

P 对 Au/Ni/Cu 焊盘与 SnAgCu 焊点焊接界面可靠性的影响

陆裕东^{1,2}, 何小琦², 恩云飞², 王 歆¹, 庄志强¹

(1. 华南理工大学 特种功能材料教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

(2. 信息产业部电子第五研究所, 广东 广州 510610)

摘 要: 采用回流焊工艺在 ENIG 镀层印制电路板上组装 289 I/Os 无铅 Sn-3.0Ag-0.5Cu 球栅阵列封装器件, 对封装后的电路板进行随机振动可靠性试验, 采用 X-Ray、SEM 和 EDX 等测试确定焊点在随机振动试验过程中的失效机制, 探讨焊点沿界面失效与镀层内 P 元素的分布和含量的关系。在振动试验中失效和未失效的 BGA 焊点与镀层界面表现出类似的微观形貌, Ni 层因被氧化腐蚀而在焊点截面形貌上出现“缺齿”痕迹, 而在表面形貌图上此呈现黑色的氧化腐蚀裂纹。P 在镀层表面的聚集对 Ni 的氧化腐蚀有促进作用, 同时 P 的聚集也明显降低焊点结合界面的机械强度。Ni 层的氧化和 Ni 层表面 P 元素的聚集是引发焊点沿焊点/镀层结合界面开裂的主要原因。

关键词: 化学镀镍浸金; 镀层; 回流焊工艺; SnAgCu

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0477-04

自 20 世纪 90 年代以来, 化学镀镍浸金 (ENIG) 作为印制电路板 (PCB) 表面镀层的主要材料之一, 广泛应用于电子线路板生产工艺中^[1~3], 特别是近年来随着无铅化电子制造工艺的推广^[4,5], 无铅 ENIG 镀层的应用越加普遍。该镀层主要防止铜引线和焊盘的氧化, 同时保证焊盘的可焊性。但是, 由于材料和工艺方面的因素, ENIG 在实际的服役过程中也产生了较多的可靠性问题。例如, ENIG 镀层与 SnPb 钎料焊接后形成 AuSn₄ 相, 如果 Au 层过厚, 在固态老化过程中, 这些针状 AuSn₄ 迁移到 Ni 的表面上去, 在其上形成一个均匀的 (Au,Ni)Sn₄ 层, 这个 (Au,Ni)Sn₄/Ni₃Sn₄ 界面很脆, 一些焊点即会沿此界面开裂^[6]。因此, 有关 ENIG 镀层的材料和工艺因素、以及后续的组装工艺中的可靠性问题, 成为近年来的研究热点之一^[7]。

由于化学镀 Ni 过程中作为还原剂的次磷酸盐同时会发生歧化反应, 使镀 Ni 层中含有一定量的 P, 形成事实上的 Ni-P 沉积层。而 P 在 ENIG 镀层中的含量和分布都可能影响到镀层和焊点的焊接界面的可靠性, 因此 ENIG 镀层制备工艺中的一个关键参数是 Ni(P)层中的 P 含量和分布。本研究对采用回流焊工艺在 ENIG 镀层基板上焊接的球栅阵列封装 (BGA) 器件进行随机振动试验, 确定焊点在随机振动试验过程

中的失效机制, 探讨焊点沿界面失效与镀层内 P 元素的分布和含量的关系。

1 实 验

将 289 I/Os 无铅 Sn-3.0Ag-0.5Cu BGA 器件采用 260 °C 回流焊工艺组装到 ENIG 镀层处理的 FR4 基板上, ENIG 镀层中的 P 含量大约为 6.5% (质量分数, 下同)。对封装后的 PCB 板进行随机振动可靠性试验, 振动频率为 8~2000 Hz, 功率谱密度为 0.08 g²/Hz, 振动方向沿 x、y、z 3 个方向, 振动时间为 3 min (每个方向)。在随机振动试验时进行电性能监测, 判定 PCB 电路板上 BGA 焊点是否失效。采用 X 射线透视系统 (X-ray) 观察焊点的焊接质量, 并通过 SEM 和 EDX 对失效和未失效焊点分别进行微观结构分析, 确定焊点在随机振动试验过程中的失效机制。

