第 25 卷第 4 期 Volume 25 Number 4 文章编号: 1004-0609(2015)04-0967-08 中国有色金属学报 The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2015 年 4 月 April 2015

### Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点液-固电迁移下 Cu 和 Ni 的交互作用

黄明亮, 冯晓飞, 赵建飞, 张志杰

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘 要:采用浸焊方法制备 Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点,研究 5×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup>、170 ℃条件下液-固电迁移对 Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点 Cu、Ni 交互作用以及界面反应的影响。无论电流方向如何,在液-固电迁移过程中焊点 均表现为"极性效应",即阳极界面金属间化合物(IMC)持续生长变厚,且一直厚于阴极界面的 IMC。电迁移显著 加快了 Cu、Ni 原子的交互作用。当电子由 Ni 流向 Cu 时,在化学势梯度和电子风力的耦合作用下, Ni 原子扩散 至阳极 Cu 侧参与界面反应生成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型 IMC,同时一定量的 Cu 原子能够逆电子风扩散到 Ni 侧,参与界 面反应生成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型 IMC;当电子由 Cu 流向 Ni 时,大量的 Cu 原子扩散至 Ni 侧,并参与界面反应生成 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型 IMC;当电子由 Cu 流向 Ni 时,大量的 Cu 原子扩散至 Ni 侧,并参与界面反应生成 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型 IMC,然而,Ni 原子在逆电子风条件下无法扩散至 Cu 侧,从而使阴极 Cu 侧界面始终为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 类型 IMC。此外,无论电流方向如何,焊点内都没有出现 Bi 的聚集。

关键词:液-固电迁移;交互作用;Cu/Sn-58Bi/Ni焊点;界面反应;金属间化合物 中图分类号:TG425.1 文献标志码:A

# Cu-Ni cross-solder interaction in Cu/Sn-58Bi/Ni interconnect undergoing liquid-solid electromigration

HUANG Ming-liang, FENG Xiao-fei, ZHAO Jian-fei, ZHANG Zhi-jie

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Cu/Sn-58Bi/Ni interconnect was prepared by dip-soldering, the effects of liquid-solid electromigration liquid-solid electromigration (L-S EM) on the Cu-Ni cross-solder interaction and the interfacial reaction in Cu/Sn-58Bi/Ni interconnects were investigated at current density of  $5 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup> and 170 °C. Regardless of the current direction, a polarity effect is observed in Cu/Sn-58Bi/Ni interconnects undergoing liquid-solid electromigration (L-S EM), i.e., the interfacial intermetallic compound (IMC) at the anode grows continuously and is obviously thicker than that at the cathode. EM significantly enhances the interaction between Cu and Ni atoms. When electrons flow from Ni to Cu, the diffusion of Ni atoms are significantly enhanced by the combining effect of chemical potential gradient and electronic wind, resulting in the formation of (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> at the anode Cu interface, while a certain amount of Cu atoms diffuse to the Ni cathode interface under upwind diffusion, resulting in the formation of (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC. However, Ni atoms are difficult to diffuse to the cathode Cu interface under upwind diffusion, thus, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC remains at the cathode. Furthermore, regardless of the current direction, Bi atoms do not segregate undergoing electromigration (EM). **Key words:** liquid-solid electromigration; cross-solder interaction; Cu/Sn-58Bi/Ni interconnect; interfacial reaction; intermetallic compound

Sn-58Bi 共晶钎料具有熔点低、力学性能优良和成本低等优点,被认为是最有可能取代 Sn-Pb 的钎料

之一<sup>[1-2]</sup>。由于 Cu、Ni 具有良好的焊接性能和较低 成本,其作为焊点中的凸点下金属层(Under bump

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51475072,51171036)

收稿日期: 2014-07-28; 修订日期: 2014-12-11

通信作者: 黄明亮,教授,博士; 电话: 0411-84706595; E-mail: huang@dlut.edu.cn

metallization, UBM)在电子封装中得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。因此, Cu/钎料凸点/Ni 结构焊点成为电子封装中常见的互连形式。近年来,电子产品逐渐向轻、薄、短、小的方向发展,焊点的尺寸不断减小,使得通过焊点的平均电流密度急剧上升,电迁移(Electromigration)已成为电子封装中重要的可靠性问题。

