

HDI 任意层互连技术 导电膏塞孔的 可靠性及其对电性能的影响

广州兴森快捷电路科技有限公司 李娟

前言

导电膏塞孔是实现任意层互连的技术方案之一，其雏形是松下的 ALIVH (Any Layer Interstitial Via Hole) 技术和东芝 B2it (Buried Bump Interconnection Technology) 技术 [1]。任意层互连技术发展的一个关键技术是微孔化，即层与层之间通过微孔进行导通互连。微孔加工目前激光钻孔技术可以实现；而在微孔金属化技术这块，目前主要分三种：电镀填孔、导电材料塞孔、铜凸块 [1]。其中，导电膏互连技术由于其用导电膏替代电镀进行填孔，不仅精细线路、高厚径比等制作工艺难度降低，流程简化；而且可以实现绿色生产，节省能源等特点，因此该技术具有广阔的发展前景。

导电膏主要成分是铜、锡、环氧树脂，因此导电率较电镀铜差，其结合与导通机理区别于电镀铜方式，主要是通过高温烧结在焊盘表层形成铜锡合金互连 [2]。文章通过实验设计，评估了导电膏塞孔互连对于高速信号完整性的影响，同时评估了材料热膨胀系数与多阶盲孔设计可靠性问题，为该技术的推广应用提供技术参考。

1 试验部分

1.1 试验材料与仪器

材料：very low loss 覆铜板和半固化片、导电膏等。
仪器：四端口网络分析仪、高低温冲击试验箱、金相显微镜。

1.2 试验设计

(1) 导电膏塞孔互连可靠性评估：

为评估导电膏塞孔互连结构可靠性，分别设计了 30

ppm/°C、35 ppm/°C、45 ppm/°C 不同 CTE 材料的测试板。同时设计了 1、3、5、7、11 阶盲孔塞孔互连设计。可靠性测试条设计如下：



图1 温度冲击测试模块设计示意图

(2) 塞孔互连对电性能影响：

为确定导电膏塞孔对于高速信号传输信号完整性影响，设计了 8 层板。采用阻抗计算软件进行阻抗设计，单端阻抗设计为 50 Ω；差分阻抗设计为 100 Ω。其叠层结构及阻抗线设计如下：

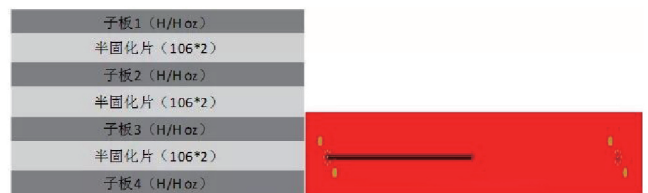


图2 测试板叠层结构设计示意图

图3 损耗测试模块设计示意图

2 结果与讨论

2.1 塞孔互连可靠性影响

2.1.1 材料 CTE 影响

(1) 材料 CTE 可靠性原理分析

根据范 米塞斯屈服准则 [3]，盲孔结构等效应力公式如下：

$$\sigma = \frac{E_f}{1-\nu_f} (\alpha_f - \alpha_s) (T_d - T_0) \quad (式1)$$

其中, E_f 表示孔内物质弹性模量, ν_f 表示孔内物质泊松比, α_f 表示孔内物质热膨胀系数, α_s 表示层间介质材料 $< T_g$ 下热膨胀系数, T_d 表示测试最高温, T_0 表示测试最低温。因此, 可将以上等效应力公式转化为:

$$\sigma = \frac{E_f}{1-\nu_f} (\alpha_f - \alpha_s) (T_d - T_0) = f(x_1) * \Delta\alpha \quad (\text{式2})$$

式中, $\Delta\alpha$ 为热膨胀系数差异。在温度冲击过程中, 受材料变形产生孔内应力的影响, 电阻值相应产生一定的改变。从而可以将孔内应力与阻值变化之间建立函数关系:

$$\sigma = \frac{E_f}{1-\nu_f} (\alpha_f - \alpha_s) (T_d - T_0) = f(x_2) * \Delta R \quad (\text{式3})$$

因此, 从以上推论可知:

$$\Delta R \propto \Delta\alpha \quad (\text{式4})$$

即: 在固定温度冲击测试温度、时间等测试条件下, 其可靠性结果正比于产品设计材料之间的热膨胀系数差异 [3-6]。

(2) 材料 CTE 可靠性验证

图 4 为不同 CTE 材料 1 阶盲孔设计对应 $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 温度条件, 200 次温冲循环阻值变化关系曲线。相同设计下, 随着盲孔塞孔材料与板材之间 CTE 差异的增大, 其温度冲击过程中孔内界面应力增大, 从而导致温冲前后阻值变化增大。因此, 对于产品设计, 为满足更好的可靠性, 材料 CTE 越接近越好, 而不是 CTE 越小越好。

