

# 电子封装微互连中的电迁移

尹立孟, 张新平

(华南理工大学机械工程学院, 广东广州 510640)

**摘 要:** 随着电子产品不断向微型化和多功能化发展, 电子封装微互连中的电迁移问题日益突出, 已成为影响产品可靠性和耐久性的重要因素. 本文在回顾铝、铜及其合金互连引线中电迁移问题的基础上, 对目前微电子封装领域广泛采用的倒装芯片互连焊点结构中电迁移问题的几个方面进行了阐述和评价, 其中包括电流拥挤效应、焦耳热效应、极化效应、金属间化合物、多种负载交替或耦合作用下的电迁移以及电迁移寿命预测等.

**关键词:** 电子封装; 微互连; 焊点; 可靠性; 电迁移

**中图分类号:** TN305.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 08 1610-05

## Electromigration in Micro-Interconnections of Electronic Packaging

YIN Li meng, ZHANG Xin ping

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

**Abstract:** Along with the increasing miniaturization and multi functionality of electronic products, the electromigration of micro interconnections has become a severe and urgent issue, and turned to be an important reliability and durability concern. This paper presents a brief overview on the electromigration problem in aluminum and copper alloy interconnections, and then delivers a review on the electromigration issues in flip chip solder connection which is currently employed widely in micro electronic packaging technology. These issues include current crowding effect, joule heating effect, polarity effect, intermetallic compound, electromigration under multi loads and lifetime of electromigration.

**Key words:** electronic packaging; micro interconnection; solder joint; reliability; electromigration

### 1 引言

随着电子、计算机和通讯技术的迅猛发展, 电子产品的性能日益先进、尺寸微型化、结构复杂、使用环境也更严格和多变. 尤其是随着便携式先进电子产品(如手机、笔记本电脑、MP3 和 PDA 等)及运载工具或机载电子产品的日益增多, 它们经常会遇到不慎跌落(冲击)、剧烈振动、外力扭曲以及严酷环境(如外层空间强辐射、极地和酷热环境等)下使用等情况, 这对电子元器件封装的可靠性和耐久性等提出了更大的挑战<sup>[1-3]</sup>.

在对电子封装软钎焊后的元器件和系统结构进行可靠性和耐久性评价以及寿命预测时, 需要考虑的因素很多, 如封装钎料的可焊性、强度、抗氧化性、抗冲击性能、蠕变及应力松弛特性、腐蚀特性、疲劳特性等. 近年来, 随着对可靠性研究的不断深入, 又发现了一些造成电子产品失效的新问题, 其中电迁移(Electromigration, EM)问题是一个关注的焦点. 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(Hillock)和空洞(Void)等材料结构缺陷这一现象<sup>[3]</sup>, 它是近年来随着电子互连焊点极小化以及器件微型化和精密化而出现的一个重要

问题, 是影响电子封装互连结构可靠性的严重问题<sup>[4]</sup>, 已引起业内科研人员和工程师们的广泛关注. 研究电迁移问题的物理力学机制以及表征由电迁移而引起的互连失效行为能够为焊点合金和无铅钎料设计、倒装芯片凸点设计、互连可靠性评价和寿命预测等提供有效的理论指导. 然而, 目前对电迁移问题的理解还远远不够, 相关的研究还很缺乏.

在过去的几十年里, 微电子工业中广泛采用铝作为芯片引线和导体. 然而, 近年来铜作为一种更好的导体可望取代铝作为芯片引线和导体. 由于铜的电迁移机制与铝不同, 有必要在铝导线电迁移基础上对比分析铜导线或薄膜中的电迁移问题. 此外, 随着电子产品的持续微型化而来的是输入-输出(I/O)端口数量日益增加; 在众多电子封装技术中, 迅速发展的倒装芯片(Flip chip)工艺作为新一代封装技术则刚好可以满足越来越多的 I/O 互连的封装要求, 因而广泛地用于微处理器、无线电子消费产品等电子封装中; 伴随而来是, 倒装芯片微互连焊点中的电迁移问题则成为微电子器件可靠性和耐久性的关注焦点之一.