2 结果与讨论

图 1 是在振动试验中发生失效的 BGA 器件 X 射线透视分析的典型实验结果 (其分辨率为微米级, 可以检查焊点的桥连、较大空洞、断裂等微米级的互连缺陷问题)。从图 1 可以看出, 失效焊点中并未存在漏焊、锡渣残留或较大空洞等焊接缺陷引起的失效, 因而可

收稿日期: 2008-03-11

基金项目: “十一五” 总装备部预研项目 (51323060305); 信息产业部电子第五研究所科技发展基金 (XF0726130) 资助

作者简介: 陆裕东, 男, 1979 年生, 博士后, 广州市 1501 信箱 05 分箱, 信息产业部电子第五研究所重点实验室, 广州 广东 510610, 电话: 020-8723-7935, 传真: 020-8723-7185, E-mail: yudonglu@yahoo.com.cn

以排除由焊接缺陷引起的焊点失效，焊点的失效主要是由焊点材料本身以及焊点与镀层界面引起。

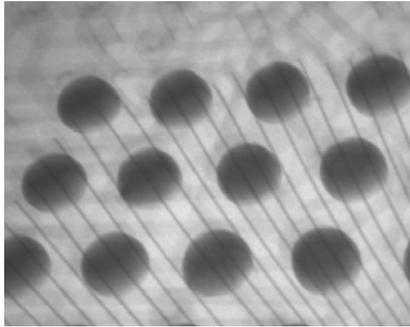


图 1 BGA 器件焊点代表性 X 射线透视照片
Fig.1 Representative X-ray image of BGA solders

进一步对失效 BGA 器件焊点进行金相切片和扫描电镜分析，图 2 是 BGA 器件中发生开裂失效的焊点整体和局部截面 SEM 照片。此焊点位于 BGA 器件的最右边，金属间化合物 (IMC) 与 PCB 焊盘 Ni(P) 层间存在 100% 开裂 (如图 2a 所示)。ENIG 镀层表面的 Au 镀层较薄，回流焊过程中溶入焊料中形成 AuSn₄ 相^[6]，Ni(P)层与 SnAgCu 焊料反应形成 (Cu, Ni)₆Sn₅ 金属间化合物。位于 Au 保护层以下的 Ni(P)层，从试样

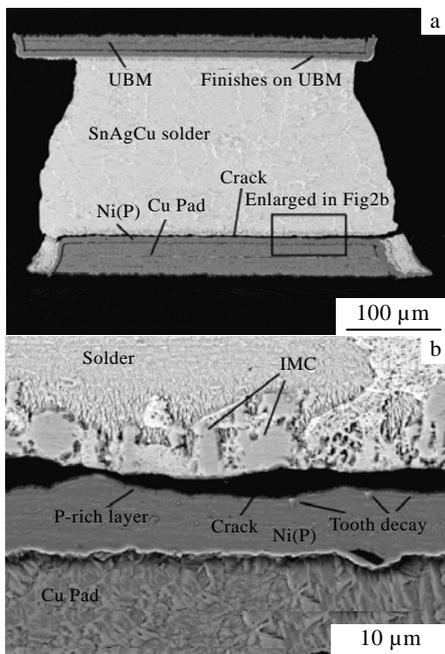


图 2 振动试验中开裂焊点的 SEM 照片
Fig.2 SEM image of crack solder failed in vibration test: (a) cross-sectional image of solder joint and (b) enlarged image of the interface between solder and pad

截面 SEM 照片来看，除了未参加反应的 Ni(P)层外，Ni(P)层表面形成了一薄层颜色较深的化合物层 (如图 2b 所示)。图 3 是未失效焊点的整体和局部 SEM 照片。经过随机振动试验后，许多焊点虽然没有发生开裂失效，但是镀层与焊点界面的微观形貌基本一致：在 Ni(P) 镀层和 (Cu, Ni)₆Sn₅ 金属间化合物间存在一层颜色相对较深的薄层。