近年来,国内外对 Sn-58Bi 在电迁移作用下的界 面反应以及 Bi 在阳极的聚集现象做了大量的研 究<sup>[5-8]</sup>。黄明亮等<sup>[5]</sup>研究了 Cu-Ni 交互作用对 Cu/Sn/Ni 焊点液/固界面反应的影响,研究发现,250 ℃条件下, 液固反应过程中 Cu 原子和 Ni 原子都能够扩散到对面 的界面处并参与界面反应, 使得 Sn/Cu 及 Sn/Ni 界面 处金属间化合物由浸焊后的 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 转变为 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>型。HE 等<sup>[6]</sup>研究 Cu/Sn-58Bi/Cu 焊点电迁 移对界面反应及共晶显微组织中相分离的影响,结果 表明:电流促进阴极 IMC 层的生长而抑制阳极的 IMC 生长,这是由于阳极会出现 Bi 的聚集,作为阻挡层阻 碍原子扩散进入阳极界面。CHEN 等<sup>[7]</sup>研究不同电流 密度(2.9×104~7.3×104 A/cm2)下 Sn-58Bi 钎料在电迁 移作用下的原子迁移现象,结果表明:较低的电流密 度下, 电子风力加速 Sn 和 Bi 向阳极移动; 而在高电 流密度下, Bi 在阳极聚集产生的背应力使得 Sn 向阴 极扩散,最终出现两相分离的现象,Bi 在阳极聚集降 低了焊点的可靠性。

之前的研究主要集中在固--固电迁移,然而,随 着电子封装密度不断上升,微凸点的尺寸不断减小, 通过焊点的电流密度急剧上升(10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>),从而 导致固--固电迁移过程中焦耳热效应越来越明显<sup>[9-10]</sup>。 低熔点 Sn-58Bi 钎料接头可能在电迁移过程中出现局 部溶解,熔化后焊点并不会立即失效,而是在表面张 力的作用下保持原来的形状,焊点仍处于导通状态, 那么固--固电迁移就会转变为液--固电迁移。HUANG 等<sup>[11]</sup>研究 Cu/Sn3.5Ag/Cu 焊点在液--固电迁移作用下 的界面反应,研究发现,Cu 阳极的溶解率比固--固电 迁移的大一个数量级。由于原子在液态钎料中的扩散 速率远大于其在固态钎料中的,液--固电迁移过程中 的界面反应和失效模式也会有明显的不同。

本文作者主要研究在 Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点在 液-固电迁移作用下 Cu 和 Ni 原子的交互作用、界面 IMC 的演变以及 Bi 原子的扩散聚集行为。

### 1 实验

采用浸焊的方法来制备 Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点。

焊接前先将Cu块和Ni块(5 mm×7 mm×10 mm)的待 焊面进行预磨抛光,然后在抛光的Cu、Ni 块上均匀 涂抹一层可溶性助焊剂,并在之间放置两根直径为 200 μm的不锈钢丝以控制接头的间距,将固定好的试 样浸入含有200gSn-58Bi 钎料的锡炉中(锡炉的温度 控制在(200±2)℃)进行焊接,15 s之后迅速取出置于 冷水中进行冷却。将浸焊后的试样线切割成线性接头, 并将其4 个侧面预磨抛光制备成横截面尺寸为300 μm×300 μm的条状试样,最后放入到连接有直流源 的恒温油浴箱进行电迁移实验。图1所示为线性焊点 电迁移示意图。



图1 Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点电迁移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Cu/Sn-58Bi/Ni line-type interconnect during liquid-solid EM

Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点的电迁移实验在焊点温度为 (170±4) ℃、电流密度为 5.0×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> 的条件下进 行,通电时间为 1、2、4 和 8 h,分别以 Cu 作为阳极 和阴极做了相同的实验。同时为了与电迁移的实验结 果进行对比,还进行了相同温度下的液-固界面反应 实验(无电流)。电迁移实验在油浴中进行,实验过程 中定时将 K 型热电偶置于试样焊点表面进行温度测 量。

