

# 电迁移致无铅钎料微互连焊点的脆性蠕变断裂行为

尹立孟,张新平

(华南理工大学材料科学与工程学院,广东广州 510640)

**摘 要:** 研究了电迁移条件下不同电流密度 ( $0.8 \sim 1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ) 和通电时间 ( $0 \sim 96 \text{ h}$ ) 对无铅钎料模拟微互连焊点的蠕变断裂行为的影响. 研究发现,电迁移作用加速了焊点的蠕变断裂过程,随着电迁移通电时间的延长及电流密度的增加,其蠕变应变速率显著增大,而蠕变寿命逐渐缩短;电迁移还导致焊点蠕变断裂机制发生明显变化,在高电流密度或长时间通电的电迁移后,微互连焊点在服役条件下会发生由延性断裂向脆性断裂的转变.

**关键词:** 电迁移; 无铅钎料; 焊点; 蠕变; 断裂

**中图分类号:** TN306 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 02-0253-05

## Electromigration Induced Brittle Creep Fracture Behavior of Lead-Free Solder Micro-Interconnections

YIN Li-meng, ZHANG Xin-ping

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640)

**Abstract:** The influence of electromigration on creep fracture behavior of lead-free solder micro-interconnections was characterized under different current densities ( $0.8 \sim 1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ) and holding times ( $0 \sim 96 \text{ hours}$ ). The experiment results show that the creep damage process of the lead-free solder interconnected joints is obviously accelerated by electromigration effect, and the increases in both current density and holding time lead to an increase of creep strain rate and a decrease of creep lifetime of the joints. In addition, the electromigration effect leads to fracture mode transition phenomena at the cathode interface of the solder joints, that is, from ductile fracture in the joints without electromigration to brittle fracture for those after strong electromigration using high current density and long holding time.

**Key words:** electromigration; lead-free; solder joints; creep; fracture

### 1 引言

电子封装微互连中的电迁移主要是指互连金属或焊点在电流(应力)作用下,原子或离子随电子迁移而导致的成分偏析以致出现丘凸和空洞等材料结构缺陷这一现象<sup>[1]</sup>;它是近年来随着封装互连焊点日益极小化以及元器件微型化和精密化而出现的一个重要问题,也是影响电子封装互连结构完整性和可靠性的一个严重问题<sup>[2]</sup>,已引起广泛关注. 迄今为止,对焊点/凸点中电迁移问题的研究时间并不长;1998年 Brandenburg 等首次在倒装芯片互连 SnPb 共晶钎料凸点中发现了电迁移现象,仅仅一年之后,国际半导体技术发展蓝图 (ITRS) 就把电迁移列为电子封装可靠性问题<sup>[3]</sup>;2003年,ITRS 又进一步提出电迁移是限制高密度封装发展的一个关键

因素<sup>[4]</sup>. 与此同时,随着世界范围内电子封装无铅化进程的加快,特别是2003年2月欧盟公布了所谓的 WEEE 和 RoHS 双指令后,无铅钎料代替传统锡铅钎料的封装技术换代迅速发展<sup>[1]</sup>. 在电子工业的无铅化进程中,电子封装微型化也迅猛发展,电子元器件及封装互连焊点不断变小,其承受的电流密度也在显著提高;目前主流的凸点/焊点尺寸为  $100 \mu\text{m}$  或  $50 \mu\text{m}$ ,通过的电流为  $0.2 \text{ A}$  左右,电流密度约为  $2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 \sim 1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ <sup>[2,4]</sup>;今后凸点/焊点的尺寸将更小,通过的电流达  $0.4 \text{ A}$  甚至更高,而电流密度则可能呈数量级增加. 因此,无铅钎料焊点中的电迁移问题日益突出,迫切需要对其进行深入研究.

此外,由于电子元器件中多层材料、钎料及其它封装材料的热膨胀系数 (CTE) 不同,焊点在工作条件下会

经历不同程度的随时间变化的热应力,导致典型的蠕变变形和破坏,成为电子封装微互连中另外一种常见的失效机制<sup>[5~8]</sup>. 一般说来,当同系温度较大( $T/T_m > 0.5$ )时,钎料焊点蠕变变形就会比较明显. 然而,即使在室温条件下,大部分钎料的同系温度都可达到0.7甚至更高,同时电子封装互连焊点的服役条件为典型的低应力、长时间作用情况,也即蠕变. 目前,对钎料的高温蠕变研究大多数是针对体钎料(bulk solder)或较大焊点而进行的,这显然和真实焊点的蠕变过程有很大的不同. 在我们前面的研究<sup>[9~11]</sup>中,虽然采用犬骨状(dog-bone overlap solder)搭接焊点试样研究了几种Sn基无铅钎料的蠕变和断裂行为,但这些研究都未考虑电迁移这一重要的影响因素. 实际上,互连焊点在服役时的蠕变过程中,总是伴随电流的存在,因此非常有必要研究电迁移对焊点蠕变及其断裂行为的影响.