本文首先对铝、铜及其合金互连引线中电迁移问题进行了回顾和评价, 并在此基础上重点对目前微电子封

装领域广泛采用的倒装芯片互连结构中的电迁移问题进行了阐述,其中包括电流拥挤效应、焦耳热效应、极化效应、金属间化合物、多种负载交替或耦合作用下的电迁移以及电迁移寿命预测等。

## 2 铝互连引线中的电迁移

铝作为微电子工业中最早使用的互连引线金属,已有 40 多年的历史,其主要具有以下优点<sup>[4,5]</sup>:(1)良好的刻蚀工艺,能与 Si 形成低电阻的欧姆接触,并且与  $\text{SiO}_2$  表面有良好的附着性;(2)可通过电子束蒸发沉积或溅射沉积,还可以采用干法制模或反应离子刻蚀,并且比较容易沉积和制模;(3)铝对于 Si 而言“无毒”,因此可以作为接触金属薄膜直接在硅器件上沉积;(4)可以形成肖特基势垒(Schottky barriers);(5)与其它金属相比,铝具有相对较低的电阻率。

早在 20 世纪 60 年代即发现铝导线中存在电迁移破坏,并且很快认识到这种破坏是由于晶界扩散所致<sup>[4]</sup>。同时,一系列的研究表明<sup>[6]</sup>,单晶的电迁移是通过晶格扩散完成,而多晶则为晶界电迁移方式,并且单晶导线相对于多晶导线而言性质更加均匀,所以在相同条件下,单晶铝导线的寿命高于多晶铝导线。研究还表明<sup>[6]</sup>,铝的体迁移效应在  $400^\circ\text{C}$  以上时才明显,而电子元器件的使用温度一般低于  $200^\circ\text{C}$ ,所以多晶导线中的电迁移主要在大量晶界构成的迁移速度较快的通道上进行。研究表明,铝由于熔点较低和扩散系数较高,所以抗电迁移较差。随着集成电路密度不断提高,集成电路中的金属铝薄膜将越来越细,所承受的电流密度也越来越大。仅以金属薄膜的宽度为  $0.5\mu\text{m}$ ,厚度为  $0.2\mu\text{m}$ ,施加电流为  $1\text{mA}$  为例,电流密度可达  $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ ;在元器件通常的工作温度( $100^\circ\text{C}$ 左右)下,如此大的电流密度将会引起严重的电迁移可靠性问题。因此,采用单质铝导线已经不能满足高电流密度的要求。很多研究表明<sup>[4,7-8]</sup>,在铝中添加少量的铜、镁、硅、钛等溶质元素后,其引线的抗电迁移性能得到很大改善。特别是从 20 世纪 70 年代开始,就广泛认识到在铝薄膜中添加 2~3% 的铜可以抑制铝迁移原子的扩散性,同时形成的  $\text{Cu}_3\text{Al}$  沉淀相可以有效地减少电迁移。

除了溶质元素的影响外,引线合金的微结构也会改变其抗电迁移性能。上世纪 90 年代出现的超大规模集成电路,铝导线的宽度已由微米降至亚微米级,微米和亚微米薄膜导线的应用使竹节结构导线的电迁移失效成为新的研究焦点。研究指出<sup>[4,6]</sup>,金属薄膜导线由于电迁移形成的空洞和丘凸往往在三晶交叉处形成并长大。因此,把铝导线加工成具有竹节(或类竹节)而没有三晶交叉点的微结构,或者采用铝与一层或几层难熔金属(如钨等)形成多层结构,可以提高抗电迁移性。

## 3 铜互连引线中的电迁移

集成电路中应用铝铜合金作互连引线材料。由于铝铜合金具有高的阻容迟滞且容易产生电迁移失效,所以在特大规模集成电路中,铜取代铝铜合金成为一种更好的选择。与传统铝及其合金相比,铜薄膜导线具有以下一些优点:(1)高熔点( $1083^\circ\text{C}$ ),远高于铝及其合金,因此在同样的工作温度下,铜原子的扩散速度更慢;(2)电阻更低、阻容迟滞更小、电路信号传递速度更快;(3)更高的力学强度;(4)抗电迁移能力更强、可靠性更高。