将液-固界面反应和电迁移后的试样进行预磨抛 光,再用腐蚀液(4% HCl+96% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH,体积分数)进 行腐蚀,腐蚀时间为2s。采用 Zeiss Super 55 型扫描 电子显微镜(SEM)和其附带的能谱分析仪(EDX)分别 对界面 IMC 的形貌及成分进行分析,利用 Auto CAD 软件对界面 IMC 层的厚度进行测量,每个界面取3个 视场,每个视场测量3次后取平均值。

### 2 结果与分析

### 2.1 浸焊后 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点显微组织

图 2 所示为 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点浸焊后的显微组

### 第25卷第4期

织。由图 2(a)可看出, Sn-58Bi 钎料与 Cu、Ni 基板连 接良好,没有产生孔洞等缺陷。由图 2(b)和(c)可看出, 焊点两侧界面上均形成薄层状界面 IMC,钎料中仍为 均匀的 Sn-Bi 共晶组织。EDX 分析结果表明: Sn-58Bi/Ni 界面处生成 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> IMC,其厚度为 0.27 µm; Sn-58Bi/Cu 界面处生成 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC,其厚度为 0.62 µm。由此表明,经过短时间的浸焊反应后,Cu、 Ni 原子并没有扩散至对面界面发生交互作用。但是 WU 等<sup>[12-13]</sup>发现,线性 Ni/Sn(50~100 µm)/Cu 焊点在 260 ℃浸焊 60 s 后,Cu 和 Ni 发生了交互作用,是由 焊点间距较小且浸焊时间较长所致。本文作者采用的 短时间浸焊就是为了消除浸焊过程中出现的 Cu、Ni 交互作用。



**图 2** Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点在 200 ℃浸焊 15 s 后的显微 组织

**Fig. 2** Microstructures of as-soldered Cu/Sn-58Bi/Ni interconnect after soldering at 200 °C for 15 s: (a) Macrograph; (b) Ni interfacial IMC; (c) Cu interfacial IMC

## 2.2 液-固界面反应过程中 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点的显 微组织

图 3 所示为 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在 170 ℃下液-固界面反应1、2、4和8h后的显微组织。由图3可 以看出,两侧界面 IMC 随时间延长而逐渐变厚,且钎 料中没有析出大量 IMC。图 3(a)、(c)、(e)和(g)对应 液-固界面反应不同时间后 Ni 侧界面显微组织变化 图。液-固界面反应1h后,界面层状IMC仍然很薄, EDX 分析测定其 IMC 为(Cu<sub>0.56</sub>,Ni<sub>0.44</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,厚度由初 始的 0.27 μm 变为 0.67 μm, 说明当液-固界面反应 1 h 后 Cu 原子已经扩散至对面的 Ni 侧处,并使得 IMC 由 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>转变为(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>。当液-固界面反应 2 和 4 h 后, EDX 分析测定其 IMC 分别为(Cu<sub>0.57</sub>,Ni<sub>0.43</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>和 (Cu<sub>0.62</sub>,Ni<sub>0.38</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, 经测量其厚度增加至0.90 µm 和1.17 µm。当液-固界面反应8h时,界面IMC仍然为层状, 此时界面 IMC 厚度已增加至 2.49 μm。随着液固反应 时间的延长,Ni侧界面IMC一直为(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn5类型, 但其成分中的 Ni 含量逐渐减少, Cu 含量逐渐增加, 这与陈雷达<sup>[14]</sup>研究 Cu/Sn/Ni 焊点在 250 ℃条件下的 液-固界面反应行为的 Cu、Ni 的交互作用是一致的。

图 3(b)、(d)、(f)和(h)所示为焊点液-固界面反应 不同时间后 Cu 侧界面显微组织变化图。液-固界面反 应不同时间后界面 IMC 均为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,厚度从初始的 0.62 µm 生长到 2.09 µm,至 2.58 µm,最后增厚到 3.75 µm。液-固界面反应后,Ni 侧界面生成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类 型 IMC(见图 3(a)、(c)、(e)、(g)),可看出 Cu 侧界面 IMC 中没有发现 Ni。相应的 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点界面 IMC 生长动力学曲线如图 4 所示。由图 4 可知,随着 界面反应时间的延长,Sn-58Bi/Ni 界面(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 的厚度不断增加,同时,Sn-58Bi/Cu 界面 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 的厚度也明显增加,且其厚度一直大于 Sn-58Bi/Ni 界 面 IMC 的厚度。

