

# 集成电路微互连结构中的热迁移\*

张金松<sup>1)</sup> 吴懿平<sup>2)†</sup> 王永国<sup>1)</sup> 陶 媛<sup>2)</sup>

1) (上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

2) (华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

(2009 年 7 月 8 日收到; 2009 年 11 月 20 日收到修改稿)

高工作电流在集成电路微互连结构中产生大量焦耳热, 引起局部区域的温升、形成高温梯度, 金属原子沿着温度梯度反向运动发生热迁移. 热迁移是集成电路微互连失效的主要原因之一. 阐述了热迁移原理、失效模式及原子迁移方程. 综述和分析了在单纯温度场、电场和温度场耦合等不同载荷条件下金属引线和合金焊料的热迁移研究. 归纳并提出了集成电路微互连结构热迁移研究亟待解决的问题.

**关键词:** 集成电路, 微互连, 热迁移

**PACC:** 6610C, 6630L, 8160B

## 1. 引 言

在市场的强大推动下, 集成电路 (IC) 的特征尺寸已经从微米级进入到深亚微米级. IC 制造与封装技术的不断创新, 进一步满足了市场对电子产品的微型化、低成本、多功能、便携式以及高可靠性的要求.

微互连结构是 IC 制造与封装的重要组成部分, IC 微互连通常分为内部的引线互连以及外部的焊料互连、键合互连、导电胶互连等. 引线互连实现 IC 内部各层薄膜之间的电信号连接, 常用材料是 Al 合金或纯 Cu, 多层 Cu 引线互连结构的横截面如图 1 (a) 所示<sup>[1]</sup>. 外部互连提供 IC 与基板之间的导电通道和整体的机械强度, 在多种外互连技术中, 焊料互连以其细间距、高密度、小体积的优点得到了广泛应用<sup>[1]</sup>. 焊料互连主要由凸点下金属化层 (UBM)、焊料凸点和基板焊盘三部分组成. 在 IC 焊盘上制备的 UBM 通常有扩散阻挡层、润湿层和抗氧化层三层结构. Sn 基共晶合金 ( $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ ,  $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$ ,  $\text{Sn}_{96}\text{Ag}_{3.5}\text{Cu}_{0.5}$ ,  $\text{Sn}_{48}\text{Bi}_{52}$  等) 是焊料互连的主要材料, Sn 基焊料经过一次回流焊在 IC 焊盘上形成凸点, 再经过第二次回流焊实现凸点与基板焊盘的冶金连接, 最后形成 IC/凸点/基板的微互连结构 (图 1 (b))<sup>[2]</sup>.

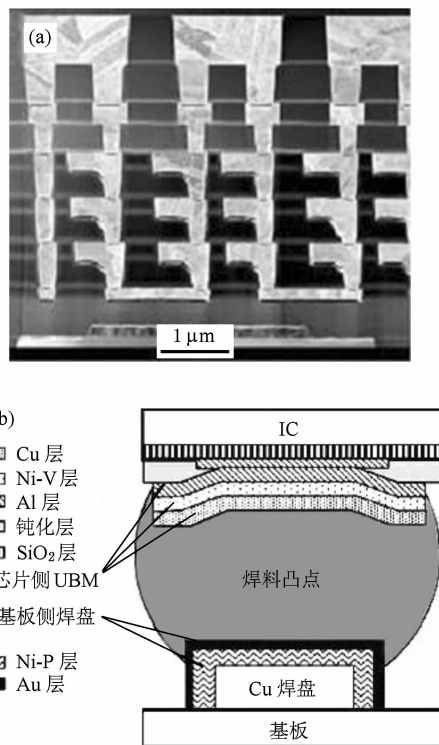


图 1 IC 的两种微互连结构 (a) IC 内部的 Cu 引线互连图像<sup>[1]</sup>, (b) IC 与基板的焊料互连示意图<sup>[2]</sup>

随着 IC 特征尺寸的减小和封装密度的提高, IC 的工作电流和温度呈现出上升趋势. 就外互连的焊料互连结构而言, 凸点直径和间距的减小使得电流

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60876070) 和上海大学创新基金 (批准号: A10-0109-08-004) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ypwu@hust.edu.cn

