

# SnAgCu 凸点互连的电迁移\*

吴懿平<sup>1,2,†</sup> 张金松<sup>1</sup> 吴丰顺<sup>1</sup> 安兵<sup>1</sup>

(1 华中科技大学塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(2 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 研究了无铅 Sn<sub>96</sub>Ag<sub>3.5</sub>Cu<sub>0.5</sub> 凸点与镀 Ni 焊盘互连界面的电迁移现象. 在 180℃ 条件下, 凸点及互连界面在电迁移过程中出现了金属间化合物沿电子流运动方向的迁移, 其演化过程呈现出显著的极性效应: 阴极互连界面发生了金属间化合物的熟化、剥落和迁移; 阳极互连界面则出现了金属间化合物的大量聚集. 金属间化合物的演化和迁移造成了阴极处的物质减少, 从而诱发空洞的形成和聚集, 导致互连面积减小, 整体电阻增大, 可靠性降低.

关键词: 电迁移; 无铅焊料; 凸点互连; 金属间化合物

PACC: 6630Q; 6800; 6610C

中图分类号: TN3 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)06-1136-05

## 1 引言

面阵列互连封装是一种高密度的封装技术. 互连凸点以矩阵形式分布, 减小了互连间距, 增加了互连的面积和 I/O 数量. 当凸点的直径减小到 50 μm 时, 凸点中的电流密度就会达到甚至超过 10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup>, 容易发生电迁移现象<sup>[1~3]</sup>.

电迁移是金属原子在高电流密度作用下产生的一种物质沿电子流方向扩散的现象. 当凸点及其界面处的局部电流密度超过电迁移阈值时, 高速运动的电子流形成的电子风与金属原子发生剧烈碰撞, 进行部分的冲量交换, 迫使原子沿着电子流方向运动, 从而发生凸点互连的电迁移. 凸点互连电迁移的发生使得阴极因原子的迁出而产生微空洞, 互连面积减小, 电流密度提高, 可能导致断路; 阳极则因原子的迁入而形成凸起的“小丘”, 导致短路<sup>[4,5]</sup>.

影响凸点互连电迁移的因素较多, 外部因素主要有温度、电流密度、尺寸等, 而材料因素则有扩散阻挡层的成分与厚度以及金属间化合物(IMC)等<sup>[2,6~18]</sup>.

本文设计了一种凸点互连电迁移的实验装置. 在恒定大电流的作用下, 记录互连焊点发生电迁移时的电压-时间曲线. 以 Ni 作为扩散阻挡层, 研究无铅焊料 Sn<sub>96</sub>Ag<sub>3.5</sub>Cu<sub>0.5</sub> 凸点与镀 Ni 焊盘互连的电迁移现象, 揭示不同阶段的电迁移特征、演化过程和失效机理.

## 2 实验

图 1 是凸点互连电迁移实验的原理图. 凸点互连电迁移试样的结构如图 2 所示. 采用假芯片来替代倒装结构的裸芯片. 假芯片和基板均为 0.8mm

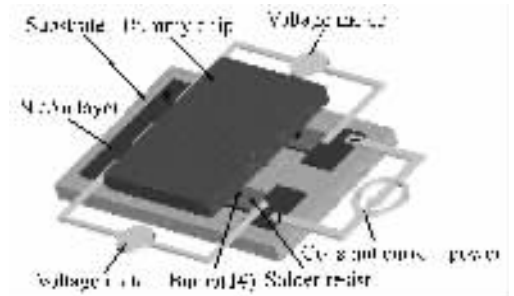


图 1 电迁移实验的原理图

Fig.1 Principle diagram of EM experiment

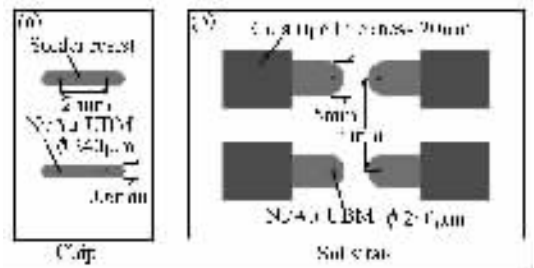


图 2 假芯片(a)和基板(b)的结构图

Fig.2 2D layout of dummy-chip (a) and substrate (b)

\* 国家自然科学基金专项(中港基金)(批准号:60318002, RGC No. N\_CityU 103/03), 国家自然科学基金(批准号:10474024)资助项目

† 通信作者. Email: ypwu@hust.edu.cn

2005-10-12 收到, 2006-01-13 定稿

厚的 FR-4 板, 其上 Cu 引线的宽度分别为 0.6 和 1.5 mm.