## 2 实验材料及方法

本实验采用“铜丝-无铅钎料-铜丝”模拟微互连焊点试样,其几何结构与目前研究中常用的模拟焊点形式相似<sup>[12,13]</sup>;需要说明的是,实际焊点往往略呈鼓形(即焊点中部稍大),但研究工作中为方便起见则常采用均匀尺寸的焊点<sup>[13]</sup>. 此外,由于电子封装中芯片与基板、元器件与印制电路板材料间热物理性能的差异,当环境温度变化时易造成系统结构的热应力;其中焊点一般承受剪切应力,而当元器件装配不合适及结构设计不合理时也常常承受拉应力作用. 本研究中,为便于准确施加载荷,主要考虑模拟焊点承受拉应力作用情况,在以后的研究中将采用不同的加载模式,包括剪切应力. 模拟焊点试样中无氧铜丝的直径为0.30mm,钎料为CASTIN无铅钎料E9650Sn/3.0Ag/0.5CuSb(Dyfenco Electronic Chemical Corp, TW),该钎料是在Sn/3.0Ag/0.5Cu钎料基础上添加了少量的Sb元素.

钎焊前,用细砂纸将待焊两根铜丝的端面磨平,用无水乙醇及丙酮溶液将铜丝端面和待焊钎料清洗干净,采用功率为1.5KW的加热板和特定设计的带微尺度“V”型沟槽的铝板夹具在模拟再流焊条件下制备模拟焊点,如图1所示;其中采用添加5% ZnCl<sub>2</sub>的松香酒精作

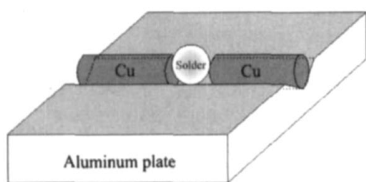


图1 制备试样用装置示意图

为钎剂,钎焊时温度控制在高于钎料熔化温度20~30,待钎料熔化填满两铜丝间隙后保温10~20s后风冷至室温. 然后,将焊好的模拟焊点样品精细磨平、抛光,直至互连焊点的最终直径为275 $\mu$ m. 模拟互连焊点(直径为275 $\mu$ m、长度约为325 $\mu$ m)的SEM照片如图2所

示.

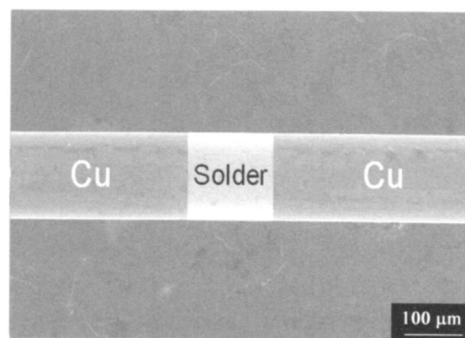


图2 铜丝/钎料/铜丝焊点结构SEM照片

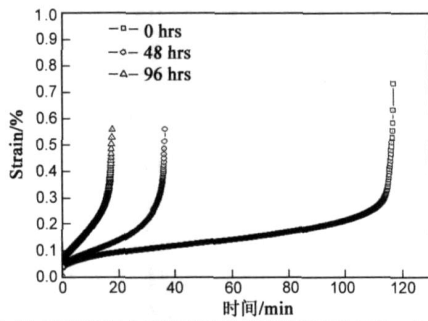
采用该“铜丝-钎料-铜丝”模拟焊点试样有如下优点:(1)模拟焊点中存在两个金属间化合物(IMC)层,与实际倒装焊(flip chip)焊点/凸点情况接近;(2)焊点样品易于制备;(3)可调整铜丝直径和钎焊间隙,使焊点尺寸缩小至接近真实焊点;(4)进行加速电迁移实验时易于加载电流;(5)在拉伸载荷下进行蠕变实验时,便于对焊点试样进行加载.