密度接近或超过  $10^4 \text{ A/cm}^2$ , 高密度电子流驱动金属原子在焊料凸点中定向迁移——电迁移. 类似地, 如果内互连结构中流过金属引线的电流密度达到  $10^6 \text{ A/cm}^2$ , 将会发生引线的电迁移<sup>[2, 3]</sup>. 导电材料中有电流通过就会产生焦耳热. 当导电材料中存在较高的温度梯度时, 原子将沿着温度梯度的反方向发生定向迁移——热迁移. IC 微互连结构在高电流密度和高温度梯度的共同作用下会出现电迁移/热迁移耦合失效<sup>[4]</sup>. 互连引线的电迁移/热迁移耦合失效通常导致局部区域的金属引线发生熔断(图 2(a)), 互连焊料的电迁移/热迁移耦合失效则在互连界面的阴极处发生焊盘金属过度溶解, 降低互连界面的结合强度和导电能力(图 2(b)). 由此可知, 引线互连和焊料互连中电迁移/热迁移耦合失效的模式和机理并不相同, 热迁移也是造成 IC 失效的一个重要因素. 目前, 热迁移已从电迁移中分离出来, 独立成为 IC 微互连结构可靠性研究的一个新方向.

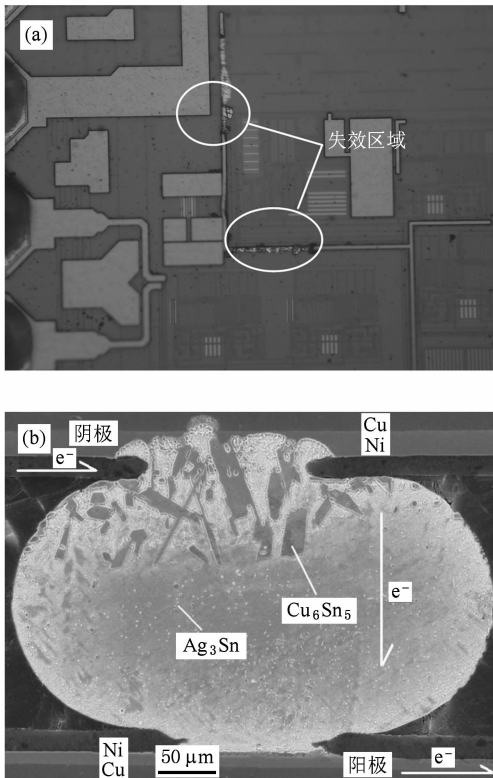


图 2 IC 微互连结构的电迁移/热迁移耦合失效图像 (a) 引线互连的电迁移/热迁移耦合失效, (b) 焊料互连的电迁移/热迁移耦合失效<sup>[4]</sup>

## 2. 热迁移的理论

根据固态相变理论, 当压力恒定且存在温度梯

度(一端温度高, 另一端温度低), 一种同质的二元固溶体或合金经过退火处理后会转变为异相, 这种由温度梯度导致材料相变过程称为 Soret 效应. 金属材料的热迁移是 Soret 效应表现形式之一. 由于非同质合金的自由能比同质合金高, 热迁移引起一个能量传递过程, 使得一相从能量较低的状态转变为能量较高的状态, 这种相变不同于吉布斯自由能降低引起的相变.

在恒定压力和温度条件下, 一个热力学系统的吉布斯自由能始终处于最低状态, 并且该系统会向平衡状态移动. 热力学系统中焓和熵都是状态函数, 因此恒定压力和温度条件下系统的平衡状态是确定的. 然而, 当一个热力学系统处于不均匀的外部环境中(如存在温度差), 根据不可逆热力学理论, 非均匀系统无平衡状态且吉布斯自由能也无最小值. 若该系统与平衡态的偏差很小, 系统就会达到稳定状态, 此时非均匀系统产生的熵最小. 在此过程中, 如果两个绝热腔的温度不相同, 从高温腔( $T_1$ )传递到低温腔( $T_2$ )的热量为  $\delta Q$ , 那么该非均匀系统中热传导产生的净熵  $dS_n$  可表示为

$$\begin{aligned} dS_n &= dS_1 + dS_2 \\ &= -\frac{\delta Q}{T_1} + \frac{\delta Q}{T_2} \\ &= \frac{\delta Q}{T_1 T_2} (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 式表明, 当一个非均匀系统外部存在温度差时, 该系统逐渐向一个高熵产生的、宏观上有序的状态发生转变, 即当一个非均匀系统产生的净熵最小时, 该系统处于稳定状态.