上下焊盘及互连引线为  $20\mu\text{m}$  厚的 Cu 层; 焊盘表面的扩散阻挡层为  $10\mu\text{m}$  厚的镀 Ni 层, 在 Ni 层表面还镀有  $0.1\mu\text{m}$  的抗氧化 Au 层. 凸点材料为  $\text{Sn}_{96}\text{Ag}_{3.5}\text{Cu}_{0.5}$  无铅焊料, 其直径为  $\phi 300\mu\text{m}$ . 两侧扩散阻挡层焊盘直径均为  $\phi 240\mu\text{m}$ . 先在假芯片上进行植球, 然后将假芯片与基板进行组装形成倒装芯片的凸点互连结构, 如图 3 所示.

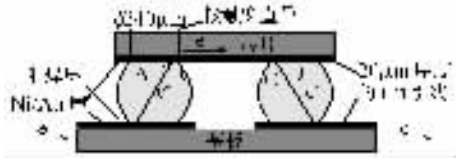


图 3 试样横截面示意图

Fig. 3 Cross-section schematic of specimen

电迁移实验中加载的恒电流方向从右向左, 相应地电子流方向从左向右. 实验后对图 1 中 1# 凸点进行了微观分析.

Tu 等人<sup>[7,9]</sup>指出凸点互连发生电迁移的平均电流密度阈值必须大于  $10^4\text{A}/\text{cm}^2$  的数量级, 本实验设计的平均电流密度为  $2.2 \times 10^4\text{A}/\text{cm}^2$ . 平均电流密度的数值以芯片侧焊盘的面积而不是凸点的最大横截面积计算, 这主要是考虑了电流聚集最容易发生在扩散阻挡层/凸点界面上. 为了加速电迁移过程, 考虑到芯片的实际工作温度有可能超过  $100^\circ\text{C}$ , 所以实验的温度定为  $180^\circ\text{C}$ .

由于假芯片和基板材料相同, 因此试样在回流焊过程和电迁移实验过程中因温度引起的热失配较小, 因而可以忽略热应力对电迁移实验的影响, 使得凸点互连电迁移实验结果更为可靠<sup>[19]</sup>.

## 3 结果和讨论

### 3.1 凸点互连电迁移的过程描述

电迁移产生的物质流动必然引起空洞的形成和聚集, 从而使得电子流的导通面积减小, 导致整体电阻的增加. 在恒温 and 恒电流条件下, 测量互连凸点两端的电压值就可以得到凸点互连焊点的电阻随时间的变化关系. 图 4 所示的是在  $180^\circ\text{C}$  和凸点的平均电流密度为  $2.2 \times 10^4\text{A}/\text{cm}^2$  条件下凸点两端的电压随时间的关系. 可以看出, 凸点互连电迁移过程中存在着 3 个明显不同的阶段, 分别代表着微空洞的孕育及形成(第 1 阶段)、空洞的扩展与聚集(第 2 阶段)和快速失效(第 3 阶段).

在微空洞的孕育阶段, 高密度的电子流与阴极

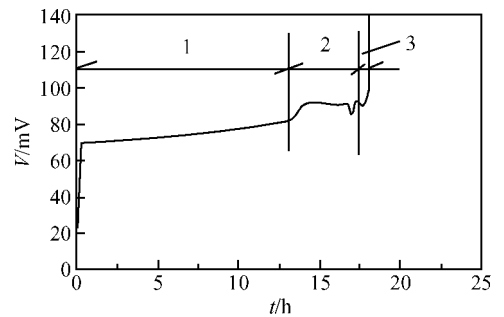


图 4 电迁移的电压-时间曲线

Fig. 4 Voltage versus failure time in EM ( $j = 2.2 \times 10^4\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $T = 180^\circ\text{C}$ )

处扩散阻挡层中的 Ni 原子发生碰撞, 产生部分冲量交换, 从而推动 Ni 原子运动到凸点中, 与 Sn 原子形成  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相. 金属原子的迁移会在界面附近产生各种缺陷形成微空洞, 减小了导通面积, 增大了整体电阻. 同时, 由于不断增厚的  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相, 电阻率较高, 因而使得凸点两端被测量的电压值会随时间的推移缓慢增加. 这是一个相当长的时间, 占据了整个电迁移失效时间的大半.

