

## 衬底类型对粘贴芯片表面残余应力的影响\*

孙志国 黄卫东 罗乐

中国科学院上海冶金研究所, 上海 200051

**摘要** 封装所导致的残余应力是电子器件封装和组装重点关注的问题。本工作利用硅压阻传感器, 实时原位地记录了在不同基板材料 (FR4 和  $Al_2O_3$  陶瓷) 上粘接剂固化过程中的应力变化和残余应力的分布状况。研究表明, 在不同基板材料上固化时, 应力演化过程不同;  $Al_2O_3$  陶瓷基板上芯片的残余应力明显低于 FR4 基板。

**关键词** 芯片粘贴, 硅压阻应力传感器, FR4,  $Al_2O_3$ , 残余应力

中图分类号 TG407

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)12-1281-05

## EFFECT OF SUBSTRATE TYPE ON THE EVOLUTION OF RESIDUAL STRESS DURING AND AFTER CURING COB PACKAGES

SUN Zhiguo, HUANG Weidong, LUO Le

Shanghai Institute of Metallurgy The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200051

Correspondent: LUO Le, professor, Tel: (021)62511070-8926, Fax: (021)62513510,

E-mail: leluo@mail.sim.ac.cn

Manuscript received 2001-04-13, in revised form 2001-08-20

**ABSTRACT** The residual stress induced by packaging has been an common and important problem in the electronic packaging and assembly. Silicon piezoresistive sensor was applied to *in-situ* record the curing stress profile and the distributions of the the residual stress in chip on board (COB). Results indicate that the residual stress development is related to substrate type, and the average residual stress on aluminum oxide ceramic substrate is lower than that on FR4 substrate.

**KEY WORDS** chip on board, silicon piezoresistive sensor, FR4,  $Al_2O_3$ , residual stress

MCM(multi-chip module, 多芯片模式) 组装广泛采用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, 这种芯片粘接方式更有效地利用了基板的面积, 所以具有信号传输迅速、封装尺寸减小、成本较低等优点。由于一些芯片, 如 MEMS(micro-electro-mechanical systems, 微电机系统) 芯片, 对残余应力极为敏感, 所以在封装设计中迫切需要了解在封装过程中的应力变化及其可能引入的残余应力, 从而优化设计中所采用的封装结构及各种材料。

对于封装中所致的应力, 主要采用的研究方法有: 干涉法、X 射线衍射法和压阻法<sup>[1]</sup>。其中压阻传感测量法可以根据需要选择使用硅片的不同晶面、掺杂类型和浓度,

并根据封装具体情况设计压阻分布的图形, 具有很强的灵活性, 被证实最适合于实时监测。基于压阻理论公式<sup>[2]</sup>, 可以根据在不同方向上的电阻变化而推算出其应力。自 Bittle 等人<sup>[2]</sup>1991 年提出压阻传感芯片的设计理论以来, 已有一些研究者对包括 COB(Chip on Board, 芯片直接粘贴) 贴装过程中的应力演化<sup>[3]</sup>、倒装焊接过程中底充胶固化过程的应力演化<sup>[4]</sup>、热循环和热时效过程中的应力演化<sup>[5]</sup>等进行了研究, 但不同衬底对芯片粘贴过程中残余应力的演化的系统研究未见报道。本工作运用硅压阻应力传感芯片作为载体, 实时模拟了在 FR4 有机层压板和陶瓷基板上芯片粘接后粘接剂固化过程中的应力的变化, 并比较了不同基板对应力演化及残余应力的影响。

### 1 实验方法

采用含 Si(111) 面 n 型压阻传感器的芯片, 尺寸为  $6.6 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm}$ 。芯片上有五个测试点, 每个测试点有八组电阻, 分别向八个方向伸展, 感应不同方向的电阻变化值。电阻测试使用多通道实时测试系统, 由微

\* 国家科技部 973 资助项目 G1999033108

收到初稿日期: 2001-04-13, 收到修改稿日期: 2001-08-20

作者简介: 孙志国, 男, 1972 年生, 博士生

机控制的 Keithley 2001 多用表及其内置的扫描卡组成。实验中在不同基板上设计相同的电路连接。基板材料采用电子行业广泛使用的 FR4 有机层压板和经过流延成型和 1500 °C 烧结的 95%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷。金属化布线分别用敷铜 + 电镀和厚膜工艺制作。为了使实验结果具有可比性,所选的两种基板材料的尺寸均为: 40 mm × 40 mm × 1 mm。芯片分别贴在两种基板的几何中心位置。