IC 微互连结构中常用的金属焊料是一种典型的二元合金, 所以在高温温度梯度的条件下会发生热迁移. 此外, 热迁移在纯金属中也会出现. 根据原子扩散理论, 在金属及合金的热迁移过程中, 高温区的电子具有较高散射能或界面反应能, 驱动金属原子沿着温度梯度降低的方向进行扩散运动, 产生金属原子的质量迁移. 化学势  $\mu$  驱动的原子流通量为

$$\begin{aligned} J &= CMF \\ &= C \frac{D}{k_B T} \left( -\frac{\partial \mu}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $C$  为浓度系数,  $M$  为漂移速率,  $F$  为驱动力,  $D$  为扩散系数,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $x$  为位移. 当系统中存在温度梯度时,  $\mu$  是温度  $T$  和传递热  $Q^*$  的函数<sup>[5]</sup>, 故热迁移原子流通量  $J_m$  可表示为

$$J_{\text{tm}} = CMF_{\text{tm}}$$

$$= C \frac{D}{k_{\text{B}} T} \frac{Q^*}{T} \left( - \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (3)$$

比较(2)和(3)式可知,  $Q^*$  与  $\mu$  具有相同的量纲,  $Q^*$  定义为每摩尔原子运动时的能量(焓)与初始状态时能量之差. 原子从热端运动到冷端是一个放热过程,  $Q^*$  为负值; 原子从冷端运动到热端是一个吸热过程,  $Q^*$  为正值. 由(3)式可知, 热迁移驱动力  $F_{\text{tm}}$  可表示为

$$F_{\text{tm}} = - \frac{Q^*}{T} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$= - \frac{Q^*}{T} G, \quad (4)$$

其中  $G$  为温度梯度. (4)式表明,  $F_{\text{tm}}$  除了与  $G$  有关外, 还与  $Q^*$  密切相关. 在一定时间内, 热迁移产生的  $J_{\text{tm}}$  必然引起物质体积的变化, 因此  $J_{\text{tm}}$  还可以表示为<sup>[6]</sup>

$$J_{\text{tm}} = \frac{V_{\text{tm}}}{\Omega(At)}$$

$$= \frac{A\Delta x}{\Omega(At)}$$

$$= \frac{\Delta x}{\Omega t}, \quad (5)$$

其中  $V_{\text{tm}}$  为迁移原子流的体积,  $A$  为迁移原子流的横截面积,  $\Omega$  为原子体积,  $t$  为迁移时间,  $\Delta x$  为迁移距离. (5)式给出可以测量的实验物理量与  $J_{\text{tm}}$  的关系. 若在实验中测量出  $\Delta x$  和  $t$ , 可以根据(3)~(5)式计算出  $Q^*$  和  $F_{\text{tm}}$ , 推导出的计算公式如下:

$$Q^* = \frac{\Delta x}{\Omega t} \frac{k_{\text{B}} T^2}{CD} \left( - \frac{\partial x}{\partial T} \right), \quad (6)$$

$$F_{\text{tm}} = \frac{\Delta x}{\Omega t} \frac{k_{\text{B}} T}{CD}. \quad (7)$$

### 3. 热迁移的实验研究

热迁移的实验方案设计主要有三种结构, 如图3所示<sup>[5, 7, 8]</sup>.

文献[9]采用图3(a)所示的结构来研究金属In的热迁移. 不同厚度的In膜被沉积在同一块GaAs基板上, 表面包覆一层高热导率的树脂, 通过加热GaAs基板观察到In的热迁移. 该方法采用一端加热、一端空冷, 常用于研究纯金属材料的热迁移.

文献[7]在导电凸点1和凸点2的电迁移研究

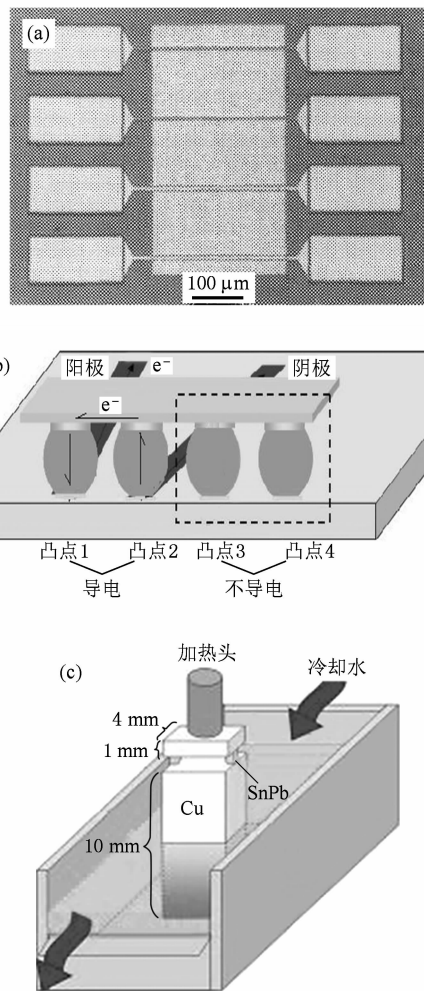


图3 热迁移实验的三种结构 (a)纯金属热迁移的实验结构<sup>[5]</sup>, (b)焊料互连电迁移/热迁移的实验结构<sup>[7]</sup>, (c)焊料互连热迁移的实验结构<sup>[8]</sup>

中观察到热迁移出现在不导电凸点3和凸点4的互连界面, 如图3(b)所示. 这是因为电流在导电凸点中产生大量焦耳热, 导致局部区域温度迅速上升, 形成高温梯度, 进而诱发热迁移. 因此, 运用导电凸点焦耳热效应来研究不导电凸点的热迁移, 是热迁移研究的一种新方法.