将制备好的微互连焊点试样分为两组进行比较性研究. 对第一组样品在大气环境温度下采用不同电流密度(0.8~1.27  $\times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>)和不同通电时间(0~96h)进行加速电迁移实验后进行蠕变实验;需要指出的是,在电迁移试验时,由于电流密度较大,接触电阻所产生的热量较高,测量表明模拟焊点试验在实验过程中的实际温度在70~80之间. 而对第二组样品则不进行电迁移试验,直接进行高温蠕变实验. 所有蠕变实验均采用高精度的动态力学分析仪DMA(Q800, TA-Instruments),在125 温度下和17.5MPa恒载荷下进行.

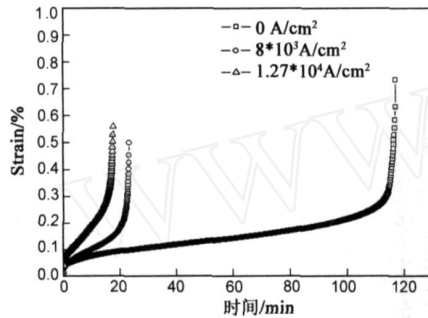
## 3 试验结果及分析

图3为对模拟焊点试样在大气环境温度下实施不同电流密度和通电时间的电迁移试验后,再进行蠕变试验的结果. 在每种试验条件或参数下,均采用3~5个相同的试样,最终取其结果的平均值或与平均值最接近的试验结果. 图3(a)是焊点在1.27  $\times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>电流密度下分别经0、48和96小时电迁移实验后试样的蠕变曲线;图3(b)为焊点在电流密度分别为0A/cm<sup>2</sup>、8  $\times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>和1.27  $\times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>时经96小时电迁移后的蠕变曲线. 上述曲线中,对应于0通电时间和0电流密度的试样表示未经过电迁移实验.

从图3可以看出,焊点的蠕变寿命随电流密度及通电时间的增加而明显降低,所有蠕变均具有明显的蠕变变形过程三阶段,即初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段;并且稳态蠕变阶段仍符合通常的  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = C^n$  规律. 显然,电迁移作用加速了焊点的蠕变断裂



(a) 焊点经历不同电迁移时间(电流密度恒定为 $1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ )后的蠕变曲线



(b) 焊点经不同电流密度(通电时间固定为96小时)电迁移后的蠕变曲线

图3 不同条件下电迁移后模拟焊点的蠕变曲线

过程;随着延长焊点试样的通电时间及增加电流密度,蠕变应变速率显著增大,而蠕变寿命逐渐缩短,如表1和表2所示。

表1 不同通电时间电迁移后焊点的蠕变性能  
(电流密度为 $1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ )

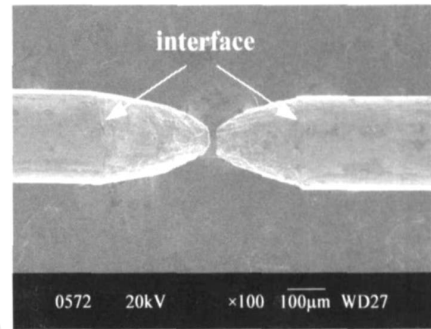
通电时间( $t$ /hour)	稳态蠕变速率( $v$ /min $^{-1}$ )	蠕变寿命( $t$ /min)
0	$1.18 \times 10^{-4}$	116.9
48	$4.03 \times 10^{-4}$	36.2
96	$1.12 \times 10^{-3}$	17.5

表2 不同电流密度电迁移后焊点的蠕变性能  
(通电时间为96 h)

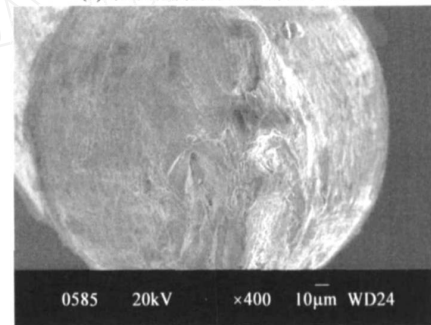
电流密度( $j$ /A·cm $^{-2}$ )	稳态蠕变速率( $v$ /min $^{-1}$ )	蠕变寿命( $t$ /min)
0	$1.18 \times 10^{-4}$	116.9
$8 \times 10^3$	$5.25 \times 10^{-4}$	23.2
$1.27 \times 10^4$	$1.12 \times 10^{-3}$	17.5

值得注意的是,经过电迁移试验后焊点的蠕变断裂呈现截然不同模式.采用扫描电镜对焊点蠕变失效断口进行观察后发现,没有经历过电迁移(即通电时间或电流密度为0)焊点的蠕变断裂发生在焊点中间位置且呈延性断裂特征,如图4(a)与(b)所示;而经过较高电流密度及较长通电时间电迁移后的焊点,蠕变断裂则发生在焊点阴极钎料与铜线界面处,呈现沿晶脆性断裂特征,如图5(a)和(b)所示,图中箭头方向为电迁移时电子的流动方向.这些结果表明,电迁移导致了焊点蠕变断裂机制的本质性变化,即经过高电流密度或

长时间通电后,微互连焊点在服役条件下会迅速发生脆性断裂.