测试步骤为: 通过金丝球焊先将硅片上待测试电阻所对应的焊盘连接到基板的引脚上, 测量无应力状态下的电阻值; 在基板加热到 60 °C 时将粘合剂充入基板材料与芯片之间, 然后在烘箱内于 150 °C 固化。在有机粘合剂固化过程中测量电阻随温度的变化过程: 在粘合剂完全固化后, 再次测量最后的电阻值。采用的基板材料分别为 FR4 和 95%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷。选用的粘合剂固化温度  $\theta_g$ 、温度系数  $\alpha_1 (< \theta_g)$ 、 $\alpha_2 (> \theta_g)$ 、弹性模量  $E$  及结合强度分别为 135 °C、 $28 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 、 $90 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 、10 和 50 GPa。为了便于分析, 实验所用粘合剂、FR4、Si、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的热膨胀系数分别为: 28, 16, 3.2,  $7.2(10^{-6}/\text{°C})$ 。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 FR4 基板上粘合剂固化过程中的应力变化

图 1 是典型的电阻和温度随固化时间变化的曲线。由于电阻受温度的影响要大于受应力的影响, 所以电阻的变化趋势与温度变化接近。而材料的热扩散需要一定的时间, 导致电阻的变化相对温度存在一定的滞后。仅从单一电阻变化曲线无法系统研究应力的演化, 通常采用测量芯片上不同位置的多组变化值

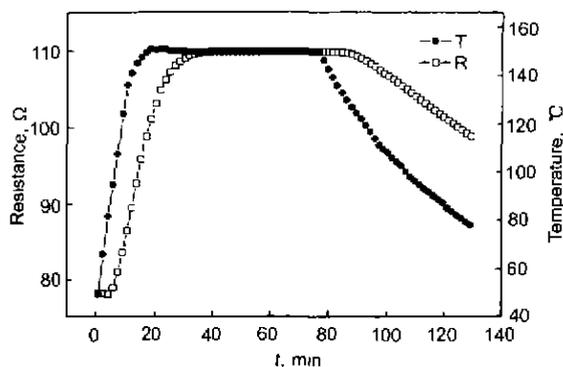


图 1 典型的电阻和温度随固化时间变化曲线

Fig.1 The change curves of resistance and temperature verse curing time

图 2 是 Si 的 (111) 面示意图。由于实验中采用的是基于 (111) 面上的 n 型硅压阻应力传感芯片。根据压阻理论<sup>[2]</sup>, 各点应力分量与电阻变化的关系可用下式表示

$$\frac{\Delta R}{R} = [B_1\sigma'_{11} + B_2\sigma'_{22} + B_3\sigma'_{33} + 2\sqrt{2}(B_2 - B_3)\sigma'_{23}] \cos^2\phi +$$

$$[B_2\sigma'_{11} + B_1\sigma'_{22} + B_3\sigma'_{33} - 2\sqrt{2}(B_2 - B_3)\sigma'_{23}] \sin^2\phi + [2\sqrt{2}(B_2 - B_3)\sigma'_{13} + (B_1 - B_2)\sigma'_{12}] \cdot \sin 2\phi - [\alpha_1 T + \alpha_2 T^2 - \dots] \quad (1)$$

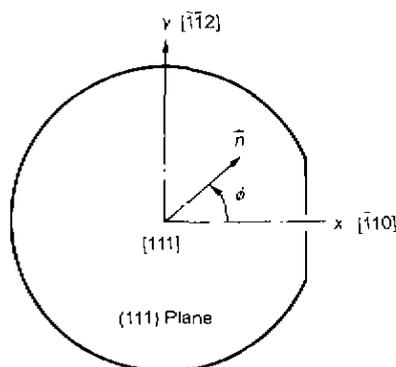


图 2 (111) 硅片

Fig.2 (111) silicon wafer geometry

其中,  $\sigma'_{ij}$  是应力分量,  $\phi$  是  $[\bar{1}10]$  和电阻测量方向 ( $\vec{n}$ ) 之间的夹角,  $T$  是测量温度与参照温度 (即在不受应力的状态下测量电阻时的温度) 的差值,  $B_1, B_2, B_3$  是一系列相互独立的压阻系数。

