

## 各向异性导电胶膜的导电粒子电性能研究

李 慧<sup>1</sup>, 张 军<sup>2</sup>

(1. 黄河科技大学 工学院, 河南 郑州 450006; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 各向异性导电胶膜(ACF)连接线路的导电性能对导电粒子的变形影响很大. 对 ACF 粘接后的导电粒子电阻进行了理论模型的建立, 分析了导电粒子变形程度对其导电电阻的影响, 并与实验结果进行了比较, 吻合很好; 在高温、高湿环境下, 通过对导电粒子回弹进行有限元模拟, 得到了导电粒子回弹量; 并分析了回弹粒子对导电电阻的影响以及导电粒子的数量对总电阻的影响, 得到了各向异性导电胶膜连接的线路最佳的导电粒子变形量和湿热环境对其的导电性能的影响程度.

**关键词:** 各向异性导电胶膜; 粘接界面; 数值模拟; 导电粒子

**中图分类号:** TQ433.4

**文献标志码:** A

### 0 引言

目前电子封装行业中一种更方便、更环保, 成本低廉的连接材料——各向异性导电胶的应用正在悄然兴起<sup>[1]</sup>. 因为各向异性导电胶膜(Anisotropic Conductive Film, 简称 ACF)比其它方法更能实现高的密度(最小间距 37  $\mu\text{m}$ ), 并且在生产过程中易于实现自动化<sup>[2-3]</sup>. 另外, 各向异性导电胶膜能够满足在 IC 器件上具有大量的引脚, 以及使用非常小的架子来满足导电通道且不需要再流过程, 对芯片和基板的影响小.

ACF 是有两层结构的导电胶薄膜, 由导电粒子、胶粘剂、添加剂组成的, 是具有导电性、粘接性、绝缘性的电子及电气各向异性的高分子薄膜. 其中导电粒子赋予各向异性导电胶膜以导电性能, 胶粘剂赋予各向异性导电胶膜以连接性能<sup>[4]</sup>. 影响各向异性导电胶膜粘接电性能可靠性的因素很多, 主要有粘接温度、固化时间、粘接压力、导电粒子含量、金属凸点和基板焊区的平整度以及各向异性导电胶膜的弹性模量等. 目前, 应用于 ACF 电性能可靠性评估的方法. 目前主要包括传统的可靠性失效率预计法和失效物理方法. 通过可靠性试验及其失效机理分析来对 ACF 粘接可靠性进行评价, 目前可以参照的模型有: 热效应模型(Arrhenius Model)、热机械效应模型(Coffin Manson Model)和温度—湿度效应模型(Hallberg

Peck Model)<sup>[5]</sup>. 虽然, ACF 粘接结构是微电子封装中广泛应用连接形式, 然而目前 ACF 在温度、湿度等环境下其粘接可靠性较低. 在温度、湿度载荷的作用下, 使用过程中已成型的 ACF 粘接界面, 由于微裂纹、气泡等缺陷不断扩展, 使界面粘接强度下降, 而且也会引起导电粒子的变形, 影响 ACF 的导电性能<sup>[6-7]</sup>.

笔者通过理论分析, 研究了 ACF 在粘结过程中导电粒子变形、开裂等因素对其电性能的影响, 并应用有限元法对导电粒子在高温、高湿环境下的回弹进行分析, 对比分析了粒子回弹变形对导电粒子电阻和粒子数量对总电阻的影响.

### 1 导电粒子的电阻理论分析

ACF 中含有大量导电粒子, ACF 粘接后导电粒子的总电阻由 4 个约束电阻  $R_c$ 、2 个隧穿电阻  $R_t$  和 1 个粒子电阻  $R_p$  组成, 如图 1 所示. 粒子电阻  $R_p$  是整个电阻的主要部分. 因此, 导电粒子总的粘接电阻的研究主要集中于粒子电阻  $R_p$ .

ACF 粘接后镀镍聚合物的粒子通常呈鼓状, 但在顶部和底部有两个圆面, 分别与金凸点和玻璃接触. 粒子电阻  $R_p$  可由两个圆面电阻  $R_c$  和环形电阻  $R_t$  组成. 镍镀层的电阻表示如下:

$$dR = \frac{dy}{\sigma_N S} \quad (1)$$

式中:  $dy$  是沿当前路径的完整单元的高度;  $\sigma_N$  是

收稿日期: 2011-04-29; 修订日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972200)

作者简介: 李慧(1980-), 女, 河南郑州人, 黄河科技大学讲师, 主要从事界面力学及流体机械方面的研究, E-mail: feng\_109\_1@163.net.