在图 3 所示的凸点互连结构中, 假芯片侧的引线宽度较窄. 当电流从扩散阻挡层流经凸点时, 由于凸点的横截面积为引线横截面积的几十倍, 因而在电流入口处的转角内侧 B、C 处产生更为严重的电流聚集现象. 实际上 Ni 原子在电子流作用下向凸点中迁移, 所以图 3 中的右侧凸点是研究对象. 此时电子流入口处的转角内侧 C 处电流密度很高, 而在其转角外侧 D 处的电流密度很低. 这样沿扩散阻挡层/凸点界面形成了从转角内侧 C 处指向外侧 D 处的电流密度梯度, 其方向与扩散阻挡层/凸点的界面平行. 考虑到空洞是高电阻和高势的单元体, 因此, 空洞会在电流密度梯度产生的扩散驱动力  $F$  作用下, 沿着电流密度梯度方向迁移到低势区域, 并在低势区域聚集和长大, 形成空洞沿扩散阻挡层/凸点界面的扩展<sup>[7]</sup>. 当电子流经沿界面分布的高电阻值的大空洞时, 必然会引起电压测量值的上升; 因而电子的入口处将被推移到大空洞的前端, 产生绕行现象, 降低了电压测量值. 这个不断变化的过程在电压-时间曲线上表现为电压的显著波动, 称为空洞的扩展与聚集阶段.

大空洞的存在, 不仅增加了整体电阻使得电压波动升高, 而且恶化了导通条件使得局部区域电流更加聚集, 产生了更多的焦耳热. 在快速失效阶段, 大量的焦耳热又使得局部区域的温度更快升高, 产生更高的温度梯度. 更高的温度梯度和更高的电流密度梯度共同作用加速正反馈过程, 最终导致了大空洞的急剧扩展, 产生了不可逆转的快速失效.

### 3.2 凸点互连电迁移的组织变化

将条件相同的一组试样分别进行 0, 7, 11 和 15.5 h 电迁移实验, 并获得各阶段下凸点截面的金相照片, 结果如图 5 所示. 其中, 图 5(b), (c) 和 (d) 分别对应于图 4 中电迁移的第 1, 2 和 3 阶段. 通过对试样在电迁移不同阶段的微观组织及形貌的观测和分析, 得到了电迁移现象中 IMC 演化、迁移的全过程.

EDX 能谱分析和合金相图分析确定了电迁移失效后凸点中的各种 IMC 成分, 如图 6 所示. 其中块状的是  $(\text{Cu}_{1-x}, \text{Ni}_x)_6\text{Sn}_5$  相, 锯齿状和棒状的是  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相, 细小、粒状的是  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  相.

图 5 是  $\text{Sn}_{96}\text{Ag}_{3.5}\text{Cu}_{0.5}$  凸点互连焊点的原始状态的金相照片. 从图中可以清楚地观测到互连凸点上下两侧的 IMC 的形貌和厚度基本一致. 界面上均匀分布的锯齿状 IMC 为  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相, 其厚度较薄、结构致密. 细小的  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  相弥散分布与凸点中, 没有发现  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相.

在电子流入口处, 由于电流聚集作用, 此处的电流密度值远超过电迁移的门槛值, 电迁移现象首先在这里发生. 高密度的电子流推动扩散阻挡层中的 Ni 原子向凸点中迁移; 使得 Ni 原子与 Sn 原子反应, 在 Ni/凸点界面电流密度聚集的局部区域形成电迁移  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相. 考虑到  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相的电阻率 ( $28.5\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 二倍于  $\text{Sn}_{96}\text{Ag}_{3.5}\text{Cu}_{0.5}$  合金的电阻率 ( $13\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), 因此电流在此区域产生绕行现象, 却在临近的区域重新出现聚集, 生成新的  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  相.

