

Ni/Au 镀层与 SnPb 焊点界面电迁移的极性效应

陆裕东^{1,2}, 何小琦¹, 恩云飞¹, 王 歆², 庄志强²

(1. 信息产业部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室, 广东 广州 510610)

(2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘 要: 采用 Ni(P)/Au 镀层-SnPb 焊点-Ni(P)/Au 镀层的互连结构, 研究电迁移作用下焊点/镀层界面金属间化合物(IMC)的极性生长特性, 从电位差和化学位梯度条件下原子定向扩散的角度分析互连结构的微结构变化的微观机制。在无外加应力条件下, 由于液态反应速率远远快于固态反应速率, Ni(P)/Au 镀层与焊点界面 IMC 经过 120 °C、100 h 的热处理后无明显变化。但是, 在电迁移作用下, 由于 Sn 沿电子流方向的定向扩散使阳极界面 IMC 异常生长, 而阴极界面 IMC 厚度基本不变。由于电子由上层 Cu 布线进入焊点的电子注入口位于三相结合界面位置, 在焦耳热的作用下会导致焊料的局部熔融, 引起 Cu 布线与焊料的反应, 使电子注入口的 Cu 布线合金化。

关键词: Ni/Au; SnPb; 焊点; 电迁移; 金属间化合物

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0254-04

一般情况下, 晶体中决定原子扩散的驱动力是化学位梯度, 如果化学位梯度与原子浓度梯度一致, 那么原子的扩散往往是沿低浓度方向进行。但是, 当晶体处于应力场、温度场以及电(磁)场等外界条件作用下且存在不均匀分布时, 上述外加应力条件同样可能引起原子的定向扩散。电迁移即是金属线在电流和温度作用下产生的金属定向扩散现象。

微电子组装互连焊点的首要作用就是作为 IC 电路的导电通道, 在使用过程中需要承载一定的电流强度, 这实际上就是使互连焊点上承载了一个外加电场的作用, 当互连结构中的电流强度达到一定的电流密度时, 很可能就会由于电迁移引发的原子定向扩散而使互连焊点微结构发生变化, 引起互连结构失效。1998 年, Brandenburg 和 Yeh 首次报道了 SnPb 倒装焊点中的电迁移现象^[1], 引发了高密度封装互连焊点中电迁移特性研究的热潮。在前期的研究中, 国内外学者主要报道了 SnPb 倒装焊点中原子的迁移特性, 明确了层状空洞的形成机制^[2]、Sn/Pb 原子偏析^[3]、电迁移引发的脆性断裂^[4]等问题。但是, 微电子组装中的互连焊点不但涉及焊点本身, 还需考虑焊点与基板上的 Cu 布线、芯片上的 Cu、Al 互连的焊接问题, 这些焊接界面往往是实际应用中最易出现问题的位置, 而前期的研究中很少涉及焊点界面的电迁移特性。电迁移的作用, 会影响互连焊点的各相金属接触界面的反应扩

散, 很容易因金属的定向迁移而产生与单纯化学位梯度作用下截然不同的界面扩散效应或界面反应, 因此, 有必要针对焊点/镀层接触界面的电迁移特性进行研究, 明确电迁移对焊点/镀层界面原子反应扩散的影响。本研究采用 Ni(P)/Au 镀层-SnPb 焊点-Ni(P)/Au 镀层的互连结构, 研究电迁移作用下焊点/镀层界面金属间化合物(IMC)的极性生长特性, 从电位差和化学位梯度条件下原子定向扩散的角度分析互连结构的微结构变化的微观机制。

1 实 验

Ni(P)/Au 镀层由于其化学稳定性和高可靠性, 是微电子产品组装中最常用的金属表面镀层之一^[5], 它通过与 Sn 基焊料形成稳定的 IMC 实现电连接。本研究采用这种常用的表面镀层作为 BGA 器件凸点下金属化层和 PCB 板焊盘镀层。BGA 器件凸点材料为 Sn37Pb 焊料, 凸点直径约为 360 μm, 凸点间 Cu 布线厚度为 23 μm、宽 150 μm, 凸点下金属化层为 Ni(P) (约 9 μm)/Au(约 0.05 μm)镀层, 窗口面积约 285 μm。PCB 板表面焊盘直径为 280 μm, Cu 布线厚度为 13 μm、宽 100 μm。焊盘上镀层为 Ni(P)(约 4 μm)/Au(约 0.05 μm)镀层。在 PCB 板焊盘表面利用丝网印刷工艺印刷 Sn37Pb 焊膏, 然后采用 MRSI-503 M 倒装键合设备将 BGA 芯片贴装在 PCB 板表面, 用 Atten 850D 表贴返

收稿日期: 2009-09-11

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)

作者简介: 陆裕东, 男, 1979 年生, 博士后, 信息产业部电子第五研究所电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610, 电话: 020-87237935, E-mail: yudonglu@yahoo.com.cn

