

焦耳热作用下共晶锡铋焊点电迁移特性*

徐广臣[†] 何洪文 郭 福

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022)

摘要: 电迁移可以引发芯片内部互连金属引线(单一元素)中的原子或离子沿电子运动方向移动. 但是, 在共晶锡铋焊点中, 组成的元素为锡和铋而非单一元素. 由于铋原子和锡原子在高电流密度下具有不同的迁移速率, 因此共晶锡铋钎料具有独特的电迁移特性. 实验中采用的电流密度为 10^4 A/cm^2 , 同时焦耳热会引发焊点温度从 25 升高至 49°C, 富铋相在此温度下会发生明显粗化, 除此之外, 铋原子会首先到达正极界面处并形成坚硬的阻挡层, 使得锡原子的定向运动受到阻碍, 最终, 富锡相会凸起, 其与负极界面间会有凹谷形成.

关键词: 电迁移; 共晶 SnBi 钎料; 焦耳热

PACC: 6630Q **EEACC:** 0170N

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)10-2023-04

1 前言

电子产品的日益小型化会导致焊点承受的电流密度高于 10^3 A/cm^2 . 在此种情况下, 电迁移将成为影响焊点可靠性的主要因素之一^[1~4]. 由于电子和扩散金属原子或离子间的相互作用, 在高电流密度下金属原子或离子会沿电子运动方向定向移动. 为了深入理解这种复杂的相互作用和分析焊点在不同环境条件的失效机理, 需要设计合适的接头形式以比较不同钎料的可靠性问题. 目前较为流行的接头结构为倒装芯片 (flip chip) 和球栅阵列 (ball grid array) 焊点^[5,6], 这种接头结构在研究电迁移时会面临严重的电流密度集中效应, 由于钎料与基板薄厚不一, 在较短的距离内, 局部电流密度会相差几个数量级. 这种局部高电流密度会导致明显的焦耳热, 最终使局部温度远高于所处环境温度. 根据 Ye 等人^[7] 的研究, 从芯片端到基板端温度梯度会达到 $1500^\circ\text{C}/\text{cm}$, 这足以引发热迁移 (thermomigration) 效应. 换言之, 在实际芯片焊点内, 沿热量梯度进行的原子移动会反向电子运动方向. 除此之外, 由化学势能导致的界面反应同样会使原子反向电子运动方向^[8,9]. 因此, 实际芯片内焊点的电迁移实验很难区分各种物理场对原子运动的作用, 为了减小电流密度集中效应, 需要使电子运动方向保持平直, 且电流密度分布均匀. 作者采用自行设计的铜线对接接头, 可有效研究电迁移引发的材料内部原子扩散, 阐明电迁移机理.

2 实验

2.1 试样制备

本实验采用对接铜线的接头形式, 铜线为市售直径

0.5mm 的漆包线, 其内部是 99.95% 的高纯铜, 外皮为聚酰亚胺漆, 该种漆不仅可以起到绝缘的作用, 还可以防止钎料与铜线外表面发生润湿反应. 利用射流断裂法制备直径 0.5mm 的钎料球, 钎料成分为 42% 的锡和 58% 的铋 (熔点 138°C). 接头制备流程如下: 首先将两根漆包线和钎料球同时置于铝制 V 型槽中, 随后滴加免清洗助焊剂, 其中一根铜线固定在 V 型槽内, 另一根铜线与水平螺旋测微器相连接; V 型槽的正下方是远红外陶瓷加热板, 可为钎焊过程提供所需热量; V 型槽的正上方是体式显微镜, 可观察钎焊过程, 便于铜线间距调节; 当 V 型槽内的温度达到 138°C 时, 调节水平螺旋测微器挤压熔化态的钎料, 使之与漆包线端面进行润湿反应. 焊后接头的显微组织照片如图 1 所示.