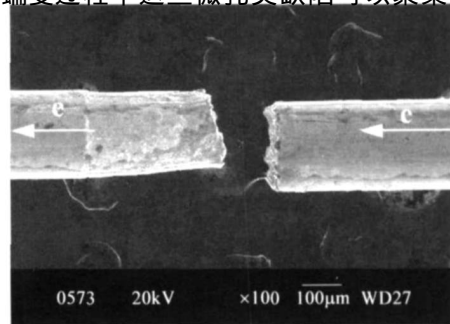
(a) 最终蠕变断裂发生在焊点中间位置



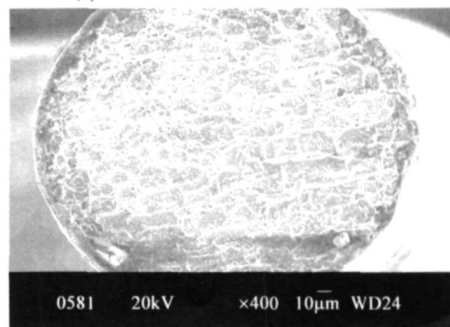
(b) 断面呈延性断裂

图4 未经过电迁移的焊接头蠕变失效后的扫描电镜(SEM)照片

导致微互连焊点出现以上明显不同蠕变断裂机制的原因主要是电迁移.无电迁移作用时,由于互连焊点中不可避免存在一些弥散分布的组织夹杂和微孔等缺陷,在蠕变过程中这些微孔类缺陷可以聚集、长大,并



(a) 蠕变断裂出现在钎料与铜线界面处



(b) 断面呈典型的脆性断裂

图5 经电流密度为 $1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 加载96h电迁移后蠕变失效接头的形貌及断口SEM照片

相互连接,加之焊点中部受拘束程度最低、变形易于发生,因而延性蠕变断裂最终出现在焊点中部;图6所示

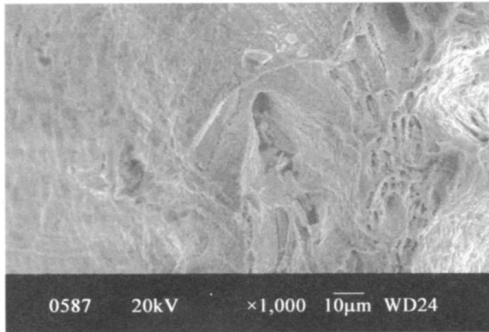


图6 无电迁移时焊点延性断裂断口形貌

为无电迁移时焊点蠕变变形过程中微孔长大、聚合及焊点最终断裂后的延性断口特征.而对于经历电迁移作用的微互连焊点,由于焊点中的微孔会随电子流动而逐渐向阴极移动,同时由于电迁移过程本身产生的大量焦耳热加速了微孔向阴极扩散移动的速度,这些微孔最后会在阴极聚集而形成空洞,图7所示为经历

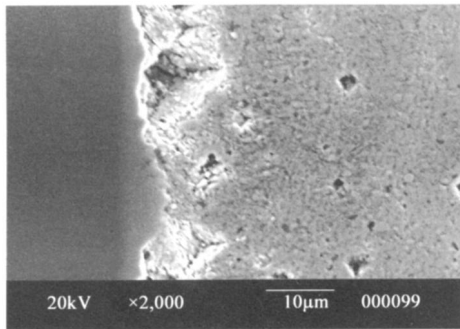


图7  $1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ -96h电迁移后焊点纵剖面组织(阴极界面出现空洞)

$1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  和96h电迁移后在焊点阴极界面出现的空洞;在随后的高温蠕变过程中,焊点阴极由于存在大量空洞而最为脆弱,因而断裂首先发生在阴极界面,且断口呈冰糖状,为典型的沿晶脆性断裂,如图8所示.