### 2.3 170 ℃时液-固电迁移焊点的显微组织

### 2.3.1 电子由 Ni 端流向 Cu 端

图 5 所示为 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在 170 ℃、 5.0×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup>条件下液-固电迁移不同时间后的显微 组织,电子从 Ni 端流向 Cu 端。图 5(a)、(c)、(e)和(g) 所示为 Ni 阴极界面显微组织变化图。由图 5(a)可看出, 液-固电迁移 1 h 后, Ni 侧形成了较薄的层状 IMC, 且 Ni/IMC界面变得凹凸不平,界面 IMC 的厚度为 0.65 µm。EDX 分析测定其 IMC 为(Ni<sub>0.59</sub>,Cu<sub>0.41</sub>)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>,此时, Cu 原子已经逆风扩散到 Ni 侧界面,并参与界面反应。 液-固界面反应 1 h 后, Ni 侧界面生成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 类型



图 3 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在 170 ℃下液-固反应过程中界面的显微组织演变 Fig. 3 Microstructural evolution of Cu/Sn-58Bi/Ni solder joints during liquid-solid interfacial reaction at 170 ℃: (a), (b) 1 h; (c), (d) 2 h; (e), (f) 4 h; (g), (h) 8 h



图 4 170 ℃时液-固反应过程中界面 IMC 生长动力学 Fig. 4 Growth kinetics of interfacial IMC during liquid-solid reaction at 170 ℃

IMC 的情况如图 3(a)所示,说明电迁移阻碍了 Cu 原 子在液态钎料中的扩散,使得阴极界面 IMC 仍为 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>类型。当液-固电迁移时间 2 h 时,界面 IMC 的厚度增加到 1.23 µm,EDX 分析测定其 IMC 由 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>转变为(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,说明此时对面的 Cu 元 素已经大量扩散至 Ni 侧界面。进一步延长电迁移时间 至 4 h 后(见图 5(e)),界面处有突出的杆状和不规则的 块状 IMC 出现,此时,IMC 的厚度达到了 1.42 µm, EDX 分析测定 IMC 仍为(Cu<sub>0.87</sub>,Ni<sub>0.13</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>化合物。当 液-固电迁移 8 h 后(见图 5(g)),界面 IMC 仍为层状 (Cu<sub>0.83</sub>,Ni<sub>0.17</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,但其厚度减小到了 0.64 µm。由此

#### 第25卷第4期

可见,相对于液-固界面反应来说,电子风力明显加 快阴极 Ni 基板的溶解,使得 Ni 界面变得不平整;且 阴极界面 IMC 的厚度先增加后减小,如图 6 所示。这 主要和阴极界面 IMCs 的溶解有关,由于初始阴极界 面 IMC 很薄,输入界面的原子通量大于输出的原子通 量,从而使界面 IMC 的厚度增加;当 IMC 的厚度增 加到一个临界值时,输入界面的原子通量会小于输出 的原子通量,而使 IMC 的厚度减小,这与 CHEN 等<sup>[15]</sup> 研究电迁移对 Cu/Sn/Cu 接头界面 IMCs 生长的影响是 一致的。

图 5(b)、(d)、(f)和(h)为 Cu 阳极界面显微组织变

化图。当液-固电迁移 1 h 后,如图 5(b)所示,界面 IMC 的厚度为 2.23 μm, EDX 分析测定其 IMC 为 (Cu<sub>0.94</sub>,Ni<sub>0.06</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, (Cu<sub>0.94</sub>,Ni<sub>0.06</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 固溶了一定量的 Ni 原子。液-固反应 1 h 后 Cu 侧界面生成 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 类型 IMC 的情况如图 3(b)所示,说明电迁移加速了阴极 Ni 的溶解和扩散,同时电迁移促进阳极界面 IMC 的生 长。液-固反应 2、4 和 8 h 时(见图 5(d)、(f)和(h)), EDX 分析测定界面 IMC 仍保持为(Cu<sub>0.95</sub>,Ni<sub>0.05</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>、 (Cu<sub>0.96</sub>,Ni<sub>0.04</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和(Cu<sub>0.97</sub>,Ni<sub>0.03</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, 界面 IMC 的厚 度依次变成 3.31、5.54 和 6.11 μm。由图 6 中的阳极 Cu 侧的界面 IMC 生长动力学曲线可知,随着液-固电



