

文章编号:1004-4213(2010)11-2036-4

数字图像相关方法在板载芯片封装 热变形测量中的应用*

陈凡秀¹,何小元²

(1 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033)

(2 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要:针对板载芯片封装结构中由于各层材料热膨胀系数的差异引起的热失配现象,利用数字图像相关方法对板载芯片封装结构在热载荷下的表面热变形分布进行实验测量,并比较了不同封装配置对结构热变形的影响.建立了适于求解结构表面热变形分布的理论模型,利用实验结果和有限元模拟验证了理论模型.同时表明了实验方法的有效性和可行性,为微机电系统器件设计提供了有益的参考.

关键词:测量;热变形;数字图像相关方法;板载芯片封装;微机电系统

中图分类号:O348; O484

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2036

0 引言

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)器件及微系统等封装常采用多芯片组件(Multi-Chip Module, MCM)组装方式,其中广泛采用板载芯片(Chip On Board, COB)方式将硅芯片直接粘接在基板材料(如陶瓷或有机线路板)上的方式,即板上芯片技术.由于封装结构中各层材料热膨胀系数的差异很大,封装过后结构中存在很大的热应力,将导致显著的热失配现象,在整个结构中引入热应力和热变形,对器件的工作响应和使用寿命产生直接的影响,严重时甚至使器件发生根本性的破坏.由热失配导致的封装效应在对应力敏感的 MEMS 器件和结构中显得尤为突出.在明确了电子封装力学失效的主要原因之后,在电子封装力学封装研究中,封装热应力应变测量变得尤为重要^[1].

本文利用数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)^[2-6]对 COB 封装结构在热循环状态下的表面热变形的分布进行了测量,获得了芯片受热后的表面形变和弹性应变分布,并将测量结果与有限元模拟结果以及理论模型进行对比^[7].

1 DIC 方法及其测量系统

1.1 DIC 方法

DIC 的基本原理是匹配物体表面不同状态下的数字化散斑图像上的几何点,跟踪点的运动从而获得物体表面的变形信息.给定物体变形前的图像 $f(x, y)$ 和变形后的图像 $g(x, y)$,要求在变形后的图像子区中识别出变形前的图像子区所处的位置.即:给定物体变形前的图像中的子区 S 中心点 (x, y) ,要求在变形后的图像中识别出对应于变形前该子区的目标子区 S' 中心点位置 $(x+u, y+v)$. u, v 分别为点 (x, y) 沿 X 方向和 Y 方向位移.识别的依据是两图像子区之间的相似程度,即在变形前图像中以点 (x, y) 为中心的矩形 $(2M+1) \times (2N+1)$ 作为计算子区,在变形后的目标图像中移动,并按某一相关函数来进行计算,寻找与模板的相关系数绝对值为最大值的点 (x', y') 为中心的矩形区域 $(2M+1) \times (2N+1)$,来确定待测点的位移.本文采用如式(1)相关函数来进行衡量

$$c = \frac{\{\sum [f(x, y) - \bar{f}] * [g(x+u, y+v) - \bar{g}]\}^2}{\sum [f(x, y) - \bar{f}]^2 * \sum [g(x+u, y+v) - \bar{g}]^2} \quad (1)$$

式中, f, g 为变形前后两幅图像中所选子区的灰度值, \bar{f}, \bar{g} 为计算子区域的平均灰度值.区别于一般的相关公式,式(1)采用平方形式,以乘法代替了开方运算,节省了计算消耗,拉大了主峰和次峰的区别,更有效地抑制了噪音的影响^[8].

由于封装芯片变形微小且具有较小的刚体转动

*国家自然科学基金(51008166)、山东省自然科学基金(Y2008A25)和山东省教育厅科技计划项目(J08LJ04)资助

Tel:0532-85071560

Email:mecfx@163.com

收稿日期:2010-04-02

修回日期:2010-06-10

角,本文 DIC 算法采用基于局部坐标的形函数,其实质为形函数在子区中心点的一阶泰勒展开. 相关搜索过程中,假设灰度连续,并采用双 3 次自然样条插值的算法,可精确求解物体表面的位移值. 由于芯片变形微小,为减小环境因素对计算结果的影响,采用时间平均的模式采集图像. 通过数字图像相关运算得到最终的面内位移 u , 根据三角测量技术原理^[9],由测量系统的几何关系可知面内位移 u 和高差 $h(x,y)$ 的关系式为

$$h(x,y) = ku \quad (2)$$

式中 k 是与测量系统有关的常量. 测量系统一旦确定, k 值就是一个固定的常量. 它可以通过实验标定得到.