2.2 电迁移实验

制作好的对接接头冷镶在环氧树脂中, 通过磨样机, 将圆柱型对接接头沿径向磨至一半, 因此通过焊点

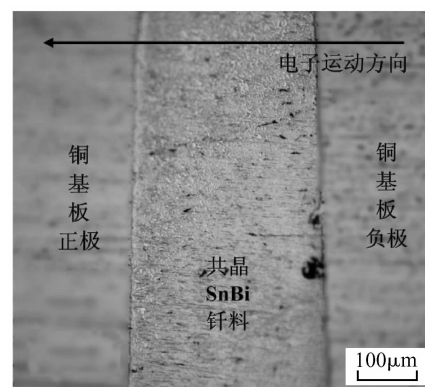


图 1 焊后接头显微组织照片

Fig. 1 Microstructure of as-reflowed solder joints

* 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

[†] 通信作者. Email: xuguangchen@emails.bjut.edu.cn

2008-04-01 收到, 2008-06-02 定稿

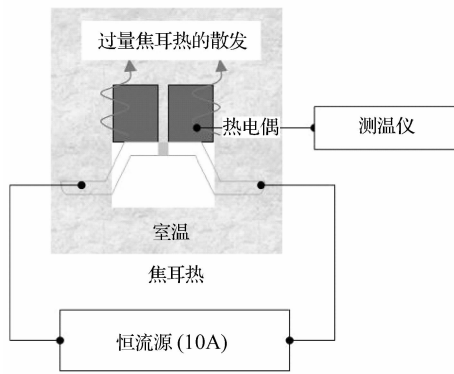


图 2 电迁移实验装置简图
Fig.2 Set-up of electromigration test

电流的截面积从 0.2 减小至 0.1mm^2 , 当通入 10A 电流时, 焊点的电流密度可高达 $10^4\text{A}/\text{cm}^2$. 最后, 使用 800 , 1000 和 2000 号 SiC 砂纸预磨, 随后再用 Al_2O_3 悬浊液和 SiO_2 胶体溶液进行抛光. 通电实验后采用光学显微镜、扫描电子显微镜和能谱分析方式评估电迁移现象. 图 2 为电迁移实验装置简图.

3 结果与分析

3.1 焦耳热效应

当 10A 电流通过焊点时会有明显的焦耳热产生, 焊点作为热源通过上方的散热片与空气对流, 此时焊点、散热片、空气形成温度梯度, 焦耳热沿此方向进行热量散发, 其中散热片上有热电偶与之接触, 通过测温仪采集温度信号, 结果如图 3 所示. 温度在通电前 30min 内快速升高, 最终稳定在 49°C 左右.

环境温度的提高会促使富铋相粗化, 通过 ImageJ 软件可以定量分析此过程. 图 4(a) 为通电前锡铋共晶组织照片, 选定 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 正方形区域, 设定颗粒选取阈值为 $0.05\mu\text{m}^2$, 低于此值的颗粒将不会被选取; 图 4(b) 为选取富铋相后的图片, 通过软件自动计算, 可以得到富铋相平均尺寸为 $3.859\mu\text{m}^2$. 通过同样的办法, 在焊点通电 24h 后再次测量, 此时富铋相平均尺寸增加至 $5.756\mu\text{m}^2$. 焦耳热引发的焊点温度提升, 增强了钎料内部原子扩散激活能.