在阴极处, 电迁移产生的 IMC 与界面原有的 IMC 混合在一起, 增加了 IMC 厚度, 形貌上表现为 IMC 的长大. 随着时间的延长, 越来越多的 Ni 原子从扩散阻挡层中迁移出来溶解到凸点中形成 IMC, 由此引起了微观形貌的显著改变, 如图 5(b) 所示. 从图中可以看到, 在阴极界面区域的 Ni 层几乎消耗殆尽, 阴极处的 IMC 不断长大、熟化, 大量的块状  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  晶粒沿着电子流方向移动到凸点中阴极附近的区域. 相应地, 在阳极界面附近, IMC 的生长较为均匀且缓慢. 随着电迁移的发展, 阴极处的 Ni 原子不断地向阳极扩散, 阴极形成的 IMC 将逐渐向阳极处发展, 阴极附近的 IMC 逐渐消失, 阳极处 IMC 不断形成, 如图 5(c) 所示. 由此可见, 电迁移引起了 IMC 在互连凸点中的运动, 并导致了其在阴极和阳极的不均匀生长和分布, 呈现出显著的极性效应.

对比图 5(b) 和 (c) 可以看到, 阴极处 Ni 层的耗尽引起了 Cu 引线的损耗, 使得 Cu 原子迁移到凸点中, 与 Sn 形成了 IMC. 实际上 Cu/Ni 可以形成无限固溶体, 所以阴极附近 IMC 的组态为块状的  $(\text{Cu}_{1-x}, \text{Ni}_x)_6\text{Sn}_5$  相.

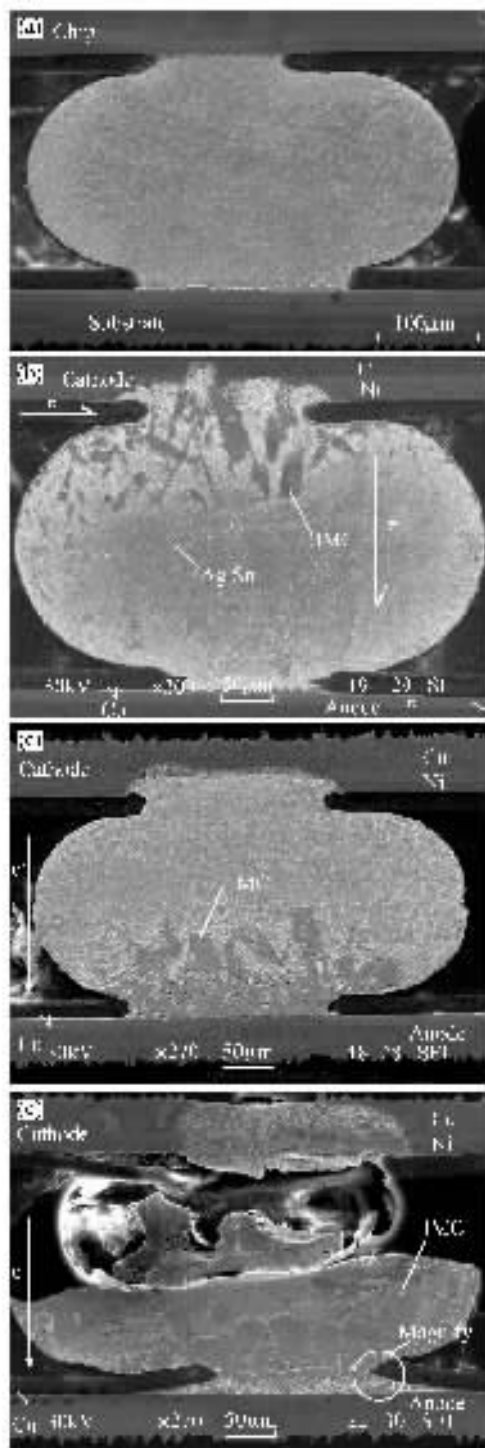


图 5 电迁移下的 IMC 演化和迁移 (a) 0h; (b) 7h; (c) 11h; (d) 电迁移失效

Fig. 5 SEM images on IMC evolution and migration in EM (a) 0h; (b) 7h; (c) 11h; (d) Failure

