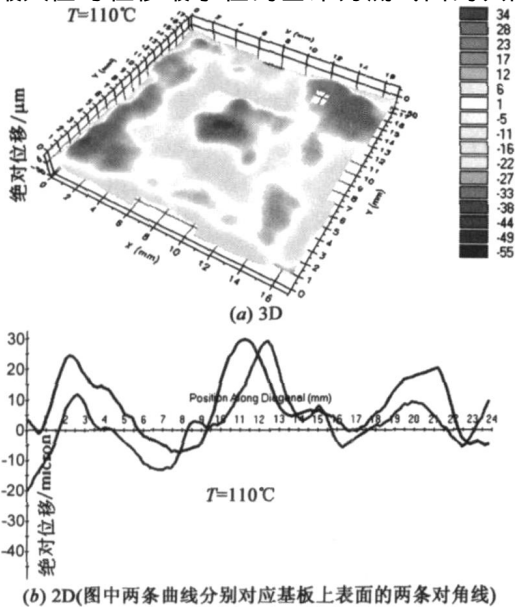


图11 基板上表面等高线图

假设 CTE 分别为 21ppm/K (A 样品)和 60ppm/K (B 样品)的两种底充胶充于 DSP 的底部.模拟结果表明在从 26°C 到 175°C 返回 26°C 的温度循环中 3D-MCM 翘曲形态均为单弓形,其翘曲温度曲线呈直线,如图 10 所示,并且返回 26°C 时的残留翘曲几乎为零,其中 A 样品的残留翘曲低于无底充胶 3D-MCM 的残留翘曲近两个数量级,参见表 2.可见,底充胶的使用使得模块近乎于线弹性结构,减小了模块残余翘曲,从而对焊球有保护作用.但也可看到,由于 B 样底充胶的 CTE 高,导致焊球的应力和塑性应变增加,这可能会引发焊球新的失效模式.

值.

图 11(a)为 1# 基板上表面的等高线图,可以明显地可以看出基板中心和四周边缘高的态势,从图 11(b)则可更形象地看出“W”形翘曲形态,与图 5(a)的预测结果一致.

图 12(a)和(b)分别为在 80°C 时 2# 样品 DSP 的 3D 和 2D 等高线图,可以明显地看出 DSP 中心低四周高的弓形翘曲.

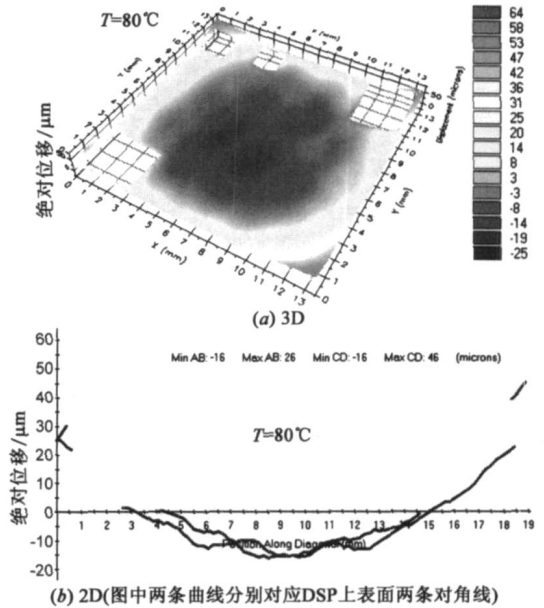


图12 2#样品DSP上表面等高线图

图 13(a)为三个样品在 6 个温度点下的共面度曲线.