镍传导率即  $2.5 \times 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $S$  是垂直于当前路径方向的面积。

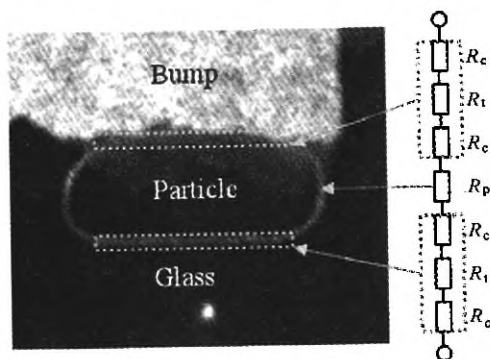


图1 ACF粘接后粒子总电阻组成

Fig.1 Components of particle resistance after ACF bonding

$R_e$ 可以由下式计算:

$$R_e = \frac{1}{\sigma_N \pi} \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+t} \frac{dy}{\left( \sqrt{\left( \frac{h}{2} + t \right)^2 - y^2} + r \right)^2} \quad (2)$$

假设两个圆形接触面没有裂开, 环形电阻表示如下:

$$R_t = \frac{2}{\sigma_N \pi} \int_0^{\frac{h}{2}} dy / \left( \left( \sqrt{\left( \frac{h}{2} + t \right)^2 - y^2} + r \right)^2 - \left( \sqrt{\left( \frac{h}{2} + t \right)^2 - y^2} + r \right)^2 \right) \quad (3)$$

式中:  $h$  是聚合物中心部分的高度;  $t$  是镍镀层的厚度;  $r$  是圆形电阻的半径, 如图2所示。高度  $h$  和半径  $r$  在不同的粘结压力下是不同的, 而厚度  $t$  保持为定值。

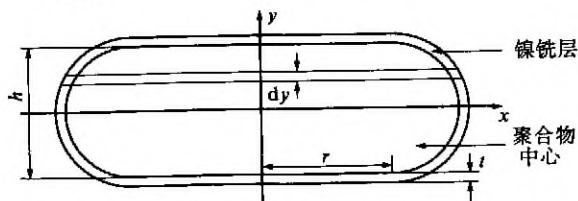


图2 镍镀层聚合物粒子示意图

Fig.2 Profile of a nickel-coated polymer particle

如果粒子变形时镀镍层有裂纹出现, 鼓状镍镀层的电阻不再是环形电阻, 而表示为裂纹电阻。为了计算  $R_e$ , 引入了一个新的参数  $R_v$  可以表示如下:

$$R_v = \frac{2}{\sigma_N \pi} \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{dy}{\frac{\theta_c}{360} \left( \left( \frac{h}{2} + t \right)^2 - y^2 \right) - \left( \left( \frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right)} \quad (4)$$

其中,  $\theta_c$  为裂纹夹角。

$$\frac{1}{R_{er}} + \frac{2}{R_v} = \frac{1}{R_t} \quad (5)$$

可得  $R_{er}$ , 则  $R_p$  可以表示为  $R_p = R_{er} + 2R_e$ 。

粒子电阻  $R_p$  可以由以上公式计算得到, 而且这个方法对于所有的 ACF 组装件无论采用哪种金属覆盖层和聚合物中心均适用。

## 2 粒子变形程度对 $R_p$ 的影响

单个导电粒子受压后的电阻由两个圆面电阻  $R_e$  和一个环形电阻  $R_t$  组成, 即  $R_p = R_t + 2R_e$ 。而由式(2)和(3)可知, 当  $t = 0.15 \mu\text{m}$ , 导电粒子电阻  $R_p$  的计算公式为:

$$R_p = \frac{2}{2.5\pi} \int_0^{\frac{h}{2}} dy / \sqrt{\left( \frac{h}{2} + 0.15 \right)^2 - y^2} + \frac{\pi(3.7-h)}{4} \quad (6)$$

试验测得导电粒子压碎极限是  $h = \frac{1}{3}d$ , 这里

$h$  的变化范围是  $(1/3 \sim 1)d$ ,  $d$  是粒子聚合物中心的直径,  $d = 3.7 \mu\text{m}$ 。

理论计算与实验测试结果对比, 如图3所示, 计算结果与实验吻合较好。在粒子高度变化小的时候, 试验很难测到电阻的变化, 压力过大粒子被压碎电阻会非常大。从计算结果看出, 在粘接压力载荷作用下, 粒子高度  $h$  降低 18.92% 时, 粒子电阻  $R_p$  降低 34%, 可见粒子的变形量对其电阻变化影响很大。而粘接压力过高即粒子高度低于开裂极限  $\frac{1}{3}d$  时, 导电粒子可能被压碎, 会出现断路的情况, 所以导电粒子合理变形量的控制是必要的, 理想的粒子变形是导电粒子最大限度的压缩但不能破裂。