1.2 测量系统

测量系统如图 1, 包括计算机、CCD 摄像机、白光光源、半导体加热板、直流电压源和芯片等. 温度载荷由 Pletier 效应^[10-11]的半导体加热板施加, 结构如图 2. 该半导体加热板的尺寸为 $50.0 \times 50.0 \times 4.0 \text{ mm}^3$, 工作电压为 $0 \sim 15 \text{ V} \cdot \text{DC}^{-1}$, 温度范围 $0 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$. 上下表面均为陶瓷, 具有良好的平整度. 将试件置于加热板上. 试件和加热板之间涂覆导热硅脂以保证传热稳定均匀. 直流电压源与半导体加热板相连, 通过控制电压源的电压控制加热板的温度, 通过 CCD 摄像机采集温度变化过程中试件的变形情况.

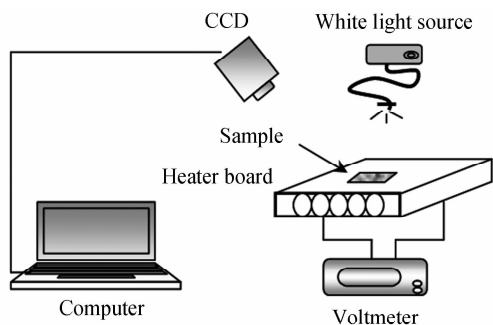


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

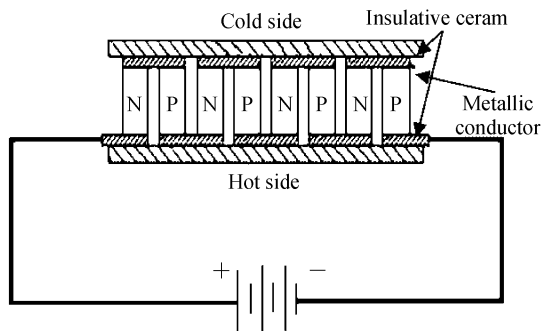


图 2 半导体加热片的结构

Fig. 2 Structure of the semiconductor heater board

2 实验及其结果分析

2.1 测量结果对比分析

实验采用的试件为 FR₄ 有机层压基板上的芯片直接粘结封装, 芯片尺寸为 $5.0 \times 5.0 \times 0.35 \text{ mm}^3$, FR₄ 基板尺寸为 $7.0 \times 7.0 \times 0.75 \text{ mm}^3$. 粘帖剂选用贴片专用红胶 (CB602\CB603).

通过实验标定得到面内位移转化为离面位移的换算参量为 $k = 16.77363$. 同时, 利用有限元模拟的方法对芯片进行分析得到试件的形变; 为了能够更有效地分析芯片封装结构在受热过程中的热机械耦合行为, 利用 ANSYS 对该实验配置下的结构热变形情况进行了模拟分析. 采用的元素类型为 Plane13, 按平面应变假设计算, 有限元模型如图 3. 以 FR₄ 为基板的样品在温度变化为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时其表面形变为例, 图 4 给出了芯片受热后的表面形变分布. 分别对按理论模型计算所得结果 (THEORY)、ANSYS 模拟结果 (FEM) 和实验测量结果 (TEST) 进行了比较. 由图 4 可见, 芯片表面的热变形和弹性应变分布的理论计算值和 FEM 模拟值吻合得较好, 变形的测量值因为实验噪音而有起伏, 但总的趋势和理论值一致. 在芯片中央区域变形较小, 边界区域变形非常明显, 反映了实际的翘曲变形分布情况. 实验结果可以为理论模型提供有力的实验验证. 因此, 建立的理论模型将能有效地分析芯片封装结构在受热过程中的热机械耦合行为, 为 MEMS 器件的设计提供有益的参考.

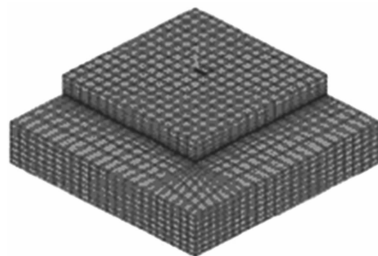


图 3 COB 封装结构的有限元模型

Fig. 3 The FEM model of COB packaging structure

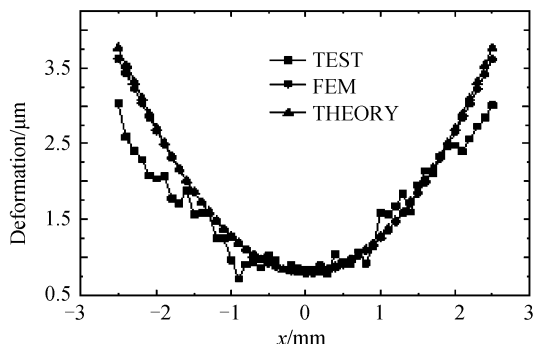


图 4 FR₄ 基板的芯片受热后的表面形变对比 ($\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig. 4 Comparison of the results of surface distortion ($\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$)

2.2 变形随温度变化结果

从室温开始加热,随着温度的升高,热失配越来越严重.图5给出了不同温度下芯片表面的变形并与同条件下 FEM 模拟值对比.由于实验测试时视场没有取到样品的边缘,所以相对 FEM 曲线,测试曲线少了 3 个点.对比可以看出,从室温开始加热,随着温度的升高,热失配越来越严重.由图 6 可知,离面位移随温度的升高而近似线性地增加,测量结果与 FEM 模拟结果有同样的趋势,可见由于热失配导致的热-机械耦合效应非常显著,其对器件性能的影响不容忽视,应在器件的早期设计阶段加以考虑.