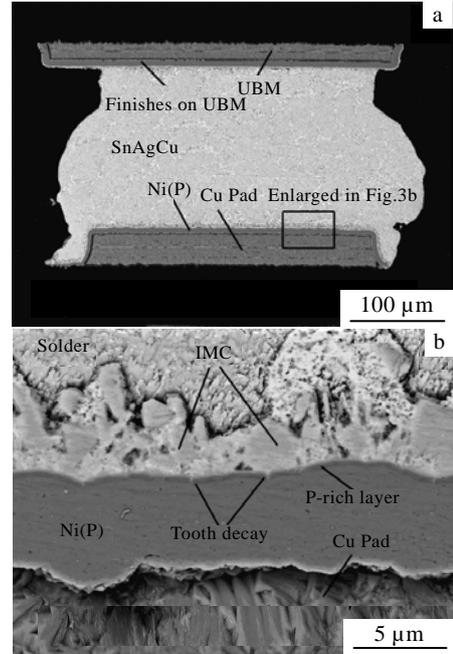


图 3 振动试验中未开裂焊点的 SEM 照片
Fig.3 SEM image of crack-free solder after vibration test: (a) cross-sectional image of solder joint and (b) enlarged image of the interface between solder and pad

图 4 是分别对图 3 中 Ni(P)镀层和富 P 层的 EDX 能谱分析。EDX 分析表明，与未参加反应的 Ni(P)层相比，Ni(P)层表面为一薄层富 P 层，P 含量达到了 12%(Ni(P)镀层中的 P 含量大约为 6.5%)。富 P 层的形成主要是由于回流焊过程中 Ni(P)层表面结晶形成 Ni₃P 化合物，同时 Ni 与焊料反应形成 (Cu, Ni)₆Sn₅ 金属间化合物，使 P 逐步在 Ni(P)层表面聚集。从图 2b 来看，Ni(P)层表面的富 P 层并不连续，存在许多导致富 P 层断裂的缺口，这一现象在未失效焊点中也可观察到(如图 3b 所示)。

对失效的 BGA 器件进行热风拆除后，发现许多 PCB 板焊盘上存在局部区域的不润湿 (如图 5 所示)，这些不润湿区域是导致焊点在振动试验中失效的主要位置。进一步对有局部不润湿区域的焊盘进行选择腐蚀后观察 Ni 层表面的微观形貌，从 Ni(P)层表面的 SEM

图片（如图 6 所示）可以看出，去除 ENIG 镀层表面的 Au 层后，Ni(P)镀层表面存在“泥裂”现象，这表明表面 Ni(P)层已发生氧化。在 Ni(P)层表面浸 Au 之后，Ni(P)层就已被完全覆盖，不可能产生氧化现象，而 ENIG 镀层焊接之后已被焊料完全覆盖，更不可能发生 Ni(P)层的氧化。因此，Ni(P)层的氧化主要是由于 Ni(P)层浸 Au 之前或浸 Au 过程中形成的。Ni(P)层被氧化后，焊接时焊点只是在氧化的 Ni 表面附着，BGA 器件组装后进行板级电性能测试时会通过功能测试，随着氧化程度加深，一旦发生冲击、振动、碰撞等外力作用时，焊点就会沿氧化层开裂导致互连失效。

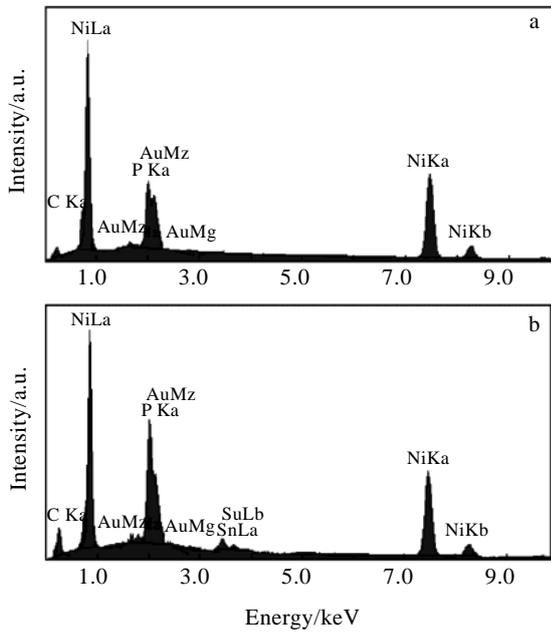


图 4 Ni(P)镀层和富 P 层（图 3 中）的 EDX 能谱分析
Fig.4 EDX spectra of Ni(P) (a) and rich-P (b) finishes(in Fig.3)