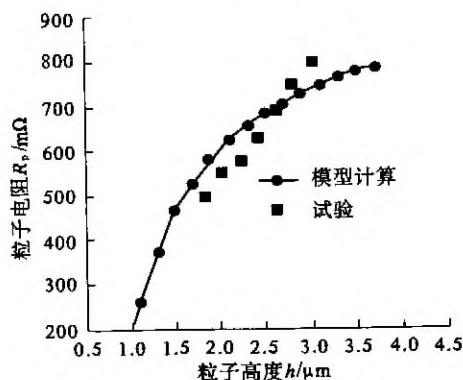


图3 粒子变形高度  $h$  和  $R_p$  的关系

Fig.3 Relationship of  $h$  and  $R_p$

### 3 回弹对粒子电阻的影响

由于粒子的变形量对 ACF 粘接的线路电阻变化影响很大,在温度和湿度环境下,导电粒子会出现回弹现象,为了研究回弹对导电粒子电阻的影响,对其进行有限元建模分析,导电粒子的正常工作环境是 20 ℃,而在 85 ℃ 和湿度 85% 的环境下,建立模型如图 4 所示。

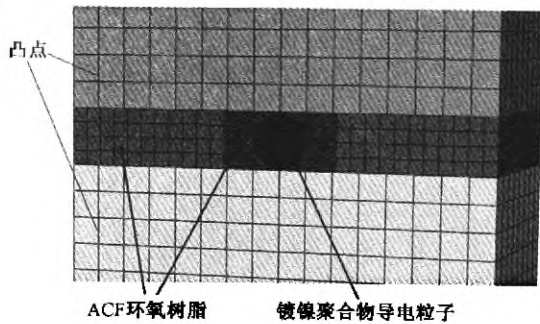


图 4 有限元模型  
Fig. 4 Finite element model

为了观察清晰,而且模型对称,仅取半个模型显示。模型中所用部件的结构尺寸见表 1。此 ACF 粘接结构包括玻璃基板、集成 IC 芯片、环氧树脂胶体、金凸点、一个导电粒子,物理性质如表 2 所示。

表 1 模型中所用部件的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of the all parts $\mu\text{m}$					
元件	长度	宽度	高度	直径	厚度
金凸点	30	30	15	—	—
聚合物导电粒子	—	—	—	3.7	—
镍镀层	—	—	—	—	0.15
IC	160	90	90	—	—
玻璃基板	160	90	90	—	—

表 2 有限元模型所用材料参数

Tab. 2 Material parameters of the FEM simulation			
材料	弹性模量/GPa	泊松比	膨胀系数/ ( $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ )
IC 芯片	131	0.266	4.2
环氧树脂	0.01(未固化)	0.25	70(293 K), 70(410 K) 150(413 K), 150(493 K)
	1(固化)		
	3(冷却)		
金凸点	77.2	0.30	14.4
玻璃	70.0	0.19	—
镍	207.0	0.31	15
聚合物	4.5	0.33	60

该对称结构的  $yz$  平面内  $x$  方向上的位移和转动固定,由约束条件  $U1 = UR2 = UR3 = 0$  限制。

玻璃基板底面  $xy$  平面内  $z$  轴方向上的位移和转动固定,由  $U3 = UR1 = UR2 = 0$  限制。镍镀层和聚合物中心的互连及镍镀层和环氧树脂的互连约束均设定为绑定约束。对称的  $xz$  面内  $y$  轴方向上的位移和转动固定,由  $U2 = UR1 = UR3$  限制。

此模型中镍镀层、IC 芯片、玻璃基板的网格单元类型均为 C3D8R,网格为六面体网格;聚合物所采用的网格单元类型为 C3D8R,共有 13 978 个单元;IC 芯片凸点和玻璃凸点均采用网格单元类型为 C3D8R;ACF 的网格单元类型为 C3D8R,细化部分采用四面体网格,单元类型为 C3D4。

在粘接压力作用下,环氧树脂胶体和导电粒子的变形模拟结果如图 5 所示。而在高温、高湿(85 ℃ 和湿度 85%)环境下 ACF 粘接结构的变化如图 6 所示。在以上两种情况下,导电粒子变形对比的模拟结果如图 7 所示。

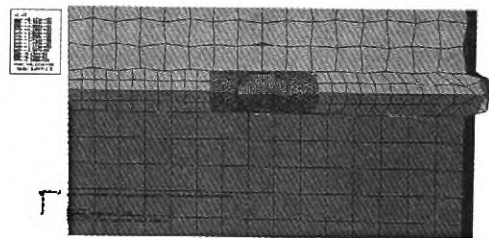


图 5 粘接压力下变形  
Fig. 5 Deformation degree under bonding pressure

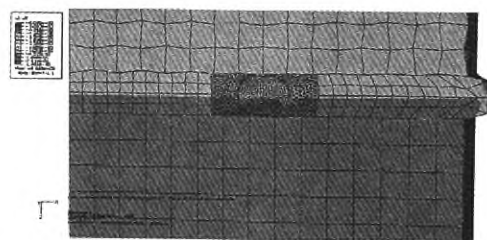


图 6 85 ℃ 和湿度 85% 环境下回弹变形  
Fig. 6 Rebound of the conductive particle under 85 ℃ 和 85% RH ambience