文献[8]指出, 焦耳热效应引起的温升不够稳定、凸点中温度梯度值不精确, 提出结构如图3(c)所示的热迁移实验方案. 该互连结构中研究对象被焊接在顶部的加热头和底部的Cu块之间, 试验时顶部加热, 底部浸泡在冷却水中. 由于高热导率的Cu块尺寸较大, 循环的冷却水可以迅速带走热量起到强制散热的作用, 因此保证热端和冷端间温度差恒定并提高热迁移的温度梯度. 该方案最大特点是采用冷却水来增加热传导速率, 通过计算热传导速

率来设定加热头温度,使凸点中温度梯度高于热迁移温度梯度的阈值,从而实现无电迁移干扰的金属原子热迁移.这表明热迁移是深入研究电迁移之后从中发现的一个新问题.

在 IC 微互连结构的热迁移研究中,图 3(a)所示的结构主要用于引线互连,图 3(b)所示的结构可用于引线和焊料两种微互连,图 3(c)所示的结构主要用于焊料互连.

#### 4. 单纯温度场作用下的热迁移

1975 年,文献[9]首次报道了金属的热迁移.在 322—202 °C 范围内,晶界处 Pb 原子流比晶格内 Pb 原子流对温度梯度更为敏感,由此观测到 Pb 原子的热迁移.随后,单纯温度场条件下 Al, Ag, V, Ce 等金属的热迁移以及 Cu 在 Al/Cu 合金的热迁移也陆续得到报道<sup>[10-12]</sup>.

焊料互连的热迁移最早见于 GaAs/AlGaAs 激光器可靠性的相关研究<sup>[5]</sup>.当热沉和激光器之间存在高温梯度( $G \approx 1000$  K/cm)时,两者之间用于互连的 In 膜发生热迁移,2600 h 后在 In 膜的热端生成空洞(冷端温度为 60 °C).后续的研究表明<sup>[13]</sup>,由于 In 的热膨胀系数高于 GaAs 和 Mo,因此激光器正常工作时,热源与散热片之间形成的较高温度梯度会产生较大应力梯度.应力梯度与晶格空位相互作用,驱动晶格上原子从热端向冷端迁移而产生热端空洞.

文献[14]根据热力学理论推导出发生热迁移的温度梯度阈值  $G_{th}$ ,即

$$\begin{aligned} G_{th} &= \frac{\partial T}{\partial x} \\ &= \frac{\Delta T}{x} \\ &= \frac{k_B \varepsilon T^4}{\kappa_{Si}}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\varepsilon$  为材料冷端的表面黑体辐射率,  $\kappa_{Si}$  为 Si 的热导率,  $\Delta T$  为热端与冷端的温度差. (8) 式表明,热迁移的  $G_{th}$  变化范围很大,  $G_{th}$  主要与  $T^4$  和  $\kappa_{Si}$  相关,其次与  $\varepsilon$  相关.

#### 5. 电场和温度场耦合作用下的热迁移

正常工作时 IC 处于浓度场、电场、应力场和温度场等多场耦合的环境中.在低电流和低温度的条

件下,相比于浓度迁移力  $F_{cm}$ 、电迁移力  $F_{em}$  和应力迁移力  $F_{sm}$ ,热迁移力  $F_{tm}$  对原子流的驱动作用可以忽略不计.但是对于功率器件,高电流密度产生了很高的功率消耗,焦耳热效应导致微互连结构的局部区域温升,形成高温梯度,因此高电流密度不但引起电迁移,而且诱发热迁移.根据唯象理论,多场耦合作用下迁移原子流的总通量  $J_{tot}$  为多个子项的原子流通量之和<sup>[15]</sup>,即

$$\begin{aligned} J_{tot} &= J_{cm} + J_{em} + J_{sm} + J_{tm} \\ &= -\frac{CD}{k_B T} \left[ k_B T \frac{\partial \ln C}{\partial x} - Z^* e \rho j \right. \\ &\quad \left. + f \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{Q^*}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $J_{cm}$  为浓度迁移原子流通量,  $J_{em}$  为电迁移原子流通量,  $J_{sm}$  为应力迁移原子流通量,  $Z^* e$  为有效电荷,  $\rho$  为电阻率,  $j$  为电流密度,  $f$  为空位松弛率,  $\sigma$  为静水压应力.

相应地,多场耦合作用下原子迁移的总驱动力  $F_{tot}$  可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} F_{tot} &= F_{cm} + F_{em} + F_{sm} + F_{tm} \\ &= -k_B T \frac{\partial \ln C}{\partial x} + Z^* e \rho j \\ &\quad - f \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \frac{Q^*}{T} \frac{\partial T}{\partial x}. \end{aligned} \quad (10)$$

##### 5.1. 引线互连的热迁移

20 世纪 70 年代,在纯金属的电迁移研究中发现热迁移<sup>[16, 17]</sup>,如 Co 和 Au 的热迁移.近年来,在功率 IC 的电迁移研究中也观察到 Al 合金引线的热迁移<sup>[18]</sup>.其原因在于引线几何形状导致局部区域出现电流聚集效应和焦耳热效应,电流聚集效应诱发电迁移,焦耳热效应在散热较差条件下诱发热迁移.

二维薄膜引线的质量输运模型指出<sup>[19, 20]</sup>,电迁移和热迁移是线性非稳态质量迁移的主要驱动力,在初始阶段热迁移的作用更为显著.文献[21]对电场和温度场的耦合作用进行了数值模拟,结果表明 Al 引线中热迁移并不显著,原子迁移的驱动力主要来自于  $F_{em}$ ,微互连失效是以电迁移为主导的电迁移/热迁移耦合失效.而 Cu 引线中原子迁移的早期驱动力主要来自于  $F_{tm}$ ,  $F_{em}$  则是后阶段的驱动力,即引线中早期生成的空洞主要由热迁移产生,并且在空洞生长一段时间后电迁移才起作用,最终导致微

互连发生耦合失效.

因此,在一定条件下热迁移与电迁移伴随发生,电迁移/热迁移耦合失效常存在于微互连引线中电流密度和温度梯度都最高的区域.在不同材料的引线中,热迁移和电迁移对微互连失效模型的作用不相同.

### 5.2. 焊料互连的热迁移

目前,IC 焊料互连的热迁移研究逐渐展开.焊料互连的材料分为含铅焊料和无铅焊料,两者的熔点差别较大,故发生热迁移的条件也不相同.

#### 5.2.1. 含铅焊料的热迁移

文献[6, 22, 23]的研究指出,高电流密度产生的焦耳热会在 Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub>互连焊料中诱发热迁移,进而影响电迁移数学模型的正确性.互连焊料凸点经历了电迁移和热迁移,其中热迁移更为显著.高温梯度推动 Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub>焊料的 Pb 原子从热端向冷端迁移,当热迁移与电迁移的方向相同,空洞的形成和长大将加速;当热迁移与电迁移的方向相反,空洞的形成和长大则受到抑制.

数值模拟表明<sup>[24, 25]</sup>,IC 内部的 Al 引线比基板的 Cu 导线更薄、更窄,这会导致 IC/焊料界面的接触电阻高于焊料/基板的接触电阻,高密度电流流经焊料凸点时产生大量焦耳热.当基板为环境温度(23 ℃)时,IC/焊料界面的温度为 150 ℃,高出焊料/基板界面 15 ℃.由于焊料凸点的高度为 100 μm,计算得到  $G = 1500 \text{ K/cm}$ ,远高于文献[26]的热迁移温度梯度阈值( $G_{th} = 1200 \text{ K/cm}$ ).由此可见,微互连结构中发生的电迁移/热迁移耦合失效归因于高电流密度产生的焦耳热和散热不畅形成的高温梯度.

图 4 是利用红外热成像仪拍摄的 Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub>焊料在实验前后的温度分布,图 5 是相同实验条件下焊料凸点的微观形貌<sup>[27]</sup>.从图 4(a)和图 5(a)可知,在 100 ℃的环境温度下焊料内部的温度和成分都均匀分布.当 IC 处于工作状态时,焊料凸点的温度上升( $T \approx 155.6 \text{ ℃}$ ),IC/焊料界面的温度(热端)比焊料/基板界面的温度(冷端)高出 16 ℃(图 4(b)).焊料凸点高度为 70 μm,计算得出  $G = 2143 \text{ K/cm}$ ,方向由基板指向 IC.图 5(b)中 Pb 原子从热端向冷端迁移,方向由 IC 指向基板.类似的热迁移出现在高度为 100 μm 的焊料凸点中( $\Delta T = 10 \text{ ℃}$ )<sup>[7]</sup>.