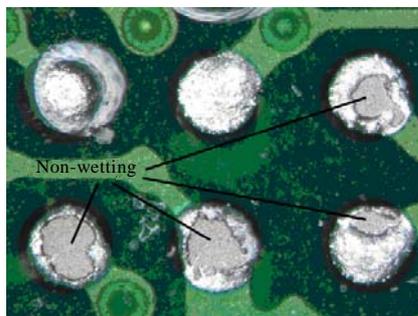
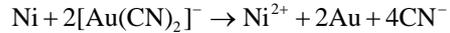


图 5 PCB 板焊盘上存在的典型不润湿区域
Fig.5 Representative photo of no-wetting area on PCB board

从焊点的截面 SEM 照片（图 3b）可以看到，镀层表面富 P 层中存在因 Ni 层被腐蚀而形成的“缺齿”痕迹，这一腐蚀痕迹对应图 6b 中黑色的氧化腐蚀裂

纹。这种由于焊盘氧化后发黑的现象在电子组装工艺中称为“黑焊盘现象”^[7]。图 6b 所示的 Ni(P)层氧化腐蚀主要是由 ENIG 工艺过程引起。ENIG 工艺过程中，由于 Au 与 Ni 之间存在电位差，浸 Au 过程实际上是 Au 与 Ni 的置换反应：



如同浸 Ag 一样，这种置换反应自身是有自动结束效应的，即当 Ni 层界面被 Au 层所密封而无 Ni 可溶时，Au 层的沉积也将停止。但是由于 Au 原子的半径较大，其在 Ni 原子表面的排列无法达到很好的致密性，反而形成很多间隙疏孔。这就为置换反应的继续提供了通道，而且浸 Au 用溶液可能埋藏于这些孔隙中。当浸 Au 用溶液由于某种原因呈现过度活性时，将造成局部镀 Ni 表面非规律性的过度氧化，形成如图 6b 所示的黑色氧化腐蚀裂纹。纵使 Au 层沉积完成之后，其与 Ni 的界面间事实上已经存在的 Ni 氧化物最终将导致失效现象的发生。

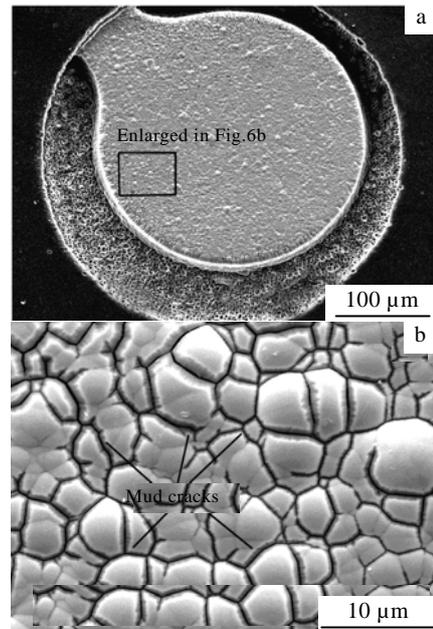


图 6 Au/Ni/Cu 焊盘选择性腐蚀后 Ni 层表面 SEM 照片和 Ni 层表面局部放大图

Fig.6 Surface SEM image of Ni finish on Au/Ni/Cu pad after selective eroded(a) and enlarged image of pad in Fig. 6a(b)

目前有关 P 在 Ni(P)镀层表面的聚集对 Ni 镀层发生黑焊盘现象存在两种截然不同的观点：部分研究认为，P 元素在 Ni 镀层与焊料界面的聚集和黑焊盘现象的发生有直接的关系^[8]；而另有研究者认为，在浸 Au 工艺中增加 P 元素的含量至 8%~12%可以增加焊盘的抗氧化腐蚀能力^[2,3]。目前虽然 P 元素对黑焊盘现象