凸点互连电迁移进入第 3 阶段后, 在阴极侧形成的沿界面分布的空洞数量不断增多, 导致局部区域更严重的电流聚集现象. 此时互连导电通道的横截面积会减小, 电阻增加, 形成大量的焦耳热. 这种

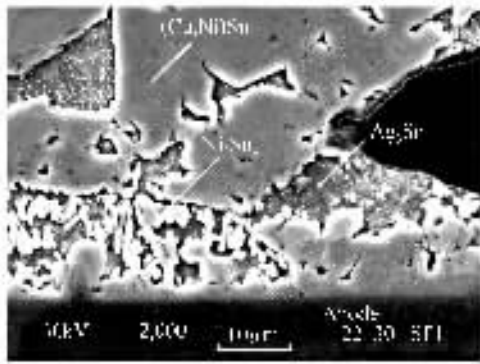


图6 凸点中IMC的局部放大(图5(d))

Fig.6 Zoom in IMCs of Fig.5(d)

高电流密度和高温度的耦合作用产生了一个迅速的正反馈式扩散反应.大量的焦耳热使得电流聚集区域的温度更快升高,最终达到凸点合金的熔点,瞬间熔断互连界面,形成断路失效(图5(d)).

图7的数值模拟表明,由于凸点互连结构中电流密度的不均匀分布,产生了电流聚集现象.靠近电子流入口处的凸点界面局部区域承载了一个高的电流密度,此处电流聚集最严重,其电流密度值也最大.对应地,互连的凸点因其体积较大、电阻值较低,分散了电流,所以在其大部分区域内电流密度值都很小.本实验的模拟中,电流密度最大值出现在扩散阻挡层的Cu/Ni界面处,其值达到 $1.56 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ;而电流密度最小值则出现在凸点中,仅为 $1.14 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ .可见电流密度的最大值比最小值高出两个数量级,且最大值为平均值( $2.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ )的7倍,最小值为平均值的1/20.在阴极处的Ni/凸点界面附近,电流密度最大值是 $(3.5 \sim 5.2) \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ,约为平均值的1.5~2.3倍.考虑到电流密度平均值已经大于电迁移门槛值( $1.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ),以及金属原子电迁移的极性效应,所以电迁移现象首先发生在阴极的Ni/凸点界面电流聚集处.实验结果与之相符合.

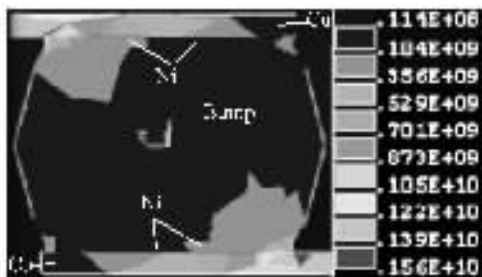


图7 凸点互连结构中的电流密度分布模拟

Fig.7 Current-density distribution in solder interconnect

## 4 结论

电迁移过程是电流和热耦合作用的结果,一般分为3个阶段:微空洞孕育与形成、空洞的扩展与聚集和快速失效阶段.IMC沿电子流运动方向的迁移,其演化和迁移过程呈现出显著的极性效应:在阴极处发生IMC的熟化、剥落和迁移,同时在阳极处形成IMC的大量聚集.电迁移使得阴极处产生了微空洞,进而形成微空洞的聚集和扩展,增加了整体电阻,产生了大量的焦耳热,并最终导致了凸点互连的瞬间熔断失效.