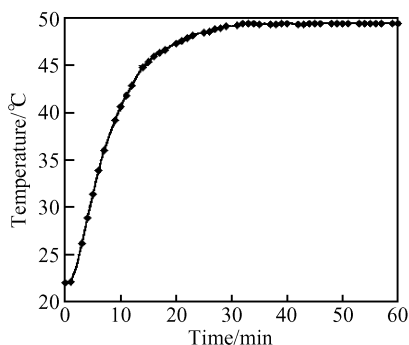


图 3 焦耳热引发的温度提升
Fig.3 Profile of Joule heating induced temperature increase

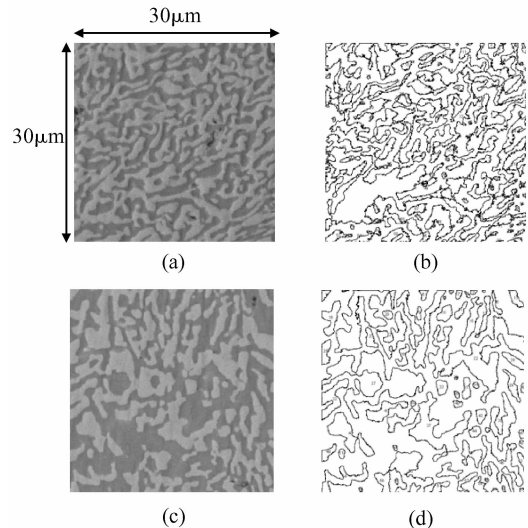


图 4 富铋相的粗化 (a) 通电前显微组织照片; (b) 相应富铋相的提取; (c) 通电 24h 后显微组织; (d) 相应富铋相的提取

Fig.4 Coarsening of Bi-rich phases

3.2 富铋相与富锡相的分离

在高电流密度 ($10^4\text{A}/\text{cm}^2$) 下, 钎料内部的原子会沿着电子运动方向定向扩散. 由于锡铋共晶钎料由两种元素 (Sn , Bi) 组成, 在电迁移影响下两种元素的定向扩散速率不同. 如图 5 所示, 在光学显微镜下灰色区域为铋元素, 白色区域为锡元素, 当焊点通电 24h 后, 正极铜基板和钎料界面处会有连续富铋相聚集, 这说明铋元素的定向扩散速率高于锡元素, 铋元素首先到达正极后会对界面处金属间化合物造成挤压, 并使之在垂直于纸面的方向凸起, 形成连续小丘. 在负极界面处观察不到富铋相的聚集和小丘, 取而代之的是富锡相的聚集, 如图 6 所示.

当焊点通电时间达到 133h 时, 富锡相与富铋相会完全分离, 如图 7(a) 所示. 在扫描电子显微镜下, 富铋相呈白色, 富锡相呈灰色. 图 7(b) 为焊点内铜元素分布, 其分布于钎料左右两端; 图 7(c) 为焊点内铋元素分布, 其分布于左端正极附近处; 图 7(d) 为焊点锡元素分布, 其分布于右端负极附近处. 在分析焊点内原子扩散时, 电子风力和机械力是影响铋原子运动的主要因素, 可列出如下公式^[10]:

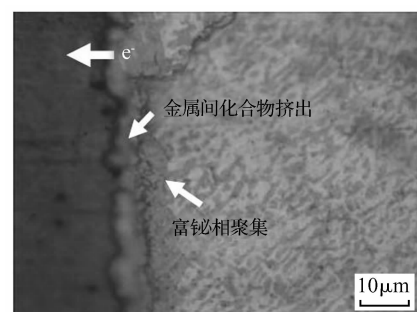


图 5 通电 24h 后正极附近处显微组织

Fig.5 Microstructure evolution at anode side after 24h current stressing

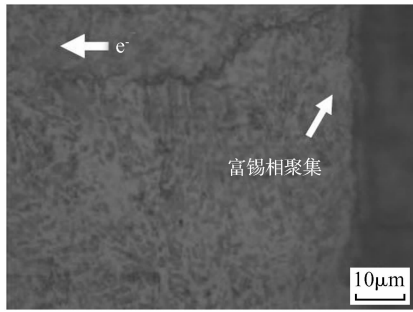


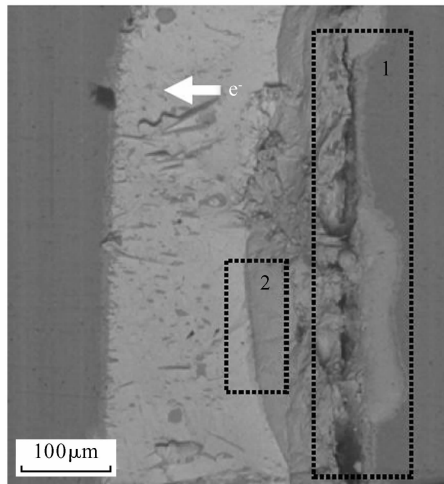
图 6 通电 24h 后负极附近处显微组织

Fig.6 Microstructure evolution at cathode side after 24h current stressing

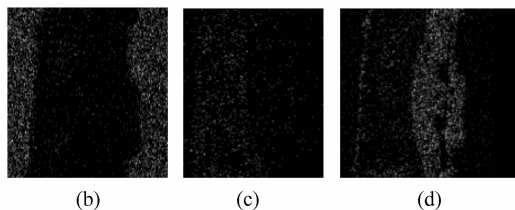
$$J_{cm} = -C \frac{D}{kT} \times \frac{d\sigma \cdot \Omega}{dx} + C \frac{D}{kT} Z^* eE \quad (1)$$

其中 J_{cm} 是原子扩散量; C 是单位体积内原子浓度; D/kT 代表原子迁移能力; σ 是金属内流体静应力; $d\sigma/dx$ 是沿电子运动方向上的应力梯度; Ω 是原子体积; Z^* 是电迁移有效电荷数; e 是电子电荷; E 是电势, 且 $E = \rho j$, 其中 ρ 是电导率, j 是电流密度.

富锡相与富铋相的分离引发了钎料表面的起伏, 图 7(a) 中 1 号区域显示了负极处铜基板和富锡相间有凹谷形成, 图 8 显示了此区域的表面形貌. 图 7(a) 中 2 号区域是富铋相与富锡相交界面. 图 9 显示了此区域的表面形貌, 从中可以得出, 富锡相与富铋相间存在高度差.



(a)



(b)

(c)

(d)

图 7 焊点通电 133h 后显微组织变化 (a) 富铋相与富锡相分离; (b) 铜元素分布; (c) 铋元素分布; (d) 锡元素分布

Fig.7 Microstructure evolution after 133h current stressing (a) Separation of Sn phase and Bi phase; (b) Element mapping of Cu; (c) Element mapping of Bi; (d) Element mapping of Sn

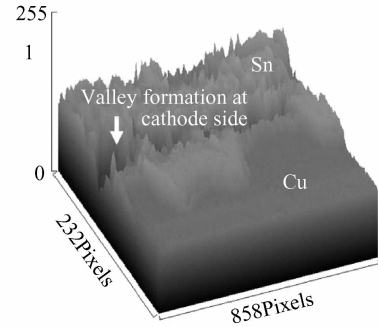


图 8 负极处凹谷的表面形貌

Fig.8 Surface plot of valley near cathode side

由于富铋相的硬度值高于富锡相, 且富锡相无法溶于富铋相中, 因此在富铋相首先到达正极后会 对富锡相的定向迁移产生阻碍, 最终导致富锡相表面形成褶皱、凸起.

焊点表面状态的浮凸说明共晶锡铋焊点不存在背向应力 (back stress), 因此 (1) 式可以改写为如下的形式^[11,12]:

$$J_{cm} = \frac{V_{cm}}{\Omega(At)} \approx C \frac{D}{kT} Z^* eE \quad (2)$$

在高电流密度下铋原子扩散量高于锡原子扩散量, 即铋原子扩散量 (D) 与有效电荷数 (Z^*) 的乘积也高于锡原子, 扩散量与有效电荷数的乘积可有效评价钎料内部原子在高电流密度下定向扩散能力.

4 结论

本文研究了共晶锡铋焊点的电迁移特性, 实验中采用电流密度为 10^4 A/cm^2 , 环境温度为焦耳热引发的 49°C , 通电时间最长为 133h, 实验结果表明:

(1) 高电流密度会引起明显的焦耳热效应, 焊点温度会随之提高, 富铋相会在此温度下粗化、长大.