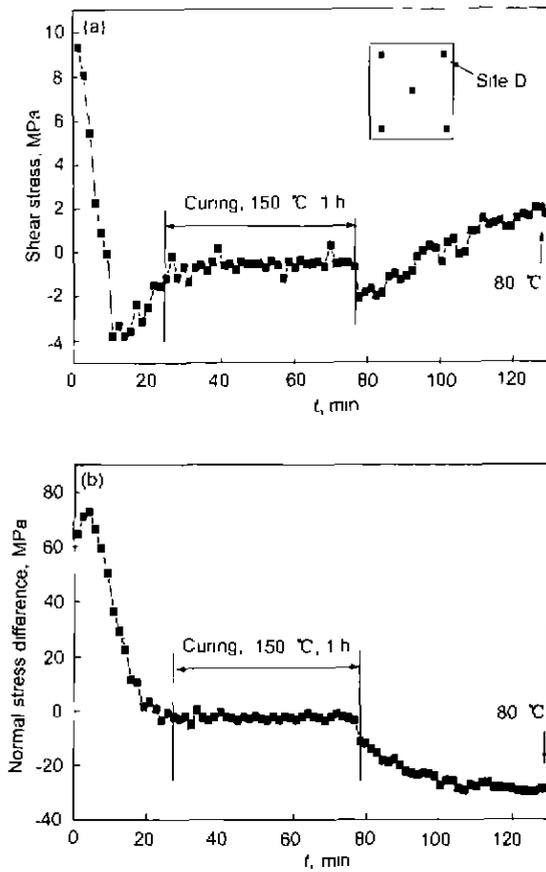
由于板上直接粘贴芯片时的主要研究对象为平面应力, 所以可将上式进行简化。另外, 由于温度系数项对测量的精度影响很大, 所以, 通常只考察以下两个可对温度引起误差进行补偿的平面应力解

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \left( \frac{1}{B_1 - B_2} \right) \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{B_1 - B_2} \right) \left[ \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (3)$$

图 3 是有机粘合剂将芯片粘接在 FR4 基板上固化时芯片表面典型的应力演化。其中, 图 3a 是剪切力在固化过程中的演化曲线, 图 3b 是正应力差在固化过程中的演化曲线。可见, 当固化温度为 150 °C 时 ( $t=20-80$  min), 芯片表面的应力值很小, 其数值在原点上下很窄的范围内波动。在该温度下, 有机粘合剂处于固化温度  $\theta_g$  以上, 粘合剂从液相向固相转变, 粘合剂处于一种相对松弛的状态, 应力接近于零。在  $t=0$  时刻的状态距离固化时的温差最大, 所以应力也处于较高的状态。随着温度的升高 ( $t=0-20$  min), 热失配的效应逐渐减弱, 应力也逐渐降低。在到达固化温度的初期, 应力有一个从负值上升到 0 的过程。这是因为热扩散过程到达平衡需要一定的时间, 因而引起时间上的滞后。在降温过程中 ( $t > 80$  min), 热膨胀系数的失配随着温度的降低而越来越显著, 所以引起应力的再次积累。这与文献 [3] 的结果一致。

固化完成回复至室温 (14.4 °C) 时, 再次测量电阻值。

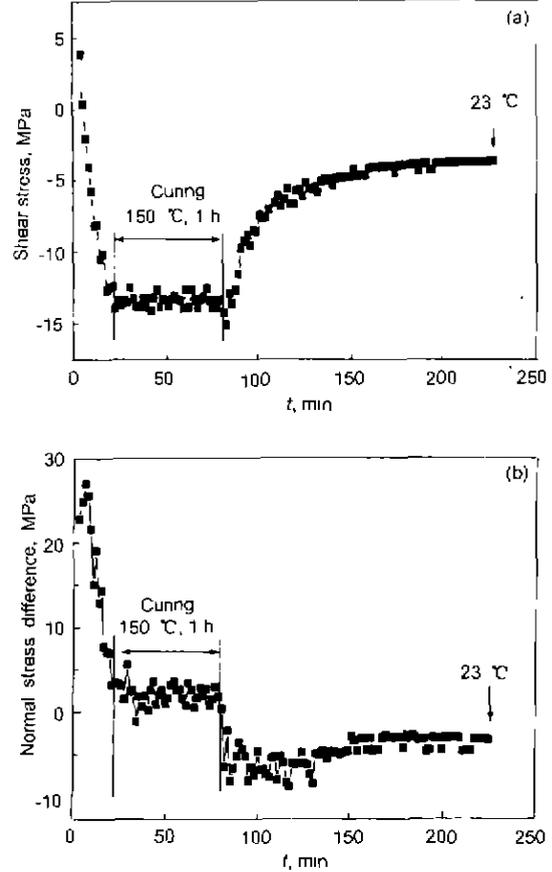


**图 3** 有机粘合剂在 FR4 基板上的固化过程中芯片表面的应力演化曲线  
**Fig.3** The curing stress profile of the organic adhesive on the FR4 substrate measured at the position D on a chip  
 (a) shear stress vs time  
 (b) normal stress difference vs time

根据公式 (2) 和公式 (3) 可计算出芯片角部 D 点的残余应力的值为: 切应力 8.9 MPa, 正应力差为 -2.5 MPa, 该应力水平低于芯片刚粘接到衬底时的值。