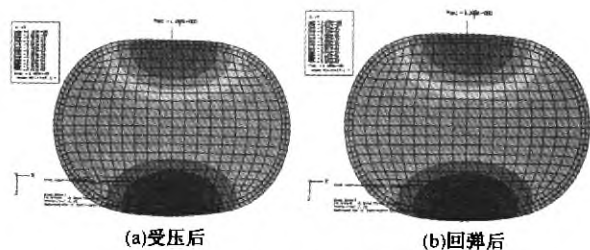


图 7 粒子的模拟结果  
Fig. 7 Simulation of the particle after pressure and after rebound

由模拟结果测量可知,在 85 ℃ 和湿度 85% 环境下,受压后的导电粒子变形高度增加 0.08

$\mu\text{m}$ . 且导电粒子与焊区金属的接触面积会减小,由式(6)可知,单个导电粒子的电阻  $R_p$  增加为  $1.3\text{ m}\Omega$ . 实际生产中,一个线路中导电粒子数量一般都是在5个以上,低于此值会影响 ACF 的导电性能. 假设每个粒子电阻  $R_p$  相等,由于粒子电阻  $R_p$  之间是并联关系,所以总电阻  $R = R_p/n$  (其中  $n = 1, 2, 3, \dots$ ). 随着粒子数量的逐渐增加,总电阻逐渐减小. 在高温、高湿环境下,5个导电粒子的单回路的电阻会增加  $0.26\text{ m}\Omega$ .

#### 4 结论

分析了 ACF 粘接后导电粒子的导电机理,对导电粒子的镀镍层开裂和不开裂两种情况下的电阻计算分别建立了数学模型. 模型的计算结果与实验结果吻合较好,说明此模型可以用来计算导电粒子变形后的电阻. 通过理论模型的分析发现,导电粒子的变形量对其电阻变化影响很大,建议 ACF 在粘接时,导电粒子变形在不压碎的情况下导电粒子压得越扁越好,这样,导电粒子的电阻会越小. 通过对导电粒子在高温、高湿环境下回弹进行有限元模拟,得到了导电粒子的回弹量,并计算出单个导电粒子的电阻增加量和单独线路的电阻增加量,这些对 ACF 的使用和深入研究都具有意义.

#### 参考文献:

- [1] YAMAGUCHI M, ASAI F, ERIGUCHI F. Development of novel anisotropic conductive film (ACF) [C]//8th IEEE Electronic Components and Technology Conference. 1999: 360-364.
- [2] CHEN Xu, ZHANG Jun. Effects of different bonding parameters on the electrical performance and peeling strengths of ACF interconnection[J]. Microelectronics Reliability, 2005, 46(1): 774-785.
- [3] 张军,陈旭. 各向异性导电胶粘接可靠性研究进展[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(1): 35-38.
- [4] 黄丽娟,曾黎明. 微电子封装用各向异性导电胶的研究进展[J]. 化学与黏合, 2009, 31(3): 57-77.
- [5] 严钦云,周继承,杨丹. 导电胶的粘接可靠性研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(5): 30-33.
- [6] XIE Bin, SHI Xiao-qing, DING Han. Investigation of mechanical and electrical characteristics for cracked conductive particle in anisotropic conductive adhesive (ACA) assembly[J]. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2008, 30(3): 361-369.
- [7] XIE Bin, SHI Xiao-qing, DING Han. Understanding of delamination mechanism of anisotropic conductive film (ACF) bonding in thin liquid crystal display (LCD) module [J]. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2007, 30(3): 509-516.

### Analysis of Conductive Particle Electric Characteristics for Anisotropic Conductive Adhesive Film

LI Hui<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>

(1. School of Technology, Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou 450006, China; 2. School of Chemical Engineering & Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The electric characteristics connected by anisotropic conductive adhesive film greatly influence the deformation of the conductive particle. In this study, the theory model was set up to calculate the conductive particle resistance after ACF bonding. The effects of the deformation of the conductive particle on its resistance were analysed. The result was in good agreement with the experiments. The rebound of the conductive particle under the high temperature and humidity ambience was simulated using FEM, and the deformation was determined. The effects of the rebound of the conductive particle of ACF on its resistance were investigated, and the effects of the number of the conductive particle on the total electrical properties were also studied. The optimal deformation of the conductive particle connected by ACF and the effects of the thermal and humidity ambience on its electric characteristics were obtained.

**Key words:** anisotropic conductive adhesive film; bonding interface; FEM; conductive particle