修站在 200 °C 下焊接 90 s 完成凸点键合。最终形成如图 1a 所示的互连结构。

在 BGA 器件和 PCB 板上采用相互契合的互连结构, 最终将一组焊点形成一个互连回路。在回路的两端加载电流密度约为 $0.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 的电流, 由于焊点互连结构的特殊性, 不同的电子流方向很可能会在图 1b 所示的每一对互连焊点中产生不同的电迁移结果。100 h 后采用环氧树脂固封实验样品, 将固封的样品沿焊点垂直截面研磨切片, 通过扫描电镜观察焊点显微形貌。

2 结果与讨论

在无外加不均匀应力场的条件下, 化学位梯度是原子扩散的主要驱动力。根据菲克定律, 扩散原子通常是由高浓度区向低浓度区方向迁移。这种沿浓度梯度方向的下坡扩散成为无外加不均匀应力场条件下 SnPb 焊点与 Ni(P)/Au 镀层界面原子扩散的主要方式。图 2 是 SnPb 互连焊点在热处理前典型的截面 SEM 照片。在热处理前的焊接反应中, SnPb 焊料在 Ni(P)/Au 镀层上的焊接过程会经历一个液态反应过程, 正常情况下会在焊料与镀层界面反应形成一层厚度为 2 μm 左右的 IMC 层。由于焊点上下界面的镀层组成都为 Ni(P)/Au, 因此, 经过焊接过程中的液态反应后, 在上下两个界面形成了基本相似的 IMC 层。Au 层很薄, 在液态反应中很快溶解进入焊料中, Ni(P)层随之与焊料发生反应形成 Ni₃Sn₄ IMC。Ni₃Sn₄ 生长过程中, Ni 的消耗在 Ni(P)层表面形成富 P 区域, 随后结晶形成 Ni₃P 化合物, 这是由焊料反应促使的无定形 Ni(P)的结晶。

对串联回路上的一组焊点上加载电流密度为 $0.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 的电流, 100 h 后焊点整体的截面 SEM 照片如图 3 所示, 图中的箭头方向表示实验过程中的电子流方向(与电流方向相反)。与实验前的焊点相比,

电应力作用后焊点的微结构发生了明显的变化。对图 3 中互连焊点的上下焊接界面进行放大, 如图 4 所示。对图 3 中阳极的焊点来说, 阳极的 Ni(P)/焊料界面 IMC 出现异常生长, IMC 的平均厚度达到了 15 μm 左右, 而阴极的 IMC 层与实验前相比几乎没有变化。两个相似的界面, 在电应力作用下出现了截然不同的界面合金层生长情况。图 3 中阴极焊点的 IMC 生长情况与阳极焊点相似, 不过由于电流方向的反向使 IMC 异常生长的界面出现在焊点的底部焊盘上, IMC 平均厚度约为 15 μm, 而另一侧的 IMC 经过电迁移实验后基本不变, 维持在 2 μm 左右。图 4e、4f 是在无外加电应力而保持相同的温度条件下热处理 100 h 后的焊点上下界面 SEM 照片。在无外加电应力条件下, Ni(P)镀层上 SnPb 焊料的界面反应过程中, Sn 由于化学势梯度由焊料向 Ni(P)层扩散, 而 Ni(P)层中的 Ni 向焊料扩散。由于温度是影响扩散的最主要因素, 扩散系数与温度往往呈指数关系变化。SnPb 焊点/镀层界面原子的液态反应扩散速率要远高于固态反应扩散速率, 因此, 与液态反应相比, 120 °C、100 h 的固态反应很难形成与液态反应相匹敌的 IMC 层, 热处理前后 IMC 层厚度基本没有变化。

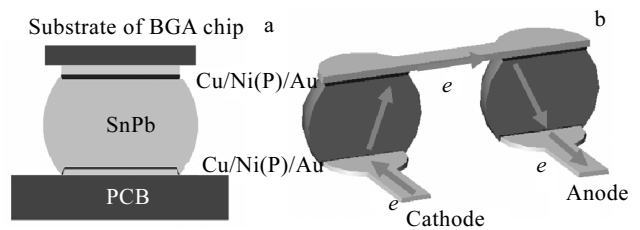


图 1 互连结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of interconnects structure: (a) solder joint, and (b) electron flow in interconnects under current applying

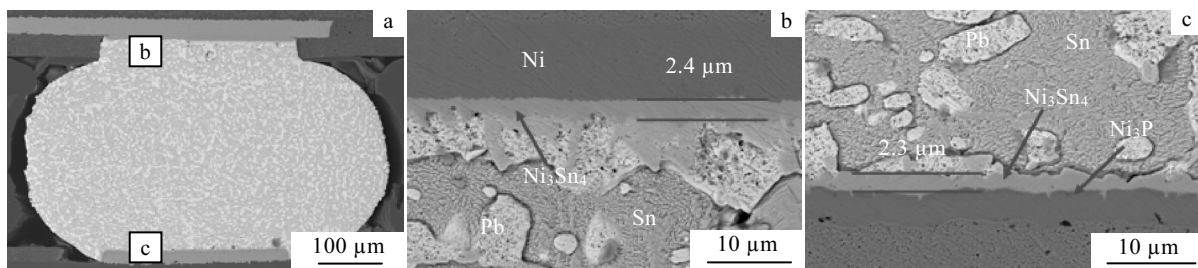


图 2 在 200 °C 下焊接 90 s 形成的焊点截面 SEM 照片

Fig.2 Cross-sectional SEM image of solder joint after soldering at the peak temperature of 200 °C for 90 s: (a) the entire micrograph and (b, c) magnified micrographs of interface between solder joint and interface layer

在电迁移作用下, SnPb 焊点中的 SnPb 原子的迁移已有报道^[6], 电应力条件下, 会形成与电子流方向一致的原子通量。高电流密度条件下会在阳极引起原子堆积而在阴极引起空洞。整个加电过程中 Sn 原子由阴极向阳极迁移, 对焊点的阳极接触界面来说, 电应力条件提高了 Sn 原子的迁移率, 促进了 Ni-Sn 间的反应, 而阴极的接触界面, 由于电应力作用方向与化学势梯度方向相反, 使 Sn 原子的迁移受到抑制或反向, 界面 IMC 的生长停止。电应力作用下, Ni 原子的迁移方向尚不清楚, 但从实验现象来看, 如果电应力引起的 Ni 迁移方向与电子流方向相同, 并且与由化学势梯度引起的迁移相比不可忽略, 那么在阴极接触界面由于 Ni 向焊料的扩散也会引起 Ni-Sn 间的界面反应, 导致 IMC 层厚度增加, 这显然与实验现象不符。因此, Ni 很可能是在外加电应力条件下形成与电子流方向相反的迁移方向。这样, 由于阳极 Sn 和 Ni 原子扩散速率的加剧, 导致界面 IMC 的异常生长, 而阴极由于 Sn 和 Ni 的反向迁移而导致 IMC 生长受到抑制。

阳极焊点中除了 IMC 的异常生长外, 阴极出现了 Cu 布线的腐蚀(如图 3c、3d 所示)。经过 100 h 的电迁移作用后, 腐蚀形成的 IMC 几乎占据了整个 Cu 布线截面。整个互连结构涉及多种金属和结构形态, 相同电流强度条件下, 不同区域的电流密度和焦耳热分布自然有所差异。整个互连结构中, 发生 Cu 布线腐蚀的位置是电子由 Cu 布线向焊点注入的区域, 这一电子注入口是整个互连回路中电流密度最大的一个区域, 自然会引入相对较多的焦耳热。同时, 这一位置是 Cu 布线、Ni(P)镀层和焊料的 3 相交界面, 界面活化能最高, 成为反应的首要位置。在焦耳热的作用下, 这一区域的焊料会发生局部熔融, 熔融焊料在 3 相接触点首先发生反应形成 Cu-Sn-Ni IMC, 反应过程不但使 3 相接触点附近的界面 IMC 层不断增厚, 而且随着熔融焊料的不断侵入, Cu-Sn-Ni IMC 不断向 Cu 布线内部扩展, 在 3 相接触点附近的 Cu 布线中形成大面积的 Cu-Sn-Ni IMC。

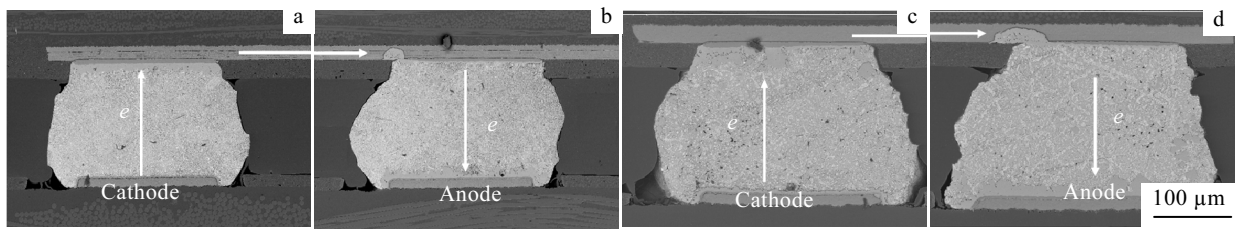


图 3 在 120 °C、 $0.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 的电流密度条件下, 焊点经过 100 h 电迁移试验后的 SEM 照片
 Fig.3 SEM images of a row of solder joints after applied by current density of $0.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ at 120 °C for 100 h