的作用机制尚不明确,但是,从本研究结果来看,Ni 镀层中的“缺齿”现象只发生在富 P 层(如图 3b 所示),说明 Ni(P)镀层的氧化腐蚀主要发生在富 P 层,这说明 P 在镀层表面的聚集对焊盘的氧化腐蚀存在促进作用。同时,P 元素在 Ni 层表面的富集会造焊盘焊接强度的下降,在实际使用环境中经受振动、冲击等应力作用时,富 P 层成为焊点开裂的首要位置。因此,无论从焊点/镀层界面的结合强度,还是 Ni 焊盘的氧化腐蚀来看,实际应用中要尽可能保证 Ni(P)层中的 P 含量不至过高(工业应用中一般控制在 6%~10%为宜),同时要尽可能地降低 P 元素在 Ni(P)层表面的聚集,以提高焊接界面的结合强度。

3 结 论

1) 在振动试验中失效和未失效的 BGA 焊点与镀层界面表现出类似的微观形貌,在 Ni(P)镀层和(Cu,Ni)₆Sn₅ IMC 间存在一层颜色相对较深的富 P 层。

2) Ni 层因被氧化腐蚀而在焊点截面形貌上出现“缺齿”痕迹,而在表面形貌图上此呈现黑色的氧化腐蚀裂纹。

3) Ni 层的氧化和 Ni 层表面 P 元素的聚集,是导致试验焊点界面结合强度下降、引发焊点沿焊点/镀层结合界面开裂的主要原因。

4) 目前尚不清楚 P 元素的聚集对 Ni 层氧化的作用机制,但是 P 在镀层表面的聚集对 Ni 的氧化腐蚀有促进作用,同时 P 在 Ni 层表面的聚集也明显降低了焊点结合界面的机械强度。

参考文献 References

- [1] Sun P, Andersson C, Wei X *et al.* *Materials Science and Engineering: B*[J], 2006, 135(2): 134
- [2] Yoon J W, Jung S B. *Surface and Coatings Technology*[J], 2006, 200(14~15): 4440
- [3] Yoon J W, Jung S B. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 448(1~2): 177
- [4] Zhang Wei(张 威), Wang Chunqing(王春青), Yan Bohan(阎勃晗). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(7): 1143
- [5] Hao Hu(郝 虎), Tian Jun (田 君), Shi Yaowu(史耀武) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(S2): 121
- [6] Zeng K, Tu K N. *Mater Sci Eng R*[J], 2002, 38: 55
- [7] Bath J. *Lead-Free Soldering*[M]. New York: Springer Press, 2007: 241
- [8] Chan K, Kwok W M, Bayes M. *KWPCA Journal*[J], 2004, 13: 1

Influence of Phosphorus on Reliability of Interface between Au/Ni/Cu Pad and SnAgCu Solder Joint

Lu Yudong^{1,2}, He Xiaoqi², En Yunfei², Wang Xin¹, Zhuang Zhiqiang¹

(1. Key Laboratory of Specially Functional Materials, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. The 5th Electronics Research Institute of the Ministry of Information Industry, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The content and distributing of P in Electroless Nickel/Immersion Gold (ENIG) surface finishes effect the reliability of interface between solder joint and surface finishes. 289 I/Os lead-free Sn-3.0Ag-0.5Cu BGAs was assembled on the ENIG print circuit board by reflow soldering technology. The print circuit board was tested by random vibration. After random vibration test, the failure and not failure samples were studied by X-ray, SEM, and EDX *et al.* The failure mechanism was confirmed and the relation of failure and content and distributing of P in ENIG finishes was discussed. The failure and not failure samples after vibration test show similar microstructure at the interface of solder joint and surface finishes. The cross-sectioning of the affected area shows a “tooth decay” effect of corrosion of the nickel layer, and “mud cracks” in the topography on the surface. The enrichment of P on the surface accelerated the oxidation of Ni, and also reduced the mechanical intensity of interface. The oxidation of Ni and the enrichment of P on the surface result in the crack of solder/finish interface.

Key words: Electroless Nickel/Immersion Gold; surface finish; SnAgCu; solder; intermetallic compound

Biography: Lu Yudong, Post Doctorate, National Key Laboratory for Reliability Physics and Its Application Technology of Electrical Component, the 5th Electronics Research Institute of the Ministry of Information Industry, Guangzhou 510610, P. R. China, Tel: 0086-20-87237935, E-mail: yudonglu@yahoo.com.cn