(2) 高电流密度下, 铋原子的扩散速率高于锡原子的扩散速率, 铋原子到达正极后会阻碍锡原子的移动, 使得富锡相内部挤压应力增加, 从而形成凸起, 进而富锡相与负极铜基板间会有凹谷形成, 最终可导致焊点的断路.

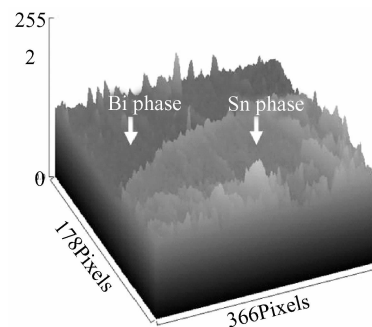


图 9 富铋相与富锡相界面形貌

Fig.9 Surface plot of interface between Sn phase and Bi phase

参考文献

- [1] Tu K N. Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects. *J Appl Phys*, 2003, 94: 5451
- [2] Yeh Y T, Chou C K, Hsu Y C, et al. Threshold current density of electromigration in eutectic SnPb solder. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 203504
- [3] Yeh E C C, Choi W J, Tu K N, et al. Current crowding induced electromigration failure in flip chip solder joints. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 580
- [4] Liu Y H, Lin K L. Damages and microstructural variation of high-lead and eutectic Sn-Pb composite flip chip solder bumps induced by electromigration. *J Mater Res*, 2005, 20: 2184
- [5] Zhang Jinsong. Effect of current density and geometry structure on Pb-free solder joints electromigration. *International IEEE Conference on Asian Green Electronics*, 2004: 77
- [6] Lai Yishao. Electromigration reliability of Sn-37Pb and Sn-3Ag-1.5Cu/Sn-3Ag-0.5Cu composite flip-chip solder bumps with Ti/Ni(V)/Cu under bumpmetallurgy. *Electronics Packaging Technology Conference*, 2005: 786
- [7] Ye Hua. Modeling deformation in microelectronics BGA solder joints under high current density. *Electronic Components and Technology Conference*, 2005: 1437
- [8] Liu C Y, Chen C, Liao C N, et al. Microstructure-electromigration correlation in a thin stripe of eutectic SnPb solder stressed between Cu electrodes. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 58
- [9] Ho C E, Lee A, Subramanian K N. Design of solder joints for fundamental studies on the effects of electromigration. *J Mater Sci-Maters Electron*, 2007, 18: 129
- [10] Chae S H. Electromigration lifetime statistics for Pb-free solder joints with Cu and Ni UBM in plastic flip-chip packages. *Electronic Components and Technology Conference*, 2006: 650
- [11] Lai Yishao. Characteristics of current crowding in flip-chip solder bumps. *Microelectronics Reliability*, 2006: 915
- [12] 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

Effects of Joule Heating on the Electromigration Properties of Eutectic SnBi Solder Joints *

Xu Guangchen[†], He Hongwen, and Guo Fu

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Electromigration could induce the movement of atoms/ions towards the direction of electron flow in pure metal line in chips. However, in the eutectic SnBi solder joints, the constituted elements are Sn and Bi. Due to the different drift velocity of Bi atoms and Sn atoms under high current density, the electromigration properties of eutectic SnBi are unique. With a current density of 10^4 A/cm² and the Joule heating effect, the temperature of solder joints increased from 25 to 50°C, and the Bi-rich phases grew bigger during current stressing due to the high ambient temperature (49°C). In addition, Bi atoms initially arrived at the anode side and eventually formed a barrier layer to inhibit the movement of Sn atoms towards the anode side. Sn-rich phase bulged, and a valley formed along the interface at cathode side.

Key words: electromigration; eutectic SnBi solder; Joule heating

PACC: 6630Q **EEACC:** 0170N

Article ID: 0253-4177(2008)10-2023-04

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University

[†] Corresponding author. Email: xuguangchen@emails.bjut.edu.cn

Received 1 April 2008, revised manuscript received 2 June 2008