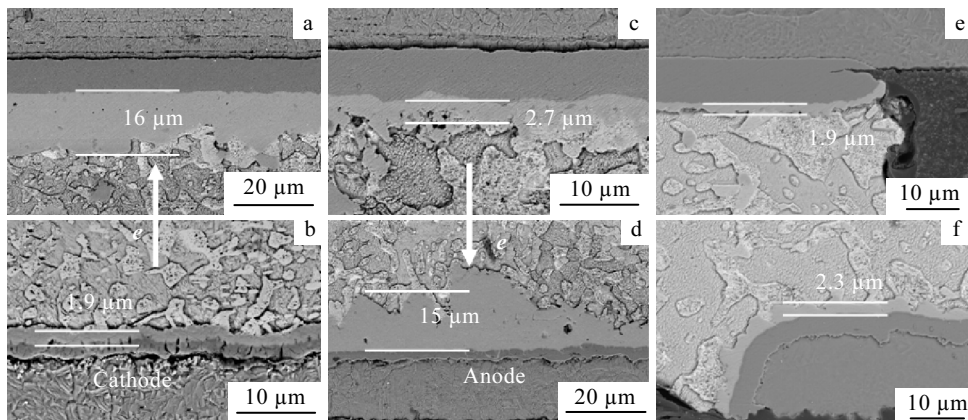


图 4 (a)、(b)为图 3a 焊点的上下界面局部放大图, (c)、(d)为图 3c 焊点的上下界面局部放大图, (e)、(f)为无外加电应力条件下焊点 120 °C 热处理 100 h 后上下界面放大图
 Fig.4 (a, b) local magnified SEM images of solder joints in Fig.3a, (c, d) local magnified SEM images of solder joints in Fig.3c, and (e, f) SEM images of solder joints after annealing of 120 °C for 100 h

不管是 IMC 的极性异常生长还是 Cu 布线特定区域的合金化, 都会导致焊点互连的可靠性。IMC 层过厚或电子注入口的 Cu 布线合金化, 在外界应力作用下很可能沿脆性的 IMC 与镀层、IMC 与 Cu 布线界面发生开裂, 引起焊点电互连失效。

3 结 论

1) 在无外加应力条件下, 由于液态反应速率远快于固态反应速率, Ni(P)/Au 镀层与焊点界面 IMC 经过 120 °C、100 h 的热处理后无明显变化。

2) 在电迁移作用下, Sn 沿电子流方向的定向扩散导致阳极界面固态反应速率加快, 阳极界面 IMC 异常生长, 而阴极界面由于 Sn 的反向扩散而使 IMC 基本不变。

3) 电子由上层 Cu 布线进入焊点的电子注入口位置会形成 Cu 布线的合金化, 这主要是由于电子注入口处于 3 相结合界面, 焦耳热作用下焊料的局部熔融

导致了 Cu 布线与焊料的反应。

参考文献 References

- [1] Brandenburg S, Yeh S. *Proceedings of Surface Mount International Conference and Exhibition*[C]. Scm Jose: SMTA, 1999: 337
- [2] Lu Y D, He X Q, En Y F *et al. Advanced Materials Research* [J], 2008, 44-46: 905
- [3] Lee T Y, Tu K N, Kuo S M *et al. J Appl Phys*[J], 2001, 89: 3189
- [4] Nah J W, Ren F, Paik K W *et al. J Mater Res*[J], 2006, 21: 698
- [5] Lu Yudong(陆裕东), He Xiaoqi(何小琦), En Yunfei(恩云飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(3): 481
- [6] Zeng K, Tu K N. *Mater Sci Eng R*[J], 2002, 38: 55

Polarity of Electromigration at the Interface between SnPb Solder Joints and Ni/Au Finishes

Lu Yudong^{1,2}, He Xiaoqi¹, En Yunfei¹, Wang Xin², Zhuang Zhiqiang²

(1. 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, China)

(2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, china)

Abstract: The polarity of electromigration at the interface between solder joints and finishes was studied with the interconnects structure of Ni(P)/Au finishes-SnPb solder joint-Ni(P)/Au finishes. The mechanism of microstructural evaluation of interconnects was investigated in terms of directional diffusion of atoms under electrical and chemical potential. The IMC layers on the interface between Ni(P)/Au finishes and solder joints have only a little change in thickness after the annealing of 120 °C for 100 h because the velocity of wetting reaction is faster than the solid state reaction. But under the condition of electromigration, the directional diffusion of Sn atoms along the electron flow direction induces the abnormal growth of IMC on the anode interface, and the restraint at cathode. The cathode contact is on the upside, where the electron current enters the solder bump, and locates at the triple point. The solder would melt at this point by Joule heating, resulting in the reaction between the Cu wire and solder.

Key words: Ni/Au; SnPb; solder joint; electromigration; intermetallic compound

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