图 5 170 ℃、5×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> 条件下 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在液-固电迁移过程中界面的显微组织演变(电子由 Ni 流向 Cu) Fig. 5 Microstructural evolution of Cu/Sn-58Bi/Ni interconnects undergoing L-S EM at 170 ℃ and 5×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> (electrons flowing from Ni side to Cu side): (a), (c), (e), (g): Cathode interface; (b), (d), (f), (h): Anode interface; (a), (b) 1 h; (c), (d) 2 h; (e), (f) 4 h; (g), (h) 8 h

中国有色金属学报



**图6** 170 ℃条件下液-固电迁移过程中界面 IMC 生长动力学 (电子由 Ni 流向 Cu)

**Fig. 6** Growth kinetics of interfacial IMC during L-S EM at 170 °C(electrons flowing from Ni side to Cu side)

迁移时间的延长,阳极 Cu 侧界面 IMC 的厚度不断增加,这与阴极 Ni 侧的 IMC 生长动力学不同。阳极 Cu 侧界面 IMC 的生长速率先增加后减小,这是由于 Sn-Bi 钎料中的 Sn 原子因生成化合物而不断被消耗使 得参与界面反应的 Sn 元素减少,而 Bi 元素并不参与 界面反应。

2.3.2 电子由 Cu 端流向 Ni 端

图 7 所示为 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在 170 ℃、5.0× 10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> 条件下液-固电迁移不同时间后的显微组 织,电子从 Cu 端流向 Ni 端。其中图 7(a)、(c)、(e) 和(g)为 Ni 阳极界面显微组织变化图。当液-固电迁移 1 h 后,如图 7(a)所示, Ni 侧形成了较厚的不规则状 IMC, EDX 分析测定其 IMC 为(Cu<sub>0.93</sub>,Ni<sub>0.07</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,这



图 7 170 ℃、5×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> 条件下 Cu/Sn-58Bi/Ni 焊点在液-固电迁移过程中界面显微组织演变(电子由 Ni 流向 Cu) Fig. 7 Microstructural evolution of Cu/Sn-58Bi/Ni interconnects undergoing L-S EM at 170 ℃ and 5×10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> (electrons flowing from Cu side to Ni side): (a), (c), (e), (g): Anode interface; (b), (d), (f), (h): Cathode interface; (a), (b) 1 h; (c), (d) 2 h; (e), (f) 4 h; (g), (h) 8 h

### 第25卷第4期

时 Cu 原子在顺风扩散下到达 Ni 侧参与界面反应并改 变了 IMC 的类型,此时界面层状 IMC 的厚度为 2.97 μm。液-固界面反应 1 h 后,Ni 侧界面生成 0.67 μm 厚(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型 IMC 的情况如图 3(a)所示,电子风 力明显加强了 Cu 原子在液态钎料中的扩散速率,使 得阳极 Ni 界面 IMC 厚度是液固反应时的 4.43 倍。延 长电迁移时间到 2 h 时,如图 7(c)所示,界面 IMC 保 持为(Cu<sub>0.94</sub>,Ni<sub>0.06</sub>)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>型化合物,界面 IMC 的厚度变 成 3.58 μm。延长液-固电迁移 4 h 后,如图 7 (e)所示, 界面 IMC 的形貌没有明显变化,EDX 分析测定界面 IMC 为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>,此时,IMC 的厚度达到了 7.46 μm。 说明电子从 Cu 端流向 Ni 端,抑制了 Ni 的溶解扩散, 因此,使 IMC 中不再含 Ni。当液-固电迁移 8 h 后, 界面 IMC Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>的厚度增加到 13.45 μm。