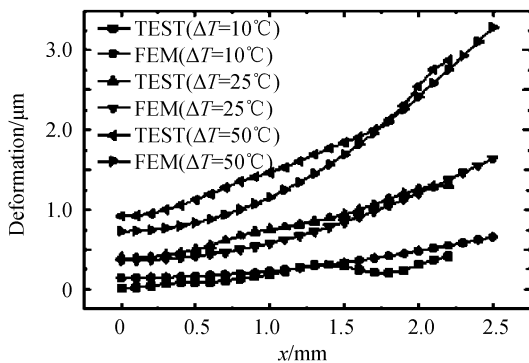


图5 不同温度下形变曲线

Fig. 5 Deformation of the sample surface at different temperature

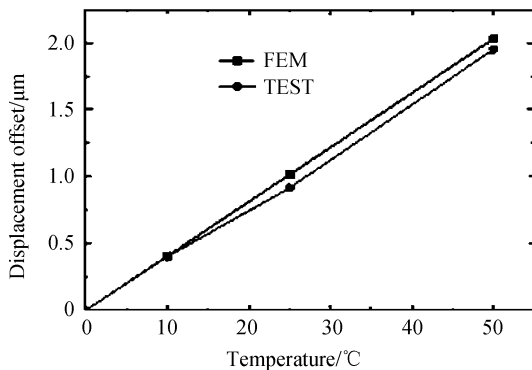


图6 离面位移随温度的变化

Fig. 6 Out-plane deformation changing along temperature

2.3 基板对芯片热变形的影响

对同等条件下 Al_2O_3 陶瓷基板和 FR_4 层压基板上芯片的热变形进行测量.图7为 $\Delta T=25^\circ\text{C}$ 时,陶瓷基板和 FR_4 基板的样品表面形变的实验测量结果比较.图8给出了 $\Delta T=55^\circ\text{C}$ 时陶瓷基板和 FR_4 基板的样品表面弹性应变分布的理论计算值和 FEM 模拟值对比.由图7可以看出,由于陶瓷材料与硅芯片具有更相近的热膨胀系数,且其弹性模量和抗弯刚度远大于 FR_4 基板,所以陶瓷基板与芯片的热失配现象相对较弱,芯片表面热变形要比采用 FR_4 基板的芯片小得多;同时由图8也可看出:加热过程中采用陶瓷基板的样品中主要为拉应变,而采

用 FR_4 基板封装的芯片由于严重的热机械耦合效应使其上表面所承受的拉应变转变为压应变,且两者在数值上相差了一个数量级.因此,基板的选取对芯片表面变形的影响十分显著,采用陶瓷基板比采用 FR_4 基板具有更为优良的机械性能.但由于成本原因,在实际 COB 封装中大量采用的是 FR_4 基板,这对于应力敏感的 MEMS 器件而言会产生不利的性能影响.

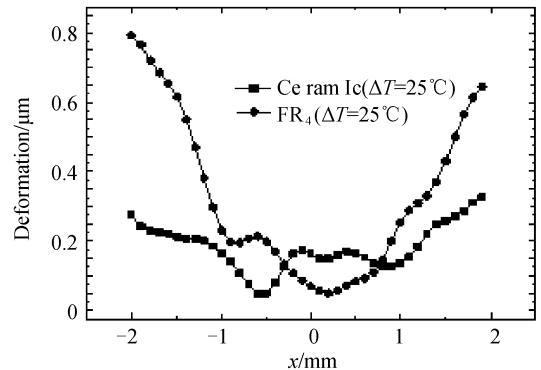


图7 不同基板对热变形的对比

Fig. 7 Comparison of surface distortion

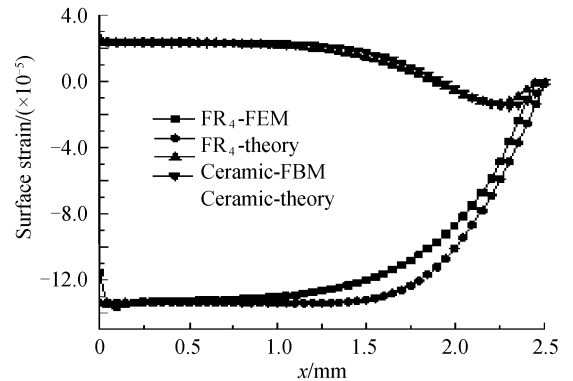


图8 芯片表面弹性应变分布($\Delta T=55^\circ\text{C}$)

Fig. 8 Strain of the sample surface ($\Delta T=55^\circ\text{C}$)

3 结论

1) 利用 DIC 方法对芯片热致封装应力进行分析,实现试件的热致封装效应的测量.同时进行理论建模和 FEM 分析,并对结果进行对比.