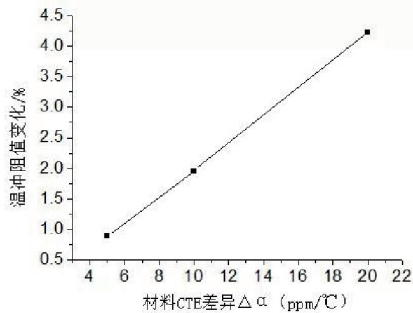


图4 材料CTE差异对可靠性影响

2.1.2 塞孔阶数设计影响

图 5 是相同材料下不同盲孔阶数叠孔设计对应 $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 温度条件, 200 次温冲循环阻值变化关系曲线。随着盲孔叠孔阶数的增加, 受外界温度冲击时内部应力叠加, 导致热胀冷缩过程变形量增大, 温冲阻值变化相应增大。该阻值变化值直接体现产品可靠性, 因此, 产品设计时应考虑叠孔影响。避免叠孔层数太多导致可靠性不良。从实验结果可知, 导电膏塞孔烧结互连结合力较好, 盲孔叠孔阶数每增加一层, 阻值变化增大 0.174%。盲孔设计 11 阶时, 温冲前后阻值变化为 6.88%, 满足 $\pm 10\%$ 变化标准。

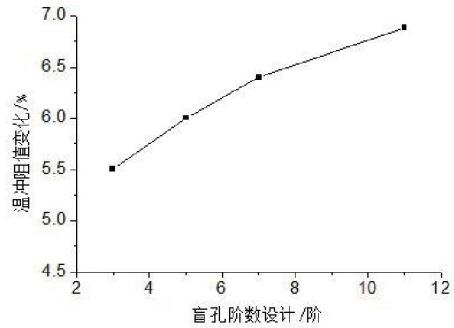


图5 盲孔阶数设计对可靠性影响

2.1.3 塞孔气泡影响

孔内气泡主要受两方面影响: 一是导电膏内部空气、挥发性成分存在, 热固化烧结时没有排出残留; 另一方面受塞孔过程压力、速度、抽真空等导致塞孔不饱满影响。因此, 气泡或多或少会有存在, 一般直径大小 $< 20 \mu\text{m}$ 。

图 6 是 11 阶盲孔叠孔设计华为无铅 $+288^\circ\text{C}$ 三次漂锡处理后的切片图。从图可以看出, 孔内导电膏中不均匀的分布有一些气泡。但是热应力测试后, 盲孔顶部及孔壁与介质材料界面都未发现分层等问题。图 7 为盲孔顶底与铜面烧结界面 IMC 层扫描电镜观测图。热应力处理前后, IMC 层保持完好, 未出现裂痕等不良问题。因此, 塞孔气泡存在烧结完全的情况下, 对产品可靠性无明显影响。

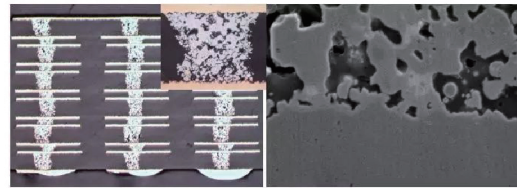


图6 盲孔热应力处理后切片图

图7 盲孔热处理后底部IMC烧结电镜图

2.1.4 孔底残胶影响

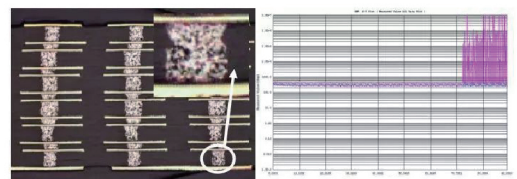


图8 失效孔切片及温冲测试失效过程监控图

除塞孔控制外, 激光钻孔是导电膏塞孔互连工艺非常重要的一环。当孔底激光钻孔树脂或碳膜未清除干净, 塞孔后残留树脂或碳膜会阻碍孔内导电膏与底铜的烧结, 无法形成连续、均匀的 IMC 层, 直接决定了信号导通性和可靠性。上图 8 是孔底树脂残留导致温冲过程中盲孔失效过程监控图。

对上图失效处切片可知, 孔底与底铜结合处出现裂痕。对此处的导电膏树脂、介质层树脂和激光孔孔底与导电膏结合处进行元素分析对比可知, 导电膏中的树脂与介

质层树脂差别在于介质层树脂中含有 Si 元素。而在激光孔孔底结合界面元素分析发现 Si 元素的存在，说明激光钻孔有树脂残留。因此，导电膏塞孔工艺，需对激光钻孔品质进行过程严格管控保证产品质量。