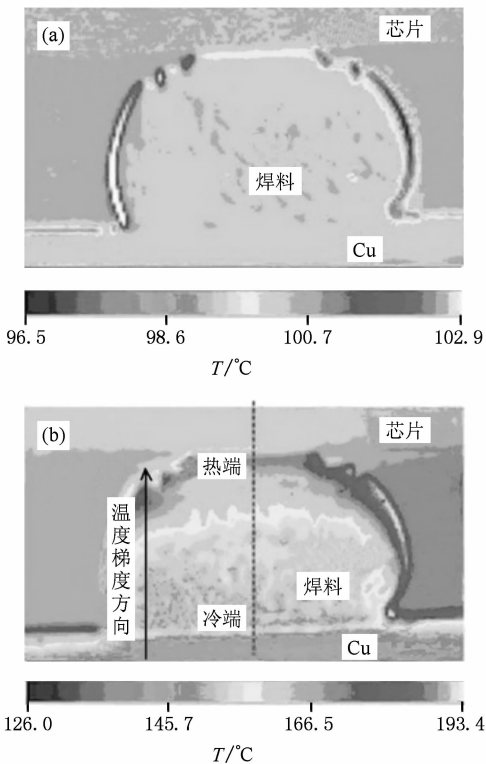


图 4 热迁移前后焊料内部的温度分布<sup>[27]</sup> (a)热迁移前, (b)热迁移后

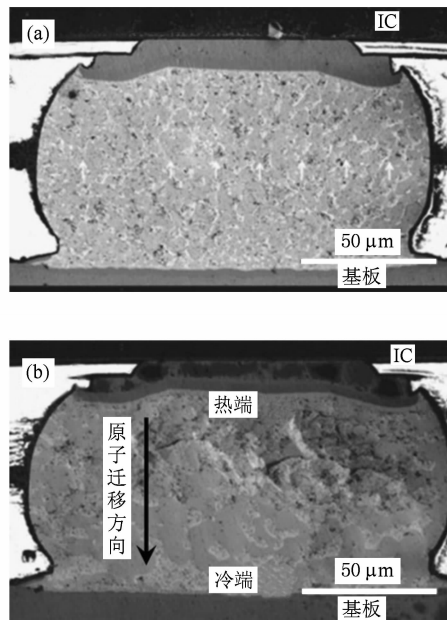


图 5 热迁移前后焊料内部微观形貌<sup>[27]</sup> (a)热迁移前, (b)热迁移后

文献[28]指出,Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub>焊料凸点的热迁移存在一个临界电流密度( $j_{th} = 1.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ),当  $j$  的

值超过  $j_{th}$  值的 5% 时, 焊料凸点很快熔化; 当  $j < 1.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  时, 焊料凸点以电迁移为主. 然而, 在  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $j = 2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  条件下,  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  焊料凸点的失效时间呈现出双斜率特征<sup>[29]</sup>. 这是因为高密度电流增加焊料凸点中 Pb 晶粒内能, 使得 Pb 晶粒长大, 进而粗化. 同时, 焦耳热引起的热迁移迫使 Pb 原子迁移, 加速 Pb 晶粒长大. 一旦在焊料凸点的电流路径上分布着 2—3 个粗化的 Pb 晶粒, 晶界就会贯穿整个焊料凸点并成为原子晶界扩散的路径. 晶界扩散速率约为晶格扩散速率的  $10^6$  倍, 空洞在粗大的 Pb 晶粒界面迅速产生并扩展, 最后形成贯穿整个焊料凸点的裂纹, 导致发生不可逆转的失效.

文献[10, 27, 28] 计算得出  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  焊料的  $Q^*$  值分别为 22.16, 26.8, 25.3 kJ/mol. 文献[30] 计算得出  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  焊料的  $G = 1000 \text{ K/cm}$ ,  $F_{im} = 1.6 \times 10^{-17} \text{ N}$ . 在文献[30] 的实验中,  $F_{im}$  与  $F_{em}$  达到同一个数量级, 所以在高电流密度条件下  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  焊料的热迁移不能忽略.

### 5.2.2. 无铅焊料的热迁移

2006 年 7 月以来, 随着欧盟对含铅电子电气产品的强制性和限制性销售, 无铅焊料以其无生物毒性及环境友好的特点, 逐渐在电子产品中取代含铅焊料并得到广泛应用. 热迁移也成为无铅焊料相关研究的一个热点方向.

文献[31] 研究了  $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$  焊料在  $j = 9.7 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ ,  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下的热迁移, 当  $G > 400 \text{ K/cm}$  时,  $F_{im} > F_{em}$ . 随后文献[32] 指出, 在  $0.57 \text{ A}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,  $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$  焊料中 Sn 原子由冷端向热端迁移, 此时  $G = 2829 \text{ K/cm}$ ,  $J_{im} = 5.0 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ ,  $Q^* = 1.36 \text{ kJ/mol}$ .

文献[33] 采用非线性运动学和各向同性硬化黏塑性模型及晶粒粗化模型, 揭示了  $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$  焊料的热迁移过程. 在热迁移中, 晶粒粗化扮演了重要的角色. 首先, 晶粒尺寸与质量扩散速率密切相关, 晶粒越小, 扩散越快. 其原因在于小尺寸晶粒有更高的晶界表面能. 其次, 焊料的蠕变速率高度依赖晶粒尺寸. 再次, 焊料高度满足 Hall-Petch 关系, 即焊料的强度退化与晶粒生长相关. 热迁移中焊料硬度退化不仅受到晶粒粗化导致的软化影响, 而且受

到黏塑性和微结构演化的影响. 一旦热迁移产生的应力超过材料的屈服极限, 将会极大降低互连焊料的强度.

当  $G = 1000 \text{ K/cm}$  时, 热迁移促使 Sn 晶粒的粗化在  $\text{Sn}_{96}\text{Ag}_{3.5}\text{Cu}_{0.5}$  焊料中更剧烈, 焊料中  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  相的演化并不显著, 但是出现了  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  相的分解, 冷端焊盘中 Cu 的浓度高于热端焊盘中 Cu 的浓度<sup>[34]</sup>. 文献[35] 计算得到  $\text{Sn}_{42}\text{Bi}_{58}$  焊料在  $j = 5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ ,  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下  $G = 527 \text{ K/cm}$ , 并指出  $\text{Sn}_{42}\text{Bi}_{58}$  与  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  焊料的热迁移类似, 当热迁移与电迁移同向则促进界面反应, 反之则抑制界面反应.

文献[36] 指出, 在高电流密度条件下, 一块  $10 \text{ W}$  且有 100 个凸点的 IC 温度比与之互连的基板温度高出约 12 K. 若互连焊料的高度为  $70 \text{ } \mu\text{m}$ , 则焊料内  $G \approx 1700 \text{ K/cm}$ . 这么高的温度梯度必定会在互连焊料中产生热迁移.

在低电流密度、强制对流散热条件下  $\text{Sn}_{99.3}\text{Cu}_{0.7}$  焊料的热迁移力 ( $F_{im} = 0.194 \times 10^{-17} \text{ N}$ ) 比其电迁移力 ( $F_{em} = 11.2 \times 10^{-17} \text{ N}$ ) 小两个数量级<sup>[37]</sup>. 这是因为低电流密度产生的焦耳热较小, 此外良好的散热环境显著地降低焦耳热效应引起的局部温升, 从而抑制了热迁移<sup>[38-40]</sup>.

## 6. 研究展望

在 IC 微互连结构可靠性研究中, 热迁移往往与电迁移相伴. 随着相关研究的深入, 热迁移从电迁移中独立出来, 成为 IC 微互连结构可靠性研究的一个新方向.

目前, IC 微互连结构的热迁移研究主要集中在内互连的 Al 引线、Cu 引线以及外互连的 Sn 基合金焊料, 仍有许多问题亟待深入研究. 需要进一步开展的研究工作主要有以下方面: 排除电迁移干扰、独立地研究热迁移, 原子迁移的热力学及热动力学规律, Cu 引线和无铅焊料热迁移的失效机理, 计算 Cu 引线和无铅焊料的  $Q^*$ ,  $G_{th}$  和  $F_{im}$ , 微互连结构的几何尺寸对热迁移的影响, 建立浓度场、电场、应力场、温度场等多场耦合作用下 IC 微互连结构的原子迁移模型等.

- [1] Pecht M, Chan Y C 2004 *China's Electronics Industry* (College Park: Calce Epsc Press) p18
- [2] Tu K N, Gusak A M, Li M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 1335
- [3] Lee T Y, Tu K N 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 3189
- [4] Wu Y P, Zhang J S, Wu F S, An B 2006 *J. Semicond.* **27** 1136 (in Chinese) [吴懿平、张金松、吴丰顺、安兵 2006 半导体学报 **27** 1136]
- [5] Van Gorp G J, De Waard P J, Du Chatenier F J 1984 *Appl. Phys. Lett.* **45** 1054
- [6] Ye H, Basaran C, Hopkins D C, Frear D, Lin J K 2004 *54th Electronic Components and Technology Conference* (Las Vegas: IEEE) p988
- [7] Huang A T, Gusak A M, Tu K N, Lai Y S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 141911
- [8] Chuang Y C, Liu C Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 174105
- [9] Johns R A, Blackburn D A 1975 *Thin Solid Films* **25** 291
- [10] Morozumi S, Goto S, Yoshida T 1976 *Scripta Mater.* **10** 537
- [11] Fee D C, Johnson C E 1981 *J. Nucl. Mater.* **96** 71
- [12] McKee R A, Stark J P 1975 *Acta Mater.* **23** 1145
- [13] Van Gorp G J, De Waard P J, Du Chatenier F J 1985 *J. Appl. Phys.* **58** 728
- [14] Morillon B, Dilhac J M, Auriel G, Ganibal C, Anceau C 2002 *32nd European Solid-State Device Research Conference* (Firenze: IEEE) p327
- [15] De Munari I, Speroni F, Reverberi M, Neva C, Lonzi L, Fantini F 1996 *Microelectron. Reliab.* **36** 1875
- [16] Van Gorp G J 1976 *Thin Solid Films* **38** 295
- [17] Oldham D J, Bleay J A, Blackburn D A 1977 *Acta Mater.* **25** 1345
- [18] Nguyen H V, Salm C, Krabbenbrg B, Weide-Zaage K, Bisschopb J, Mouthma A J, Kuper F G 2004 *42nd Annual International Reliability Physics Symposium* (Phoenix: IEEE) p619
- [19] Ru C Q 1999 *Acta Mater.* **47** 3571
- [20] Ru C Q 2000 *J. Mater. Sci.* **35** 5575
- [21] Tan C M, Zhang G, Gan Z H 2004 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **4** 450
- [22] Basaran C, Ye H, Hopkins D C, Frear D, Lin J K 2005 *Adv. Packaging* **10** 14
- [23] Basaran C, Ye H, Hopkins D C, Frear D, Lin J K 2005 *J. Electron. Packaging* **127** 157
- [24] Ye H, Basaran C, Hopkins D C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1045
- [25] Ye H, Basaran C, Hopkins D C 2003 *Int. J. Solids Struct.* **40** 7269
- [26] Roush W, Jaspal J 1982 *32nd Electronic Components Conference* (San Diego: IEEE) p342
- [27] Hsiao H Y, Chen C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 152105
- [28] Ouyang F Y, Tu K N, Lai Y S, Gusak M A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 221906
- [29] Rinne G A 2003 *28th Electronic Manufacturing Technology Symposium* (San Jose: IEEE) p177
- [30] Yang D, Wu B Y, Chan Y C, Tu K N 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 043502
- [31] Chen H Y, Chen C, Tu K N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 122103
- [32] Hsiao H Y, Chen C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 092107
- [33] Basaran C, Li S D, Abdulhamid M F 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123520
- [34] Abdulhamid M F, Basaran C 2009 *J. Electron. Packaging* **131** 011002
- [35] Gu X, Chan Y C 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 093537
- [36] Rinne G A 2003 *Microelectron. Reliab.* **43** 1975
- [37] Zhang J S 2008 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [张金松 2008 博士学位论文 (武汉:华中科技大学)]
- [38] Zhang J S, Chan Y C, Wu Y P, Xi H J, Wu F S, Wu B Y 2008 *J. Alloys Compd.* **458** 492
- [39] Zhang J S, Xi H J, Wu Y P, Wu F S 2008 *J. Semicond.* **29** 174 (in Chinese) [张金松、奚弘甲、吴懿平、吴丰顺 2008 半导体学报 **29** 174]
- [40] Zhang J S, Xi H J, Wu Y P, Wu F S 2009 *J. Electron. Mater.* **38** 678

# Thermomigration in micro interconnects in integrated circuits \*

Zhang Jin-Song<sup>1)</sup> Wu Yi-Ping<sup>2)†</sup> Wang Yong-Guo<sup>1)</sup> Tao Yuan<sup>2)</sup>

1) (*School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

2) (*School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 8 July 2009; revised manuscript received 20 November 2009)

## Abstract

With the reduction of feature size of integrated circuits, higher current density has been introduced in electronic devices which produces a significant Joule heating effect. This also brings about an increase of the temperature which induces a very high temperature gradient in some local regions of micro interconnects. As a result, thermomigration will occur and metal atoms will move opposite to the direction of the temperature gradient. Thermomigration is one of common modes in reliability failures in electronic devices. This paper reviews and analyzes the previous researches on the thermomigration theory and experiment in stripe and solder interconnects under the temperature loading and the current/temperature loading. The challenges of thermomigration are discussed for interconnects in electronic devices in the future.

**Keywords:** integrated circuit, micro interconnect, thermomigration

**PACC:** 6610C, 6630L, 8160B

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876070) and the Innovative Foundation of Shanghai University, China (Grant No. A10-0109-08-004).

† Corresponding author. E-mail: ypwu@hust.edu.cn