对于不含底充胶的 2# 样品,从图 13(b)预测结果与实验结果的对比可见,DSP 的共面度随温度变化曲线非常吻合,在 80°C 附近有共面度最大点(计算值为

14.5 μm , 测量值为 11 μm), 160 $^{\circ}\text{C}$ 时为共面度最小值(计算值为 4.8 μm , 测量值为 1 μm)。基板下表面的波动较大, 但基本维持在一个水平, 与图 7(b) 的趋势一致。

对于有底充胶的 3# 样品, DSP 的共面度没有出现如图 10 所示预测的线性变化, 而是出现了极大值, 反而与无底充胶时的变化趋势相似。该结果说明底充胶未能对 3D-MCM 的翘曲度起到明显的改善作用。其原因可能在于可修复性底充胶柔软性大, 或者是由于底充胶固化不完全。但仍可看出, DSP 的共面度极大值点从无底充胶情况下的 80 $^{\circ}\text{C}$ 移向 110 $^{\circ}\text{C}$, 并且共面度值总体上小于不含底充胶样品。可见底充胶对组件的整体刚度有一定的提高。

综上所述, 实验和模拟结果间存在一定误差, 其原因是多方面的, 如基板上下表面平整度的影响、封装初始翘曲的影响, 材料的 CTE 等热机械参数取值与真实值有差异等。但这并不影响本文得出的许多定性结论。

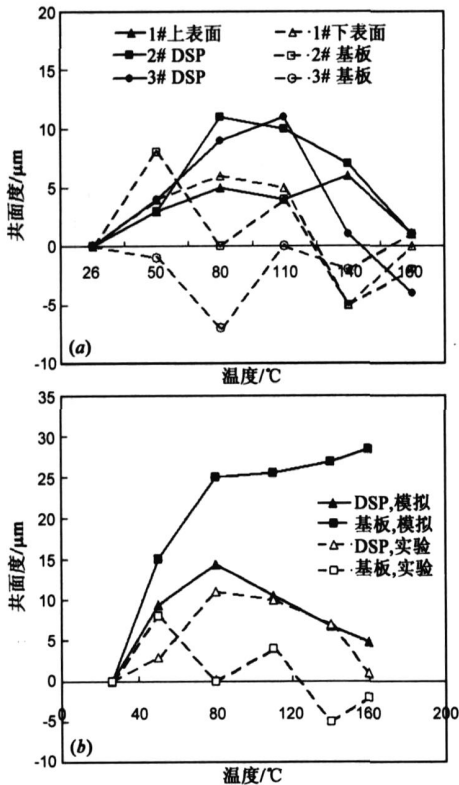


图 13 (a) 样品共面度随温度变化曲线(云纹干涉实验); (b) 2# 样品共面度随温度变化曲线的实验和模拟结果对比

4 结论

本文从理论模拟和实验两方面研究了基于埋置式基板的多种互连方式的 3D-MCM 的翘曲, 结论如下:

(1) 基板腔室的存在使基板形成了双弓形翘曲形态, 该因素与焊球的粘塑性联合作用使无底充胶的空腔基板 3D-MCM 翘曲温度曲线在 75 $^{\circ}\text{C}$ 附近形成拐点, 在低于 75 $^{\circ}\text{C}$ 范围内呈单弓形翘曲形态, 而在高于 75 $^{\circ}\text{C}$

时呈双弓形翘曲形态, 该翘曲形态有利于提高倒扣焊于其上的 DSP 的机械可靠性。基板中心空腔能改变基板翘曲形态, 有利于减小基板翘曲。

(2) 倒装焊球的粘塑性使 3D-MCM 在温度循环中出现了残留翘曲。

(3) 3D-MCM 的云纹干涉试验结果与数值分析结果相符较好, 验证了有限元模拟方法的有效性以及翘曲预测的准确性。

(4) 底充胶的注入可改变 3D-MCM 的翘曲形态。在温度循环过程中表现为单一的单弓形形态, 大大降低封装的残留翘曲并减小应力和塑性应变, 提高 3D-MCM 可靠性。但若其热膨胀系数过高或过低, 与其周围材料的 CTE 失配较大, 则会增大 3D-MCM 等效应力和等效塑性应变, 从而降低封装可靠性。

(5) 基板的双弓形翘曲现象可有效地降低结构整体翘曲度。空腔方法对改变基板整体应力场特征和改善翘曲形态很有意义。基板空腔对 3D-MCM 可靠性的影响以及底充胶参数的优化有待进一步的深入研究。