表1 导电膏树脂、介质层树脂和激光孔孔底与导电膏结合处的元素含量对比

序号	元素	元素重量百分比		
		导电膏树脂	介质层树脂	盲孔孔底结合界面
1	C	57.48	37.79	30.43
2	O	8.17	34.03	9.93
3	Mg	/	2.20	0.69
4	Al	0.72	19.35	2.72
5	Si	/	4.55	1.66
6	Cu	32.53	2.08	54.56
7	Sn	1.10	/	
8	总量	100.00	100.00	100.00

2.2 塞孔互连信号完整性影响

2.2.1 塞孔互连对阻抗的影响

下图9是导电膏塞孔与常规电镀填孔工艺相同设计下单端过孔阻抗对比。由于导电膏电导率较电镀铜大，导电膏塞孔过孔阻抗较电镀填孔过孔阻抗大 $2\ \Omega$ ，两者之间过孔阻抗差异在4%左右。因此，对于导电膏工艺制作，在前端工程阻抗设计时需进行评估补偿。

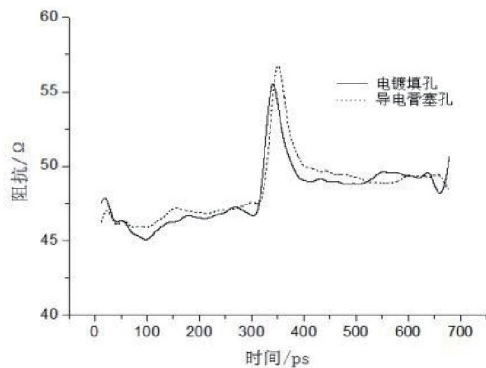


图9 导电膏塞孔与电镀填孔过孔阻抗

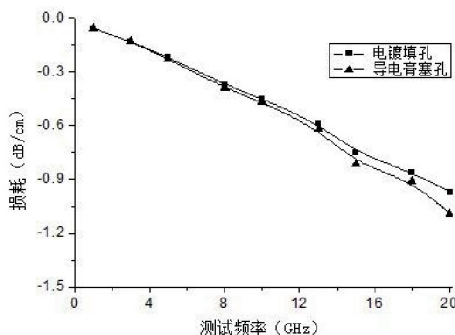


图10 电膏塞孔与电镀填孔过孔损耗

2.2.2 塞孔互连对损耗的影响

图10是导电膏塞孔与常规电镀填孔工艺相同设计下单端损耗测试结果。在12.5 GHz测试频率下，导电膏塞孔与电镀填孔损耗分别为0.62 dB/cm和0.59 dB/cm，两者之间差异0.03 dB/cm；当测试频率继续增大，两者之间损耗差异开始明显。频率增大到20 GHz时，两者损耗差异增大到0.12 dB/cm。因此，25G以下高速产品采用导电膏塞孔工艺信号损耗基本无影响。但对于更高速需求产品的应用则需评估塞孔互连对信号完整性影响来确认。

3 结论

通过以上试验，得出以下结论：

(1) 材料的选择对于导电膏塞孔互连可靠性有着至关重要的影响，选择与导电膏CTE越接近的材料、优化盲孔设计、做好激光钻孔品质管控是提升导电膏塞孔互连产品可靠性的关键；

(2) 随着盲孔叠孔层数的增加，失效概率直线增大。常规Z-CTE值45 ppm/°C左右的材料，其盲孔叠孔设计11阶可靠性测试满足IPC标准要求。推论预估设计达到30阶时会出现温冲循环测试前后阻值超过 $\pm 10\%$ 而失效；

(3) 导电膏塞孔互连工艺对25G以下高速产品应用时信号传输无明显影响；但随着信号或频率继续增大，由于导电膏电阻率较电镀铜大的原因，信号损耗开始有明显差异。■

参考文献

- [1] 黄勇. 任意层互连技术应用研究 [J]. 印制电路信息, 2012, 10: 52-52.
- [2] Chet A. 复杂PCB制造中使用常规的逐层层压方法与导电胶互连方法的成本比较 [J]. 印制电路信息, 2014, 12: 72.
- [3] 杨婷. 电子科技大学, 盲孔压接背板塞孔互连研究 [M]. 硕士学位论文, 2016.
- [4] 林佳. 浅谈CTE及其对FC_BGA焊点可靠性的影响 [J]. 印制电路信息, 2013, 11: 31-33.
- [5] 舒桃林. 华南理工大学, 热应力对铜互连结构可靠性影响的研究 [M]. 硕士学位论文, 2011.
- [6] 嵇凤丽. 哈尔滨工程大学, 集成电路铜互连热应力仿真分析研究 [M]. 硕士学位论文, 2012.

作者简介

李娟：女，硕士研究生，现就职于广州兴森快捷电路科技有限公司。