**2.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷基板上的粘合剂固化过程的应力变化**

图 4 是有机粘合剂在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上固化时芯片表面的应力演化曲线, 为了更加全面细致地观察固化时的应力演化过程, 在陶瓷基板上测试时将测试曲线一直记录到接近室温附近, 测试结果表明, 在 150 °C 固化 ( $t=20-80$  min) 时, 剪切应力并不象 FR4 基板上所表现的那样, 在零点上下波动, 而是处于一个绝对值较大的负值, 即在基板与芯片之间的界面上存在一个较大的剪切应力。在  $t=0-20$  min 时, 剪切应力的方向逐渐从正值变为负值与图 3 相似的是, 在  $t > 80$  min 时, 随着温度的降低, 剪切应力的绝对值从一个较高水平逐渐开始减小, 并趋于平衡。从正应力差的变化曲线上可以看出, 在 150 °C 固化



**图 4** 有机粘合剂在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷基板上的固化过程中芯片表面的应力演化曲线  
**Fig.4** The curing stress profile of the organic adhesive on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic substrate  
 (a) shear stress vs time measured at the position D on a chip (see Fig.3a)  
 (b) normal stress difference vs time

( $t=20-80$  min) 时, 正应力差在 2.5 上下波动, 且固化后处于较低水平, 表明在  $x$  和  $y$  方向上的正应力差别不大, 这显然与陶瓷材料的各向同性有关。

**2.3 不同基板上残余应力分布比较**

当有机粘合剂固化至室温后, 静置 12 h, 测量在不同基板上固化后的残余应力分布, 其结果列于表 1。这些结果是根据在无应力的自由状态下测得的电阻和固化过程结束后测得的电阻, 并根据公式 (2) 和公式 (3) 计算而得。两次测试都是在室温下测定的 (14.4 °C)。可见, 当采用陶瓷基板时, 剪切应力和正应力的平均值均比采用 FR4 基板时降低了 40% 左右, 导致这一现象可以从不同基板的热膨胀系数的数值得到解释。由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷材料的热膨胀系数 ( $7.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 更接近于硅的热膨胀系数 ( $3.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), 芯片与基体的热失配较小, 所以残余应力较小。另一方面, 芯片上各测试点的统计结果表明, 陶瓷基板上的平面剪切应力绝对值的分布公差较小,

表 1 残余应力分布结果统计

Table 1 The statistics of the distributions of the residual stress

	Shear stress on FR4 substrate	Normal stress difference on FR4 substrate	Shear stress on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ceramic substrate	Normal stress difference on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ceramic substrate
Average, MPa	11.97	15.20	7.28	8.92
Tolerance, MPa	5.53	8.48	2.26	8.46

相对较均匀。总的来说,当芯片直接粘接在基板上时,欲获得较低的残余应力和相对优越的应力分布,采用陶瓷基板要优于 FR4 基板。

### 3 结论

(1) 利用硅压阻传感器可以实时地检测封装中的应力变化。

(2) 在不同基板材料上固化时,应力演化过程不同。对于 FR4 基板,在固化过程中,芯片表面的剪切应力和正应力的值很小,其数值在零点上下很窄的范围内波动。在降温过程中,热膨胀系数的失配随着温度的降低而越来越显著,引起应力的积聚。对于陶瓷基板,在固化过程中,剪切应力并不象 FR4 基板上所表现的那样,在零点上下波动,而是处于一个绝对值较大的负值。在降温过程中,剪切应力的绝对值从一个较高水平逐渐开始减小,并趋于平衡。从正应力差的变化曲线上可以看出,在固化温度时,正应力差在一个较小值上下波动,且固化后处于较低水平。

(3) 采用芯片直接粘接在基板上的方式固定芯片时,欲获得较低的残余应力和相对优越的应力分布,采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷基板要优于 FR4 基板。

感谢香港科技大学 Matthew M F Yuen, Philip C 和 Winky L W Hau 为本实验提供硅压阻传感器芯片。

### 参考文献

- [1] Nguyen L T. *J Electronic Packaging*, 1993; 115: 346
- [2] Bittle D A, Suhling J C, Beaty R E, Jaeger R C, Johnson R W. *J Electronic Packaging*, 1991; 113: 203
- [3] Zou Y, Suhling J C, Johnson R W, Jaeger R C. *IEEE 1998 International Conference on Multichip Modules and High Density Packaging*, New York: IEEE, 1998: 405
- [4] Palaniappan P, Baldwin D F, Selman P J, Wu J, Wang C P. *IEEE Transactions on Electronics packaging Manufacturing*, 1999; 22: 53
- [5] Zou Y, Suhling J C, Jaeger R C. *Proceedings-Electronic Components and Technology Conference*, Piscataway: IEEE, 1999: 1249