图 7(b)、(d)、(f)和(h)所示为 Cu 阴极界面显微组 织演变。从 Cu 阴极界面可以看出,液-固电迁移加速 了阴极 Cu 的溶解和扩散,使得 Cu 基板表面因大量溶 解而变得不平整,同时电迁移促进了阳极界面 IMC 的 生长。当电迁移时间为 1、2、4 和 8 h 时,EDX 分析 测定 Cu 界面 IMC 一直保持为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型,界面 IMC 的厚度依次变成 1.66、1.82、2.14 和 3.15 μm。

图 8 所示为 170 ℃时液-固电迁移过程中界面 IMC 生长动力学。由图 8 中的阴极 Cu 侧界面 IMC 生 长动力学曲线可知,随着液-固电迁移时间的不断延 长,阴极 Cu 侧界面 IMC 的厚度不断增加,但其生长 速率明显低于阳极 Ni 侧界面 IMC。与图 6 中 Ni 作为 阴极的 IMC 生长动力学曲线相比,说明在 Cu 为阴极 的情况下,电迁移的极性效应更为显著。在图 5 和 7



图 8 170 ℃时液-固电迁移过程中界面 IMC 生长动力学 (电子由 Cu 流向 Ni)

Fig. 8 Growth kinetics of interfacial IMC during L-S electromigration at 170  $^{\circ}$ C (electrons flowing from Cu side to Ni side)

中,随着电流加载时间的增加,Sn-Bi 钎料组织出现 组织细化和粗化的现象是由液-固电迁移反应之后不 同的冷却速度造成的。

对比不同电流方向电迁移条件下的阴极基板消耗 情况可以得出:当 Cu 为阴极时,Cu 基板在整个液-固电迁移过程中消耗较为严重;而当 Ni 为阴极时, Ni 基板消耗较小,但 Cu 基板有明显消耗。这主要是 由于当 Cu 为阴极时,在 Cu 侧形成的化合物始终较薄, Cu 原子在顺风扩散下很容易扩散至液态钎料中,且 Cu 在液态钎料中的饱和溶解度是 Ni 的 3 倍多,Cu 到 达 Ni 侧界面会生成较厚的 Cu-Sn 化合物,使得 Cu 被 大量消耗,电迁移引起的 Cu 扩散通量和化学势梯度 引起的 Cu 扩散通量方向一致,因此,Cu 的溶解较为 严重。而当 Ni 为阴极时,Ni 侧界面处形成的 IMC 厚 度也一直很薄,但其在液态钎料中的迁移速度和饱和 溶解度都比较小,且两侧 IMC 均为 Cu-Sn 型化合物, 因此,Ni 基板消耗较小。

在整个液-固电迁移过程中,无论电流方向如何, 钎料内并没有发现Bi的聚集现象,这与Cu/Sn-58Bi/Ni 线性焊点固-固电迁移条件下的结果<sup>[16]</sup>不同,说明在 液-固电迁移条件下存在很多影响和变化的因素,Bi 原子在液态钎料中的扩散迁移速度比在固态钎料中的 快很多,Bi在电迁移作用下向阳极迁移,而因阳极界 面反应消耗 Sn 和电迁移作用使得阳极界面附近钎料 中的Bi原子浓度高于阴极侧的,因此,化学式梯度与 电迁移导致的扩散通量方向相反、大小相当,使得Bi 原子不能大量迁移到阳极界面附近。且由于反应生成 的界面 IMC 较薄,消耗的 Sn 原子少,并没有较多过 剩的 Bi 原子,因此,即使在阳极侧 IMC 附近也没有 出现 Bi 原子的聚集和组织粗化不均匀的现象。

### 3 结论

1) 浸焊后, Cu、Ni 原子之间并未发生交互作用, 在 Ni 侧和 Cu 侧界面处分别形成了很薄的层状 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 和 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC。在液-固界面反应过程中(无电流),两 侧界面 IMC 厚度均随反应时间的延长而增加。Ni 侧 界面, Cu 原子在化学势梯度的作用下迅速扩散至 Ni 侧界面, 使 IMC 由 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>转变(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型; Cu 侧界面, IMC 仍为不含 Ni 原子的 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>类型。