致谢 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所吴燕红在制样方面以及 WKK 公司曹星在云纹试验方面所给予的支持。

参考文献:

- [1] Bhattacharya S K, Ume I C, Dang A X H. Warpage measurement of large area multitilted silicon substrates at various processing conditions[J]. IEEE Transactions on components and packaging Technology, 2000, 23(3): 497-504.
- [2] Zhang X, Pard S, Judy M W. Accurate assessment of packaging stress effects on MEMS sensors by measurement and sensor package interaction simulations[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(3): 639-649.
- [3] Tsai M Y, Huang C Y, Chiang C Y, Chen W C, Yang S S. Hygrothermal warpages of COG package with nonconductive paste adhesive[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(3): 517-525.
- [4] Zhang X, Tee T Y, Zhou J. Novel process warpage modeling of matrix stacked die BGA[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(2): 232-239.
- [5] Tee T Y, Baraton X, Lim M, Ng H S, Zhong Z W. Design analysis and optimization of wirebond stacked die BGA packages for improved board level solder joint reliability[A]. Proc. of EuroSimE Conference[C]. France: IEEE CPMT Society European Commission, 2003. 207-213.
- [6] Mously R F. A shadow moiré technique for the measurement of damage in composites[J]. Composite Structures, 1985, 4(3): 231-244.
- [7] Ume C, Marin T, Gatro J. Finite element analysis of PWB

- warpage due to the solder masking process[J]. IEEE Trans CPMT- A, 1997, 20(2): 295- 306.
- [8] Powell R E, Ume I C. Simultaneous measurement of PWB and chip package warpage using automatic image segmentation[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(3) : 500- 508.
- [9] Egan E, Kelly G, Donovan T, Mutagh D, Herard L. Response surface methodology for matrix PBGA warpage prediction[A]. Proc. of Inter Society Conference on Thermal Phenomena[C]. Las Vegas, NV, USA: IEEE CPMT Society, 2000. 377- 384.
- [10] Pohl J, Graml M, Strobel P, Steiner R, Pressel K, Stoeckl S, Ofner G, Lee C. Package optimization of a stacked die flip chip based test package [A]. IEEE Electronics Packaging Technology Conference [C]. Singapore: IEEE Reliability/CPMT/ED Singapore Chapter, 2004. 590- 594.
- [11] 张士元, 郑百林, 张伟伟, 贺鹏飞. 电子封装中材料的几何尺寸对翘曲的影响[J]. 力学季刊, 2005, 26(3): 506- 510.
Zhang Shi yuan, Zheng Bai lin, Zhang Wei wei, He Peng fei. Numerical simulation for electronic package warpage due to geometrical dimension[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(3): 506- 510. (in Chinese)
- [12] 徐高卫, 吴燕红, 周健, 罗乐. 基于嵌入式基板的 3D-MCM 封装结构的研制[J]. 半导体学报, 2008, 29(9): 1837- 1842.
Xu Gao wei, Wu Yan hong, Zhou Jian, Luo Le. Development of a three-dimensional multichip module based on embedded substrate[J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(9): 1837- 1842. (in Chinese)
- [13] 查尔斯 A 哈珀. 电子封装材料与工艺(第 3 版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Charles A Happer. Electronic Materials and Processes Handbook, Third Edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] Swanson Analysis System, Inc. Modeling and Meshing Guide (Release 5. 4) [Z]. Canonsburg, USA: ANSYS, Inc, 1997.
- [15] Ding H, Powell R E, Hanna C R, Ume I C. Warpage measurement comparison using shadow moiré and projection moiré methods[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(4): 714- 721.

作者简介:



徐高卫 男, 1967 年 12 月出生于陕西省蒲城县, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士, 副研究员. 研究方向为电子封装及其可靠性.

Email: xugw@mail.sim.ac.cn



罗乐 男, 1958 年出生, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员, 博士生导师, 从事电子材料、电子器件封装及可靠性研究.