2) 芯片封装作为典型的多层异质材料结构,具有明显的热机械耦合效应,微米量级的形变足以使器件的性能在封装后出现严重的影响.

3) 采用陶瓷基板比采用 FR_4 基板具有更为优良的机械性能,更适于应力敏感的 MEMS 系统.

总之,测量结果表明,本文 DIC 方法用于芯片热致封装应力的测量是可行的,虽然实验过程中存在一定的噪音影响,但测量结果与其他两种方法相比吻合度较好,为有限元模拟算法和理论计算方法提供了一种有力的实验依据,也为 MEMS 器件设计提供有益的参考.

参考文献

- [1] TSAI M Y, LIN Y C, WU J D, *et al.* Thermal deformations and stresses of flip-chip BGA packages with low-and high- T_g underfills; *Polytronics* [J]. *IEEE Trans on Electronics Packaging Manufacturing*, 2005, **28**(4): 328-337.
- [2] YANG Fu-jun, FANG Liang, HE Xiao-yuan. Vibration measurement based on speckle projection and digital image correlation methods[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(3): 323-326.
杨福俊, 房亮, 何小元. 基于单幅数字散斑投影及图像相关的离面振动测量[J]. *光学技术*, 2007, **33**(3): 323-326.
- [3] PAN Bing, XIE Hui-min, DAI Fu-long. An investigation of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, **39**(2): 245-252.
潘兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究[J]. *力学学报*, 2007, **39**(2): 245-252.
- [4] ZHANG Dong-sheng, AROLA D D. Application of digital image correlation to biological tissues[J]. *J Biomed Opt*, 2004, **9**(4): 691-699.
- [5] HE Xiao-yuan, JIANG Ming. 3D information acquired by the correlation of projected fringe patterns[C]. *SPIE*, 2005, **5852**: 257-263.
- [6] WANG Min, CEN Yu-wan. A weighting window applied to the digital image correlation method[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, **41**(2): 154-158.
- [7] SONG Jing, HUANG Qing-an, TANG Jie-ying. Effects of die bonding on MEMS characteristics; cell library[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, **27**(1): 156-161.
宋竞, 黄庆安, 唐洁影. 芯片粘接工艺对 MEMS 性能影响的单元库法模型[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(1): 156-161.
- [8] SUN Wei, HE Xiao-yuan, HUANG Yao-ping, *et al.* Experimental study on identification of modal parameters of cable[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, **25**(6): 88-93.
孙伟, 何小元, 黄跃平, 等. 拉索模型模态参量识别的实验研究[J]. *工程力学*, 2008, **25**(6): 88-93.
- [9] CHEN Fan-xiu. Dynamic optical testing method and application research in micro structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2007: 24.
陈凡秀. 微结构动态变形的光学测试方法与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2007: 24.
- [10] ASTRAIN D, VIÑAN J G, ALBIZUA J. Computational model for refrigerators based on Peltier effect application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**(17-18): 3149-3162.
- [11] MUSCIO A, BISON P G, MARINETTI S, *et al.* Thermal diffusivity measurement in slabs using harmonic and one-dimensional propagation of thermal waves[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, **43**(5): 453-463.

Application of Digital Image Correlation on Surface Deformation Measurement of Chip on Board Packaging Structure

CHEN Fan-xiu¹, HE Xiao-yuan²

(1 College of Science, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)

(2 Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at the thermal mismatch caused by different Coefficients of Thermal Expansion (CTE) of each material in Chip on Board (COB), Digital Image Correlation (DIC) is used to measure the thermomechanical coupling effect in COB packaging structures, and effects of different type substrate are compared. The experiment results are compared with both the results of FEM simulations and the theoretical model. Experimental results reveal that DIC can successfully be applied to the analysis of the thermomechanical coupling effect and provide an availability consult to the design of MEMS apparatus.

Key words: Measurement; Surface deformation; Digital Image Correlation (DIC); Chip On Board (COB) packaging; Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)



CHEN Fan-xiu was born in 1979. She received her Ph. D. degree from Southeast University in 2007. Now she is an associate professor at Qingdao Technological University, and her research interests focus on optical measurement and image processing.



HE Xiao-yuan was born in 1956. Now he is a professor and Doctoral Supervisor at Southeast University. His research interests focus on optical measurement and image processing.