铝基和铜基合金的加工工艺明显不同,铝工艺通常是首先将铝沉积成金属薄膜,蚀刻后再沉积上绝缘电介质;而铜工艺则是采用嵌入式工艺得到图形化的导线;上下层铜导线之间通过微通孔连接,为了得到这些微通孔,还需要另外一层光刻和蚀刻步骤,因此又称为双嵌入式工艺。由于加工方法的不同,铝基合金和铜基合金电迁移失效的机制也不相同,铝基合金主要是通过晶界扩散完成,铜基合金则主要是表面扩散<sup>[4,9]</sup>。由于受表面扩散控制,铜基合金中晶体微结构对电迁移的影响不大。也有研究表明<sup>[9]</sup>,与铝引线不同,改变铜互连引线的宽度而维持电流密度和工作温度不变时,铜引线的电迁移寿命没有明显改变。另外,由于表面扩散起主要作用,所以铜及其合金中最容易发生电迁移的地方是铜引线上部与  $\text{SiC}$  等电介质层相交接的地方。

解决铜及其合金中表面扩散引起电迁移的途径有:

(1)添加合金元素:在铜中添加适量的铝、铬、镁、钽、锡和锆等合金元素也可以提高电迁移寿命<sup>[4,9]</sup>;(2)采用金属帽(Metal cap);研究表明<sup>[9]</sup>,铜及其合金薄膜互连引线表面(特别是上表面)是扩散最快的路径,可以通过改善这个界面来提高抗电迁移性能。较早时采用难熔材料  $\text{SiN}$  和  $\text{SiC}$  等作为介质盖材料(Dielectric cap material),最近则在铜表面选择性地沉积上一层钴钨磷化物( $\text{CoWP}$ )、钴钨硼化物( $\text{CoWB}$ )或钽等,以取代传统的  $\text{SiC}$ 、 $\text{SiN}$  覆盖层,使铜原子迁移受到限制,进而提高抗电迁移性能;(3)对铜或铜合金表面进行热处理,改善铜与  $\text{SiC}$  之间的附着性,进而增强抗电迁移性能<sup>[4,9]</sup>。

## 4 倒装芯片互连焊点中的电迁移

在过去一段时间内,国内外对电迁移的研究主要集中于铝和铜互连引线的电迁移方面,而针对倒装芯片互连焊点的研究则较少,形成这一状况的主要原因是焊点的尺寸相对较大而电流密度相对较小<sup>[10]</sup>,所以从表面上看,电迁移问题不严重。然而,由于电子封装元器件不断向高集成度、高性能和便携式方向发展,焊点/凸点直径持续减小,每个凸点承载的电流不断增加,所以电迁移已经成为精细间距封装中一个关键的问题,也是制约高密度互连(HDI)封装技术发展的重要因素之一。

迄今为止,对凸点中电迁移问题的研究时间并不长,Brandenburg 等 1998 年在倒装芯片互连凸点中也发现了电迁移现象,仅仅一年之后,国际半导体技术发展蓝图(ITRS)把电迁移列为电子封装可靠性问题<sup>[11]</sup>。

相对于金属互连引线而言,倒装芯片互连焊点的电迁移有诸多不同之处<sup>[14]</sup>:(1)倒装芯片焊点中的扩散主要是晶格扩散,而互连引线中的扩散主要是晶界扩散(如铝导线)或表面扩散(如铜导线);(2)虽然倒装芯片焊点中的电流密度( $10^4\text{A}/\text{cm}^2$ )比互连引线中的电流密度低,但由于其熔点相对引线而言低得多,所以即使在一般工作温度下,钎料中的原子扩散率仍然很高,同样也会导致严重的电迁移问题;(3)倒装芯片焊点和互连引线的几何尺寸结构和形状明显不同;(4)倒装芯片焊点和互连引线的成分不同,焊点一般由两种或两种以上元素的合金钎料组成,而互连引线主要只有一种主体元素(铝或铜),其中含有微量的合金元素,因此互连引线只要考虑一种元素对电迁移的影响,而对于倒装芯片互连钎料的电迁移则要考虑每种主要元素对电迁移的影响;(5)由于倒装芯片焊点是从导线到凸点的突变结构,当电流从导线进入凸点或者从凸点进入导线时,电流密度都会发生很大改变,所以在导线和凸点的接触处很容易产生电流拥挤效应(Current crowding effect);(6)由于大部分钎料是共晶合金,钎料中的化学势梯度和其成分无关,因此由电迁移引起的很大程度上的成分再分布不会产生与电迁移相反的作用力;(7)钎料焊点在电迁移过程中会产生极化效应(Polarity effect)。下面分别就焊点/凸点中电迁移的几个重要问题予以阐述和分析。

#### 4.1 电流拥挤和焦耳热效应

一般凸点中的平均电流密度为  $10^4\text{A}/\text{cm}^2$ ,接触点的电流密度比凸点中的平均电流密度要大 1~2 个数量级,即电流拥挤区域的电流密度可达  $10^5\text{A}/\text{cm}^2$  甚至更高。电流拥挤效应对电迁移失效的影响非常大。一些研究表明<sup>[12]</sup>,在互连凸点中的空洞形成以前存在一段较长时间的孕育期,空洞首先在电流拥挤区域形成并随后迅速长大,最后导致凸点失效。同时,焦耳热效应会在焊点(凸点)中产生热点(hot spot),有时甚至会使焊点产生部分熔化现象。另外,局部焦耳热会造成钎料凸点中存在很大的温度(热)梯度,从而引发热迁移,热迁移可能会进一步加速电迁移过程而降低凸点寿命。有研究指出<sup>[13,14]</sup>,当凸点中的温度梯度达到  $1000\sim 1500^\circ\text{C}/\text{cm}$  时,就足以引发热迁移。并且,当热迁移和电迁移方向一致时,就会加速电迁移过程;而两者方向相反时,热迁移就会对电迁移起抑制作用,减缓电迁移过程。

还有研究指出<sup>[11]</sup>,在有厚的凸点下金属化层(UBM)情况下,电流拥挤将在 UBM 中而不是钎料中出现;研究 UBM 厚度分别为  $2\mu\text{m}$  和  $10\mu\text{m}$  时发现,  $2\mu\text{m}$

UBM 时电流拥挤区域出现在钎料中,而  $10\mu\text{m}$  时出现在 UBM 中。因此有研究提出采用厚的 Cu 或 Ni( $> 10\mu\text{m}$ )作为 UBM<sup>[12]</sup>,使钎料凸点远离高电流密度或热点区域,这样可以减少电流拥挤和焦耳热效应;同时,采用以下其它几种方法也可以减少甚至消除凸点中的电流拥挤或焦耳热效应:(1)在 Al 线与 UBM 之间增加一层薄的电阻层,使电流均匀地从导线进入凸点中;并且当电阻层的电阻率超过  $30000\mu\Omega\text{cm}$  时就能基本消除电流拥挤效应。(2)减小钝化窗口(Passivation opening),但此方法在缓解电流拥挤的同时增加了焦耳热效应。(3)增大 Al 导线的截面积或采用电阻率只有 Al 导线 63% 的大马士革 Cu 来代替,可以有效减小焦耳热效应,但此方法并不能改善电流拥挤效应。

#### 4.2 极化效应及其对金属间化合物的影响

电迁移还有一个非常独特而重要的行为就是极化效应。电子封装中常采用贵金属或近贵金属作为 UBM,它们以间隙扩散方式快速扩散,而目前的钎料主要以 Sn 基为主,在室温下这些贵金属或近贵金属即可与 Sn 反应而在界面生成金属间化合物(IMC)。在电流作用下,焊点阴极处电子从 IMC 流向钎料,而阳极处电子流动方向则刚好相反,所以电迁移加速了阴极 IMC 的分解,贵金属或近贵金属在阴极迅速溶解后向阳极扩散而促进了阳极 IMC 的形成,这就是所谓的极化效应。

有研究表明<sup>[4]</sup>,极化效应的存在可使共晶 SnPb 钎料互连中的 Pb 和 Sn 产生重新分布,在  $150^\circ\text{C}$  温度下,阳极的最高 Pb 浓度达到了 95%;相对地,室温情况下阴极的最高 Sn 浓度达到了 92%。这表明,  $150^\circ\text{C}$  时 Pb 是主要的扩散元素,而室温下, Sn 则是主要的扩散元素。另外,有研究指出<sup>[11]</sup>,  $100^\circ\text{C}$  以下时,共晶 SnPb 钎料倒装芯片焊点中 Sn 的扩散速度比 Pb 快,但是在  $100^\circ\text{C}$  以上则刚好相反。但也有研究指出<sup>[16]</sup>,在  $100^\circ\text{C}$  时, Pb 也可以是 SnPb 钎料中主要的扩散元素。显然,上述研究结果还不太一致;因此,需要做更深入而系统的研究,以确定互连焊点电迁移过程中的主导扩散元素及其控制因素,以期从钎料设计和选择、互连凸点结构和材料匹配、封装工艺优化等方面入手,改善抗电迁移过性能。

实际上,除了钎焊工艺(如再流焊温度和钎料成分等)对 IMC 有很大的影响外,电迁移过程中的极化效应加剧了钎料焊点中 IMC 的形成倾向,而 IMC 的出现会造成焊点中钎料与 UBM 的剥离,导致焊点的失效。同时,在 IMC 长大的过程中,也伴随着柯肯达尔空洞的形成。这些空洞会进一步加速焊点电迁移失效,从而缩短焊点的使用寿命。目前,这方面的系统、深入的研究仍很缺乏。

#### 4.3 复杂服役状态下的电迁移问题

金属互连引线、薄膜和钎料焊点的电迁移失效问题其实并不是一个孤立的现象,在电迁移过程中可能同时

伴随着热迁移、应力迁移或化学迁移过程。因此,焊点的失效问题实际上是在多种负载耦合作用、复杂服役状态下的共同结果。

1856 年, Ludwig 第一次报导了在热梯度(温度梯度)驱动下的净原子流动,即热迁移(Thermomigration, TM)现象。后来发现,在高电流密度作用下的芯片内金属互连不仅存在电迁移,同时还存在热迁移<sup>[17]</sup>。

在倒装器件中,由于芯片和基板的热膨胀系数不同,在热循环过程中芯片角落的焊点会受到很大的剪应力。一般说来,在阴极,拉应力会促进电迁移而压应力阻止电迁移,阳极则刚好相反。因此,当电子流从压应力区域流进而从拉应力区流出条件下比较有利于改善电迁移,然而目前还没有试验证实这种效应<sup>[4]</sup>。如果这种电力载荷耦合效应真实存在的话,我们就可以利用它来设计封装电路。

另外,最近还有人研究了在稳定电压情况下,去除钎剂后焊点在蒸馏水下中电-化学迁移(Electrochemical migration);同时,对表面绝缘电阻(SIR)的进一步研究发现,钎剂对迁移行为有很大的影响,相同合金成分的钎料匹配不同的钎剂时焊点的失效时间不同<sup>[18]</sup>。还有研究采用表面绝缘电阻测试和水滴测试(Water drop test)两种方法来评估印刷电路测试板上钎料的电迁移<sup>[19]</sup>,结果显示钎料中少量的 Ag 不会增加钎料的电迁移;而水滴测试表明,Ag 的增加减少了连续水层中印刷电路板表面的电-化学迁移。

需要指出的是,目前对封装互连和焊点广义电迁移问题的研究基本上只是针对单一负载(如单纯的电流作用)或者是两种负载的耦合(如上述的电-热、电-力或电-化学)情况;实际上,愈来愈多的互连焊点是在多种负载叠加或耦合的条件下使用<sup>[3]</sup>。然而,目前有关这方面的研究却很少,尤其是缺乏无铅钎料焊点在耦合负载情况下抗电迁移性能与材料成分、凸点或互连形状和尺寸、焊点材料组织(包括晶粒尺寸和数目、晶粒边界效应等)等参数的定量相关性的研究,因而无法为无铅钎料设计或选择、凸点或互连优化设计、封装钎焊工艺优化、以及获得高可靠性的封装结构和系统等提供理论指导和基础技术支持。

#### 4.4 电迁移寿命

电子工业中常采用平均失效时间(MTTF)来预测电子器件的寿命。1969 年, Black 通过大量试验后,总结了下面的经验公式(即 Black 方程)来计算铝互连引线由于电迁移而导致的失效时间<sup>[4]</sup>:

$$\text{MTTF} = A \frac{1}{j^n} \exp\left[\frac{Q}{KT}\right] \quad (1)$$

其中,  $A$  为与导电材料有关的常数,  $j$  为电流密度,  $n$  为电流密度指数,  $Q$  为激活能,  $K$  为玻尔兹曼常数

( $8.616 \times 10^{-5} \text{ eV/k}$ ),  $T$  为平均绝对温度。

Black 方程最初是基于对铝导线中空洞沿整个导线形成率的预测,后来广泛用于估算铝、铜导线的电迁移寿命,并且常取电流密度指数  $n$  为 2。对于该方程应用于钎料焊点/凸点时,  $n$  的取值究竟是 1、2 或是更大值尚存在很大的争议;特别是考虑焦耳热效应时,应用 Black 方程( $n$  取 2)计算得到的失效时间与试验测量值差别较大(一般测量值偏小)。有研究指出<sup>[20]</sup>,考虑电流拥挤的影响,应该把 Black 方程中的  $j^{-n}$  项修订为  $(\dot{j})^{-n}$ ,同时考虑焦耳热效应的影响应该把温度  $T$  修订为  $(T + \Delta T)$ ,从而得到如下的修正 Black 方程:

$$\text{MTTF} = A \frac{1}{(\dot{j})^n} \exp\left[\frac{Q}{K(T + \Delta T)}\right] \quad (2)$$

其中  $c$  和  $\Delta T$  都是与所加的电流密度  $j$  有关的影响因子,无论是含铅钎料还是无铅钎料,  $c$  通常都取 10,  $\Delta T$  取  $40^\circ\text{C}$  (313K)。

还有研究者认为<sup>[12]</sup>,既然钎料焊点中由于焦耳热而存在热点,该热点应最先引发焊点失效,那么 MTTF 中的温度参数  $T$  采用热点的温度来计算则更为合适。有研究还给出了一些共晶钎料(如共晶 Sn-Pb 和 SnAgCu 等钎料)电迁移平均时效时间 MTTF 方程(即 Black 方程)的几个重要参数的数值<sup>[11,20]</sup>:常数  $A = 0.8$ , 电流密度指数  $n = 1.82$ , 扩散激活能  $Q = 0.5$  或  $0.8 \text{ eV/原子}$ (共晶 Sn-Pb 取 0.5, 共晶 SnAgCu 取 0.8),从而可以更加方便、快捷、有效地计算出这些常用钎料的 MTTF 理论值。此外,随着全球无铅化进程的加快,无铅钎料的电迁移寿命也成为关注的焦点;已有研究人员指出,电迁移测试中,凸点在电和热特征基本一致的条件下,无铅钎料凸点的电迁移寿命介于高 Pb 含量钎料(如 Sn95Pb 和 Sn90Pb 等)和共晶 Sn-Pb 钎料之间,潜在的原因可能是无铅钎料的熔点温度介于这两者之间;但是,相关的数据和系统研究仍然很缺乏。

#### 5 总结及展望

随着电子元器件继续朝高性能、高集成度和微型化方向发展,电子微互连和焊点中的电迁移问题成为越来越受关注的可靠性问题,事实上也已经成为电子产品可靠性和持久性的现实威胁。然而,到目前为止,对电迁移问题的理解还远远不够,很多重要的基础问题尚未搞清楚并加以解决。尤其值得重视的是,最近几年,电子封装中已开始采用无铅钎料,但对其电迁移问题却知之甚少,尽早研究这一问题将为无铅钎料的选择和设计、倒装芯片凸点互连设计、互连可靠性评定和寿命预测等提供有效的指导;目前,急需研究和解决的电迁移相关问题主要有:

(1) 在多种负载交替或耦合作用下互连(焊点)结构电迁移的物理力学机制和失效行为。

(2) 采用数值模拟方法对具有复杂结构和材料匹配的微互连(焊点)的电迁移问题进行表征, 并进行优化设计研究, 以解决目前的设计和评价程序严重依赖于成本高而周期长的试验工作来进行凸点材料选择、工艺制定、结构设计、可靠性评价和寿命预测等问题。

(3) 在获得必要参数及实验验证的条件下, 建立有效的微互连电迁移失效模型, 为多材料选择和多设计参数下封装可靠性与耐久性评价以及产品设计提供全面而可靠的信息。

(4) 发展出可靠而有效的互连(焊点)电迁移寿命预测方法。

#### 参考文献:

- [1] Tu K N, Gusak A M, Li M. Physics and materials challenges for lead free solders[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(3): 1335- 1353.
- [2] Zhang X P, Yu C B, Shrestha S, Dorn L. 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(8): 665- 670.
- [3] 张新平, 尹立孟, 于传宝. 电子及光子封装无铅钎料研究和应用进展[J]. 材料研究学报, 2008, 22: 1- 9.  
ZHANG Xirping, YIN Limeng, YU Chuabao. Advances in research and application of lead free solders for electronic and photonic packaging[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22: 1- 9. (in Chinese)
- [4] Tu K N. Recent advances on electromigration in very-large scale integration interconnects[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 5451- 5473.
- [5] Young D, Christou A. Failure mechanism models for electromigration[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(2): 186- 192.
- [6] 杨卫. 力电失效学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 35- 38.  
YANG Wei. Mechatronic Reliability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 35- 38. (in Chinese)
- [7] Spolenak R, Kraft O, Arat E. Effects of alloying elements on electromigration[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(68): 1015- 1020.
- [8] Ceuninck W A D, D'haeger V, Oomen J V, et al. The influence of addition elements on the early resistance changes observed during electromigration testing of Al metal lines[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(1): 87- 98.
- [9] Har Riege C S. An introduction to Cu electromigration[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(2): 195- 205.
- [10] Ye H, Basaran C, Hopkins D C. Mechanical degradation of microelectronics solder joints under current stressing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(26): 7269- 7284.
- [11] Zeng K, Tu K N. 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.
- [12] Chen C, Liang S W. Electromigration issues in lead free solder joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18(13): 259- 268.
- [13] Ye H, Basaran C, Hopkins D. Thermomigration in Pb Sn solder joints under joule heating during electric current stressing[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(7): 1045- 1047.
- [14] Huang A T, Gusak A M, Tu K N, Lai Y S. Thermomigration in SnPb composite flip chip solder joints[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(141911): 1- 3.
- [15] Huang A T, Tu K N, Lai Y S. Effect of the combination of electromigration and thermomigration on phase migration and partial melting in flip chip composite SnPb solder joints[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(033512): 1- 4.
- [16] Choi J Y, Lee S S, Paik J M, Joo Y C. Electromigration behavior of eutectic SnPb solder[J]. Proceedings of 3rd International Symposium on Electronic Materials and Packaging[C]. Jeju Island, Korea, 2001. 417- 420.
- [17] Chuang Y C, Liu C Y. Thermomigration in eutectic SnPb alloy[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(174105): 1- 3.
- [18] Yu D Q, Jillek W, Schmitt E. Electrochemical migration of lead free solder joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, 17(3): 229- 241.
- [19] Kielbasinski K, Kalenik J, Kisiel R. Investigation of electromigration on printed circuit boards soldered with lead free solder[A]. Proceedings of SPIE[C]. R. S. Romaniuk Ed., Bellingham, USA, 2006, 6347, 63471V1- 8.
- [20] Choi W J, Yeh E C C, Tu K N. Mean time to failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin film under bump metallization[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 5665- 5671.

#### 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/光电子封装材料及可靠性研究。  
E-mail: yin.lineng@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。  
E-mail: mexzhang@scut.edu.cn