2) 当电子由 Ni 流向 Cu 时,阳极 Cu 侧界面上生 成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC,且 IMC 的厚度持续增加;阴极 Ni 侧界面上,一定量的 Cu 原子在逆电子风作用下扩 散到了 Ni 侧,并参与了 Ni 侧的界面反应形成 3) 当电子由 Cu 流向 Ni 时,阳极 Ni 侧界面上形 成(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 类型 IMC,且 IMC 的厚度持续增加;阴 极 Cu 侧界面 IMC 始终为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 类型化合物。阴阳 两极界面化合物的厚度均随电迁移时间的延长而增 加,电迁移同样加快了 Cu、Ni 原子的交互作用。

4) 无论电流方向如何, Sn-58Bi 钎料中均未出现 Bi 的聚集。

### REFERENCES

- CHEN C M, HUANG C C. Effects of silver doping on electromigration of eutectic SnBi solder[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1/2): 235–241.
- [2] MIAO H W, DUH J G. Microstructure evolution in Sn-Bi and Sn-Bi-Cu solder joints under thermal aging[J]. Material Chemistry and Physics, 2001, 71(3): 255–271.
- [3] TU K N, ZENG K. Tin-lead (SnPb) solder reaction in flip chip technology[J]. Materials Science and Engineering R, 2001, 34(1): 1–58.
- [4] ZHANNG F, LI M, CHEM C C, SHAO Z C. Effects of substrate metallizations on solder/underbump metallization interfacial reactions in flip-chip packages during thermal aging[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18(6): 1333–1341.
- [5] 黄明亮,陈雷达,赵 宁. Cu-Ni交互作用对 Cu/Sn/Ni 焊点液/ 固界面反应的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 1073-1078.

HUANG Ming-liang, CHEN Lei-da, ZHAO Ning. Effects of Cu-Ni cross-solder interaction on liquid-solid interfacial reaction in Cu/Sn/Ni solder joint[J]. Tractions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 1073–1078.

[6] HE H W, XU G C, GUO F. Electromigration-enhanced intermetallic growth and phase evolution in Cu/Sn-58Bi/Cu solder joints[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(4): 929–935.

- [7] CHEN C M, HUANG C C. Atomic migration in eutectic SnBi solder alloys due to current stressing[J]. Journal of Materials Research, 2008, 23(4): 1051–1056.
- [8] HE H W, ZHAO H Y, GUO F, XU G C. Bi Layer Formation at the anode interface in Cu/Sn-58Bi/Cu solder joints with high current density[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(1): 46-52.
- [9] HUANG M L, ZHOU S M, CHEN L D. Electromigrationinduced interfacial reactions in Cu/Sn/electroless Ni-P solder interconnects[J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(4): 730–740.
- [10] CHEN C, TONG H M, TU K N. Electromigration and thermomigration in Pb-free flip-chip solder joints[J]. Annual Review of Materials Research, 2010, 40: 531–555.
- [11] HUANG J R, TSAI C M, LIN Y W, KAO C R. Pronounced electromigration of Cu in molten Sn-based solders[J]. Journal of Materials Research, 2008, 23(1): 250–257.
- [12] WU W H, CHUNG H L, CHEN C N. The influence of current direction on the Cu-Ni cross-interaction in Cu/Sn/Ni diffusion couples[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(12): 2563–2572.
- [13] WU W H, CHUNG H L, CHEN C B, HO C E. Critical current density for inhibiting (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> formation on the Ni Side of Cu/solder/Ni joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(12): 2653–2661.
- [14] 陈雷达. 电迁移作用下无铅焊点中的交互作用及界面反应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 1-140.
  CHEN Lei-da. Effects of electromigration on cross-solder interaction and interfacial reaction in lead-free solder joints[D].
  Dalian: Dalian University of Technology, 2011: 1-140.
- [15] CHEN L D, HUANG M L, ZHOU S M. Effect of electromigration on intermetallic compound formation in line-type Cu/Sn/Cu interconnect[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(2): 535–541.
- [16] GU X, CHAN Y C. Thermomigration and electromigration in Sn-58Bi solder joints[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 701–705.

(编辑 李艳红)