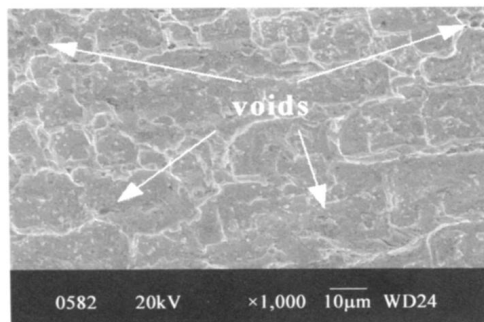


图8  $1.27 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  /96h后焊点阴极断口形貌

#### 4 总结

本文研究了电迁移对无铅钎料 Sn/3.0Ag/0.5Cu (Sb)焊点蠕变断裂行为的影响,主要结论如下:

(1)微互连焊点中的电迁移作用加速了其蠕变断裂过程,随着电迁移通电时间的延长及电流密度的增加,其蠕变应变速率显著增大,而蠕变寿命明显缩短.

(2)电迁移导致了焊点蠕变断裂模式的明显变化,在高电流密度或长时间通电的电迁移作用后,微互连焊点在服役条件下会发生由延性断裂向脆性断裂的转变.

(3)微互连焊点的电迁移致脆化的主要机理是焊点中微孔洞随电子流动的定向迁移以及由焦耳热驱动的定向扩散而逐渐在焊点阴极聚集、长大,在拉应力的主要作用下焊点阴极界面发生低变形脆性断裂.

#### 参考文献:

- [1] 张新平,尹立孟,于传宝.电子和光子封装无铅钎料的研究和应用进展[J].材料研究学报,2008,22(1):1-9.  
Zhang Xin-ping, Yin Li-meng, Yu Chuan-bao. Advances in research and application of lead-free solders for electronic and photonic packaging[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(1):1-9.
- [2] K N Tu. Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration interconnects[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9):5451-5473.
- [3] K Zeng, K N Tu. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology[J]. Materials Science and Engineering R, 2002, 38(2):55-105.
- [4] C Chen, S W Liang. Electromigration issues in lead-free solder joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18(1-3):259-268.
- [5] J Villaina, O S Bruellerb, T Qasim. Creep behaviour of lead free and lead containing solder materials at high homologous temperatures with regards to small solder volumes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 99(1-2):194-197.
- [6] M Kerr, N Chawla. Creep deformation behavior of Sn-3.5Ag solder/Cu couple at small length scales[J]. Acta Materialia, 2004, 52(15):4527-4535.
- [7] C K Lin, D Y Chu. Creep rupture of lead-free Sn-3.5Ag and Sn-3.5Ag-0.5Cu solders[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2005, 16(6):355-365.
- [8] V I Igoshev, J I Kleiman. Creep phenomena in lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2000, 29(2):244-250.
- [9] X P Zhang, C B Yu, S Shrestha, L Dorn. Creep and fatigue behaviors of the lead-free Sn-Ag-Cu-Bi and Sn60Pb40 solder interconnections at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18(6):665-670.
- [10] X P Zhang, L M Yin, C B Yu. Thermal creep and fracture behaviors of the lead-free Sn-Ag-Cu-Bi solder interconnections under different stress levels[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2008, 19(4):393-398.

- [11] 张新平,于传宝,张宇鹏,朱敏.两种无铅钎料的抗蠕变性能与 Sn60Pb40 钎料的对比分析[J].焊接学报,2007,28(2):1-4.  
Zhang Xin-ping, Yu Chuang-bao, Zhang Yu-peng, Zhu Min. Creep-resistant performance of two lead-free solders and comparison with Sn60Pb40 solder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 1 - 4.
- [12] F Ren, J W Nah, K N Tu, B S Xiong, L H Xu, J H L Pang. Electromigration induced ductile-to brittle transition in lead-free solder joints [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89 (141914): 1 - 3.
- [13] F Ren, J W Nah, J O Suh, K N Tu, B S Xiong, L H Xu, J H L Pang. Effect of electromigration on mechanical behavior of solder joints[A]. Proceeding of the 10th International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces [C]. IEEE/ CPMT, Irvine, California, 16 - 18 March, 2005. 66 - 69.

## 作者简介:



尹立孟 男,1976年8月生于湖南邵东,华南理工大学材料加工工程专业博士生,主要从事无铅微/光电子封装材料与可靠性研究。  
E-mail: yin. limeng @mail. scut. edu. cn



张新平 男,1965年8月生,工学博士(1993),华南理工大学教授、博士生导师;主要研究方向为微/光电子封装材料及可靠性、生物材料和机敏材料等。