## 参考文献

- [1] Hayward J. Lead (Pb)-free packaging strategy 2000~2003. AMD,2001
- [2] Zeng K, Tu K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology. Mater Sci Eng,2002,R38:55
- [3] Lee T. Electromigration and solid state aging of flip chip solder joints and analysis of tin whisker on lead-frame. Thesis for PhD, University of California, Los Angeles,2001:1
- [4] Christou A. Electromigration and electronic device degradation. John Wiley & Sons, Inc,1994:27
- [5] Black J R. Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices. Proc IEEE, 1969, 57(9):1587
- [6] Tu K N, Gusak A M, Li M. Physics and materials challenges for lead-free solders. J Appl Phys,2003,93(3):1335
- [7] Tu K N. Recent advance on electromigration in very large scale integration of interconnects. J Appl Phys,2003,94(9):5451
- [8] Yeth E C C, Choi W J, Tu K N. Current crowding induced electromigration failure in flip chip technology. Appl Phys Lett,2002,80:580
- [9] Lee T Y, Tu T N, Frear D R. Electromigration of eutectic Sn/Pb and Sn/Ag/Cu flip chip solder bumps and underbump-metallization. J Appl Phys,2001,90:4502
- [10] Jang S Y, Wolf J, Ehrmann O, et al. Pb-free Sn/3.5Ag wafer-bumping process and UBM study. Microsystem Technologies,2002,7:269
- [11] Frear D R, Jang J W, Lin J K, et al. Pb-free solders for flip-chip interconnects. JOM,2001,53(6):28
- [12] Kang S K, Choi W K, Shih D Y, et al. Interfacial reactions microstructure and mechanical properties of Pb-free solder joints in PBGA laminates. 52nd ECTC, San Diego,2002
- [13] Shiau L C, Ho C E, Kao C R. Reactions between Sn-Ag-Cu lead-free solders and the Au/Ni surface finish in advanced electronic packages. Soldering and Surface Mount Technology,2002,14(3):25
- [14] Abtey M, Selvaduray G. Lead-free solders in microelectronics. Mater Sci Eng,2000,27:95
- [15] Tu K N. Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects. J Appl Phys,2003,94(9):5451
- [16] Kumar A, He M, Chen Z, et al. Effect of electromigration on

interfacial reactions between electroless Ni-P and Sn-3.5% Ag solder. *Thin Solid Films*, 2004, 462/463: 413

[17] Nah J W, Suh J O, Tu K N. Effect of current crowding and Joule heating on electromigration-induced failure in flip chip composite solder joints tested at room temperature. *J Appl Phys*, 2005, 98: 013715

[18] Lin Y H, Hu Y C, Tsai C M, et al. In situ observation of the

void formation and propagation mechanism in solder joints under current-stressing. *Acta Materialia*, 2005, 53: 2029

[19] Cai Xia, Chen Liu, Zhang Qun, et al. Thermal fatigue analysis of SnPb solder joint in flip-chip assemblies. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(6): 660 (in Chinese) [彩霞, 陈柳, 张群, 等. 倒扣芯片连接焊点的热疲劳失效. *半导体学报*, 2002, 23(6): 660]

## Electromigration of SnAgCu Solder Interconnects\*

Wu Yiping<sup>1,2,†</sup>, Zhang Jinsong<sup>1</sup>, Wu Fengshun<sup>1</sup>, and An Bing<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation & Die Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

(2 *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** The electromigration (EM) of Sn<sub>96</sub>Ag<sub>3.5</sub>Cu<sub>0.5</sub> solder interconnects is studied with Ni diffusion-barrier layers. The results show that at 180°C, intermetallic-compounds (IMCs) move in the direction of electron-flow and their evolution presents a unique polarity effect. IMCs ripen, split, and migrate from the Ni/solder interface at the cathode, while accumulate at the anode area nearby. This IMC migration generates mass depletion at the cathode, which causes void nucleation and propagation on the UBM/solder interface. Large voids increase the measured resistance and deteriorate the conductive path noticeably, thereby seriously degrade the solder interconnect reliability.

**Key words:** electromigration; lead-free solder; solder interconnect; intermetallic compound

**PACC:** 6630Q; 6800; 6610C

**Article ID:** 0253-4177(2006)06-1136-05

\* Project supported by the Special Fund of the National Natural Science Foundation of China and Hongkong (NSFC No. 60318002, RGC No. N\_CityU 103/03) and the National Natural Science Foundation of China (No. 10474024)

† Corresponding author. Email: ypwu@hust.edu.cn

Received 12 October 2005, revised manuscript received 13 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics