

无铅焊点可靠性的研究进展

邹阳, 郭波, 段学俊, 吴庆堂, 魏巍, 吴焕

(长春设备工艺研究所, 长春 130012)

摘要: 文中根据近两年来国内无铅钎料研发过程中存在的问题, 简要评述了无铅钎料的研究进展及发展趋势, 并着眼于焊点可靠性对无铅钎料进行了评述。首先介绍影响无铅焊点可靠性的因素; 其次汇集了 2012 ~ 2018 年国内学者对无铅钎料焊点可靠性的研究方法及研究成果, 并结合加载载荷及热循环共同作用、有限元模拟分析、电迁移及锡须生长影响无铅焊点性能的 4 个方面对无铅焊点可靠性进行了分析; 最后结合以上研究成果针对无铅钎料的未来发展进行展望, 为新型无铅钎料的进一步研究提供理论支撑。

关键词: 无铅钎料; 焊点可靠性; 外加载荷及热循环; 电迁移; 锡须

中图分类号: TG454

0 前言

随着 IC 集成电路的迅猛发展, 其已经从大规模集成电路 (LSI) 向着超大规模和甚大规模 (ULSI) 的方向发展。电子元件的发展越来越精密, 在印刷电路板上的安装密度越来越大。研究如何进一步改善钎料的物理性能, 提高焊点的抗拉强度和抗蠕变的能力, 进而延长电子设备服役时间的问题显得愈发紧迫和重要。在传统的钎焊工艺中, SnPb 系列钎料具备价格低廉、可焊性较高和导电性能优秀等优势, SnPb 系列钎料已经被大量运用于电子工业界的焊接当中。然而, 由于 Pb 作为有毒重金属, 其对环境和生物具有毒害作用, 近年来国内外相关机构学者探索研究使用无铅钎料作为传统 SnPb 钎料的替代品^[1]。这种趋势符合当下科技发展要求, 是势在必行的。

无铅钎料要代替传统的 SnPb 系列钎料, 必须具备以下性能^[2]: ①其全球储量足够满足市场需求。某些元素 (如铟和铋) 储量较小, 因此只能作为无铅钎料中的微量添加成分; ②无毒性。某些在考虑范围内的替代元素 (如镉、碲) 是有毒的。而某些元素 (如锑) 如果改变毒性标准的话, 也可以认为是有毒的; ③相变温度 (固/液相线温度) 与 SnPb 钎料相近; ④足够的力学性能: 剪切强度、等

温疲劳抗力、热机疲劳抗力及金属学组织的稳定性; ⑤良好的润湿性; ⑥可接受的成本价格。近年来无铅钎料得到了广泛的发展, 形成了 SnZn 系列, SnAgCu 系列等无铅钎料, 综合近年来无铅钎料的研究, 其性能主要从高温力学性能和常温力学性能 2 个方面进行考虑, 其评价主要从以下 4 个方面进行考虑: ①润湿性和力学性能; ②抗蠕变性能; ③焊点的界面组织形态; ④抗疲劳性质。其中, 润湿性和力学性能和焊点的界面组织形态关系到无铅钎料形成焊点的可焊性, 而抗蠕变性能和抗疲劳性质关系到焊点的使用寿命。通过对已知无铅焊点进行以上 4 方面的分析可以综合地反映钎料的使用性能。

经过十几年的探索研究, 国内外相关机构及学者研发出能够满足使用环境要求的无铅钎料若干种, 并使其体系初步成形。

1 无铅钎料体系

经过十几年的发展, 无铅钎料形成了以 Sn 为主要基体元素, 以 SnCu 系钎料、SnAgCu 系钎料、SnAg 系钎料、SnZn 系钎料为主要系列的结构体系。除此之外, 其他的无铅钎料: SnBi 系、SnIn 系、SnSb 系、AuSn 系、AuGe 系等钎料得到了国内外学者的关注和发展。国内研究者主要选取 SnCu 系、SnAgCu 系、SnAg 系、SnZn 系钎料作为研究对象, 尝试通过一系列合理有效经济的方法提高无铅钎料的使用性能。表 1 为几种典型无铅钎料的参数^[3-4]。

表 1 几种典型无铅钎料参数

钎料	共晶温度 $T_m/^\circ\text{C}$	屈服强度 R_{ch}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	表面张力(空气) $F_s/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
SnAg	221	42.4	53.6	48	431
SnCu	227	27.8	37.6	25	491
SnZn	199	27.3	28.3	20	518
SnAgCu	217	43.2	53.6	39.8	505

2 焊点可靠性因素

焊接过程中,钎料熔化,润湿基板及部件电极,发生各种界面反应,最终形成互连焊点。同时,近年来为了满足电子产品微型化,便携化和多功能化的市场需要,以微焊点为互连方式的倒装芯片向着微小化方向发展。这促使焊点的间距和体积连续减小,导致微焊点在热循环条件下承受着更大的应力与应变,且焊点体积减小也会弱化本身适应变形的优势,加剧了焊点失效^[5-6]。由此可知,焊点的可靠性直接影响着电子器件的初始故障率及服役寿命。

研究表明,焊接条件对焊点可靠性的影响因素如下^[7]:①升温速度:温度的均匀性;②预热温度及时间:焊剂的活性和基板温度的均匀性;③峰值温度及保温时间:焊料润湿性及界面形成;④冷却速度:焊料凝固,焊点的初期组织。其他因素还包括:回流炉气氛、加热手段、气流方向及强度等,这些因素也将对软钎焊过程产生较大影响。将上述因素随机组合后,在合适的参数下就可以得到可靠性高的焊点。微焊点钎焊过程中产生的缺陷和服役后产生的缺陷如图 1^[3]所示。在钎焊过程中,焊点界面处的金属间化合物(IMC)是熔融钎料在润湿过程中与铜基板发生反应后生成的^[8],这些反应主要通过原子的相互扩散来实现。同时,已有研究表明^[9],适量的金属间化合物(IMC)的厚度可以提高焊点的可靠性,但由于金属间化合物多为硬脆相,其过度生长会严重恶化焊点的力学性能。近两年来,国内学者主要从外加载荷及热循环共同作用、有限元模拟分析、电迁移及锡须生长对焊点性能影响 4 个方面对无铅焊点的可靠性进行了研究。

2.1 外加载荷及热循环共同作用对焊点可靠性的影响

王健等人^[10]对比 SACBN07 与 SAC305, SAC0307 两种无铅钎料焊点在试验温度 $-55\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 下的抗冷热冲击性能,发现 SACBN07 的抗冷热冲击性能最佳,

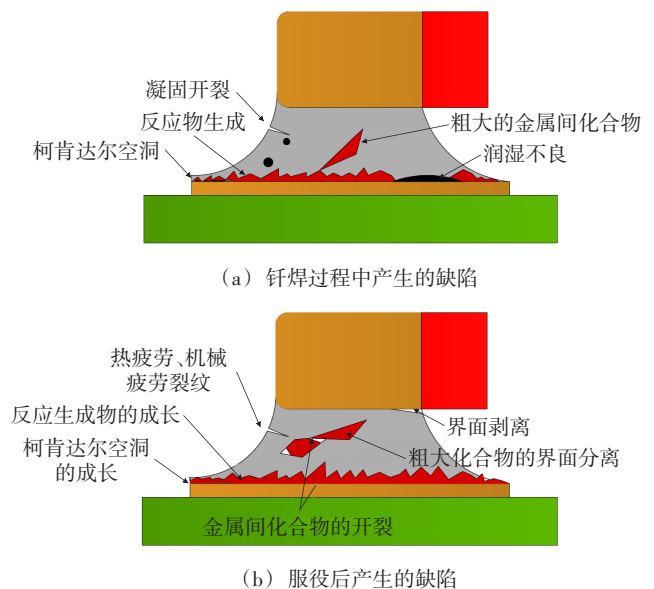
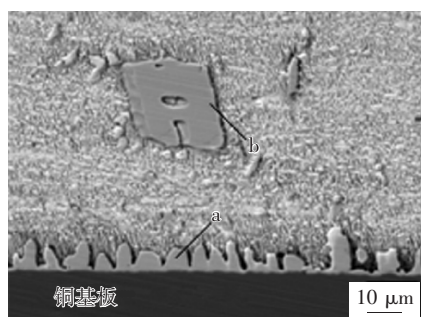
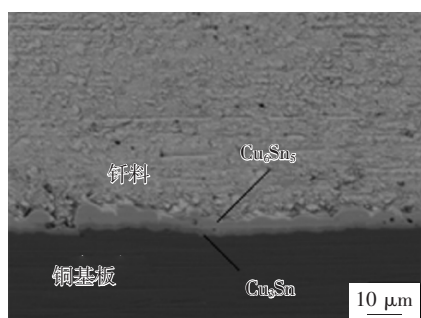


图 1 微焊点钎焊过程中产生的缺陷和服役后产生的缺陷

同时研究了焊点失效后 3 种材料中裂纹扩展路径并发现钎中 Bi 和 Ni 元素的加入有效地抑制了 IMC 的生长。李帅等人^[11]基于自制原位观察装置,研究了 Sn3.0Ag0.5Cu/Cu 焊点在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温时效下,界面金属间化合物层的微观形貌和生长规律,发现随着时效时间的延长,界面 IMC (Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn) 的厚度在不断增加,界面形貌由扇贝状转变为平整的层状,出现明显的分层现象,焊点力学性能也随之下落,如图 2^[11]所示。胡玉华等人^[12]证明了在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时效作用下,Sn9Zn0.06Nd/Cu 焊点界面层生成了较为平坦的 IMC 层 Cu_5Zn_8 ,并随时效时间的增加,IMC 层不断增厚,同时焊点的拉伸力不断减小,断裂方式由韧性断裂向脆性断裂转变。对 SnZnNd 钎料焊点高温时效界面组织进行研究^[8],发现时效过程中由于界面体积增加而产生的不断累积压应力致使 IMC 层表面出现孔洞和裂纹,从而导致焊点性能的恶化。SnZnGaNd 钎焊接头进行时效处理^[13],发现在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时效的条件下,钎焊接头的剪切力随时效时间增加而降低,经



(a) 时效前钎焊接头组织



(b) 时效后钎焊接头组织

图2 Sn3.0Ag0.5Cu/Cu 钎焊接头时效前后组织形貌

过 720 h 时效处理后, SnZnGa-0.08Nd 接头的剪切力仍然高于未经时效的 SnZn 钎焊接头。张洪武等人^[14]通过设计温度-定频振动两场耦合可靠性试验,发现温度由 25 °C 升高到 100 °C 时,振动载荷下微焊点的寿命显著提高,焊点失效裂纹由界面裂纹转变为体钎料裂纹。

随着封装产业将向着微型化发展,钎料的减少使反应层的相对体积变大。此类微尺度无铅焊点对温度以及受力的变化更加的敏感。尹立孟等人^[15]证明了 SAC305 无铅焊点蠕变性能存在尺度效应,大体积微焊点的稳态蠕变速率明显比小体积的大,小体积焊点的蠕变寿命更长。同时,在 100 ~ 145 °C 温度与 8 ~ 20 MPa 应力共同作用下,所有不同体积焊点的蠕变曲线均呈现典型的初始蠕变阶段,稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段。同时,也证明了焊点高度对 SAC305 微尺度焊点力学行为有影响^[16],发现微尺度焊点的拉伸和抗剪强度均随焊点高度的增大而减小;相同尺寸微尺度焊点的抗剪强度低于抗拉强度,同时剪切断裂应变小于拉伸断裂应变。对 SAC305/Cu 焊点界面 IMC 层生长速率的研究^[17]证明了界面 IMC 层生长速率存在尺度效应,焊点尺寸越大,IMC 层的生长速率越小。同时,随时效温度的升高,界面 IMC 层生长速率增大。

国内学者通过纳米压痕的方法对无铅焊点的力学性能等方面进行了研究。杨森森等人^[18]借助纳米压痕的方法对 SnAgCuBi-xNi/Cu 低银无铅焊点的塑形和蠕变性能进行了研究,发现焊点的抗蠕变性能随着 Ni 元素含量的增加而增加, Ni 元素含量为 0.1% (质量分数) 时焊点塑性最好。王丽凤等人^[19]通过纳米压痕试验对 BGA 界面化合物的力学行为进行了研究,发现在加载速率较小的情况下 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$, Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn 具有锯齿流变效应;在加载速率较大的情况下 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$, Cu_3Sn 的锯齿流变效应不明显,而 Cu_6Sn_5 的锯齿流变效应相对明显。通过对焊点进行一次加载-卸载试验,戴文琴等人^[20]经研究发现 Sn0.3Ag0.7Cu-xLa 焊点随稀土 La 元素含量的增加,焊点的硬度、弹性模量及抗蠕变性能均呈现上升趋势。贾克朋等人^[21]系统地研究了 BGA 封装结构中 Sn3Ag0.5Cu, Sn0.3Ag0.7Cu, Sn0.3Ag0.7Cu-0.07La 和 Sn0.3Ag0.7Cu-0.07La0.05Ce 焊点的剪切力学行为,发现单板结构中焊点的抗剪强度高于板级结构中焊点的抗剪强度,在板级结构中,高银焊点的抗剪强度最大,对于板级结构加入稀土元素的低银焊点剪切力学性能与高银焊点相当。韦何耕等人^[22]对 SAC305 叠层塑料球栅阵列 PBGA 焊点在随机振动条件下的可靠性进行了研究,发现组件在一阶固有频率下振动时,组件边角叠层焊点受到的应力最大,如图 3^[22]所示。

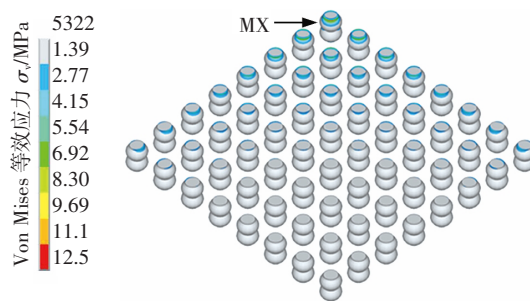


图3 叠层焊点等效应力分布云图

通过 PCB 组件跌落试验,温桂琛等人^[23]研究了 SAC305 钎料 BGA 焊球在冲击载荷作用下的失效与机理,发现失效裂纹主要出现在焊球的顶端和根部。同时,焊球裂纹一般从焊球两端外侧产生,在跌落冲击载荷的作用下沿 IMC 层、 β -Sn 或 PCB 基体扩展,最终导致焊球失效。近期有学者研究发现^[24],热冲击条件下细间距倒装 SAC305 微焊点的裂纹萌生于焊点外侧,随着循环次数的增加,裂纹进入钎料基体中,并沿着焊盘平行方向扩展,如图 4^[24]所示。

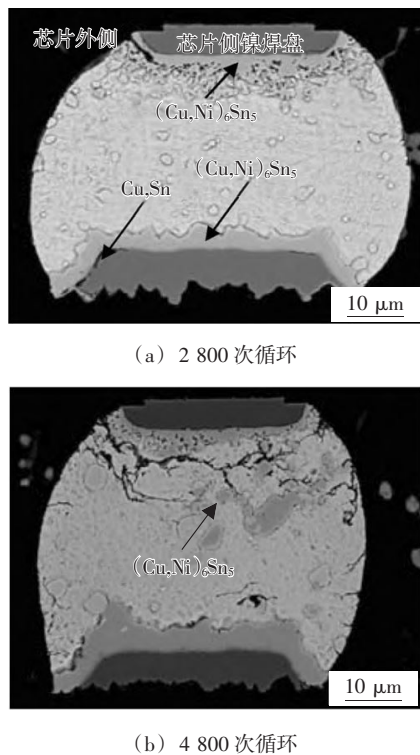


图4 热冲击条件下 SAC305 焊点裂纹萌生及扩展示意图

李晓延团队^[25]探索了不同加载速率和不同钎料厚度对 SnAgCu/Cu 焊点抗剪切性能的影响,研究发现,加载速率在 0.001 ~ 1 mm/s 范围内,焊点的抗剪强度随加载速率的增加而增大;随着焊点厚度的减小,焊点抗剪切性能提高,裂纹萌生位置逐渐由焊点内部向 IMC 层转移。以 0805 封装片式电容器件 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点为研究对象^[26],通过建立多周期温度冲击下 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点有限元分析模型及真实的焊点热疲劳寿命试验,发现 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点抗热疲劳劣化性能优于 SnPb 焊点,同时计算得出 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点热疲劳状态的拟合方程为: $y = 67.406 - 1.2765e^{0.6538x}$ 。

综合以上研究成果可以发现,在外加载荷及热循环作用下,无铅焊点的失效主要是由于裂纹源的形成及裂纹向钎料基体组织扩展。在随机振动对球栅阵列 PBGA 可靠性研究中,组件边角焊点受到的应力最大,是组件中最有可能失效的位置。在冲击载荷的作用下,焊点的 IMC 层及 BGA 焊球的顶端和底部是裂纹源形成的集中区域。研究发现通过向无铅钎料中添加适量的合金元素或稀土元素,可以抑制 IMC 层的生长,延长焊点的服役期间,提高焊点的可靠性。同时,温度场温度高低,外加载荷的大小及频率显著影响焊点的服役时间,其具体参数需要通过大量试验进行进一步量

化研究。

2.2 采用有限元模拟分析无铅焊点可靠性

焊点尺寸的减小使得通过试验手段获得应力应变数据变得非常困难,这意味着通过试验方法预测焊点的可靠性面临着挑战。因此,近年来国内外主要采用有限元分析方法,结合弹性力学、粘塑性力学、断裂力学的理论,分析焊点在应力作用下的损伤伤害程度,获得应力应变数据,进而预测焊点可靠性^[27]。倒装焊点有限元模型主要分为 3 种:基于断裂力学的 Pairs 模型、基于疲劳失效的 Manson-Coffin 模型及基于能量的 Darreux 模型。

田茹玉等人^[28]采用多线性等向强化(MISO)本构模型及 Darreux 疲劳模型预测了 Sn3.0Ag0.5Cu 在极限温度(−180 ℃, +150 ℃)下应力应变分布情况预测 CBGA 焊点的热冲击疲劳如图 5^[28]所示,结果表明,局部热失配导致应力最大点出现在边角焊点陶瓷载体一侧的焊盘与钎料界面,极限温度热冲击载荷下焊点的疲劳寿命远低于标准温度循环载荷下的疲劳寿命。

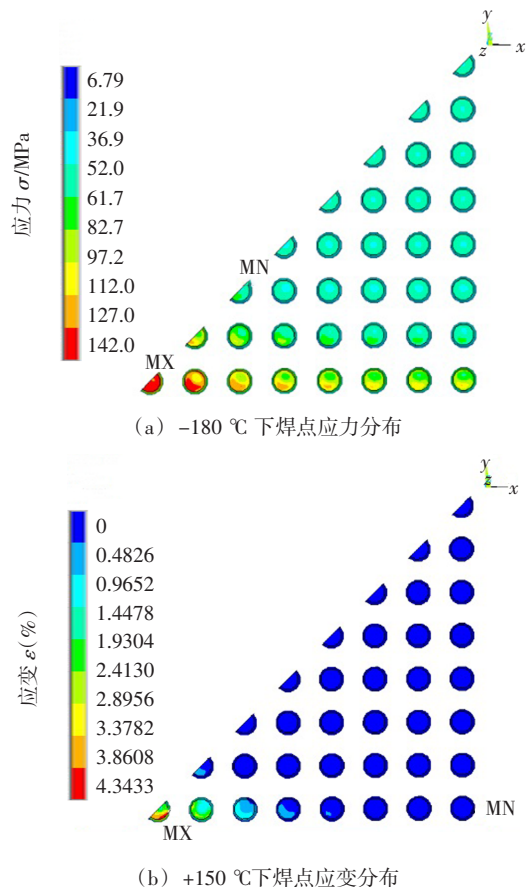


图5 −180 ℃, +150 ℃ 条件下焊点应力及应变分布

孔达研究团队^[29]采用 Anand 模型及蠕变应变疲

寿命预测模型 SAC, SACC, SACC 焊点疲劳寿命, 研究发现, 芯片从中心到拐角焊点变形 - 应力 - 应变逐渐增加, 芯片下拐角焊点为整个结构危险区域, 并证明 SnAgCuCe 和 SnAgCuFe 焊点寿命明显高于 SnAgCu 焊点使用寿命。近期, 有学者采用有限元模拟法分析了在 $-55 \sim +125$ °C 热冲击过程中倒装 SAC305 微焊点的应力应变及焊点的失效情况并根据基于能量为参考的 Darreux 模型^[27,30], 研究发现, 芯片外侧焊点具有最大的累积塑性应变能密度, 此处焊点最易失效。魏鹤琳等人^[31]采用 ANSYS 统一 Anand 粘塑性本构方程描述 SnAgCu 焊点的非弹性形变, 对考虑 IMC 的 PBGA 焊点与不考虑 IMC 的 PBGA 焊点在温度循环载荷作用下的应力应变响应进行了比较分析, 发现远离中心位置的外侧焊点承受更大的应力应变; 在温度循环加载过程中 IMC 层积累了较大的应力, 由于 IMC 层的硬脆性材料特性, 使钎料在高应力 IMC 界面发生较大的塑形形变, 与实际温度循环试验结果更为接近。为了提高芯片尺寸封装 (CSP) 器件的焊点可靠性, 熊明月等人^[32]基于田口法, 采用 Garofalo-Arrhenius 稳态本构方程和有限元法, 对 CSP 器件焊点热循环载荷下的应力应变分布进行了有限元模拟, 发现影响焊点可靠性的主要影响因素为焊点的材料和焊点的高度, 得到的最佳方案为焊点材料 Sn3.9Ag0.6Cu, 焊点高度 0.25 mm, 芯片厚度 0.1 mm, 基板厚度 0.17 mm。该最优方案和原始设计方案相比, 蠕变应变能密度降低了 65.4%, 信噪比提高了 9.22 dB。韦何耕等人^[33]建立了 PBGA 器件叠层焊点应力应变有限元分析模型, 对叠层无铅焊点在热循环载荷条件下的应力应变分布进行模拟, 发现焊点叠加方式能有效提高焊点的热疲劳寿命; 叠层焊点的高度由 0.5 mm 增加到 0.8 mm 时, 焊点的热疲劳寿命随其高度的增加而增加; 叠层焊点的最大径向尺寸由 0.3 mm 增加到 0.45 mm 时, 焊点的热疲劳寿命随焊点的最大径向尺寸增加而减小。基于蠕变模型采用有限元法对 WLSCP30 器件 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点可靠性及疲劳寿命进行预测^[34], 发现 WLSCP 器件整体的最大应力集中在阵列最拐角焊点的上表面处, 该部位可能成为焊点裂纹的发源地, 结合焊点疲劳寿命方程, 预测焊点的疲劳寿命并与相关试验结果较为吻合。如图 6^[35]所示, 梁颖等人^[35]设计了无铅柔性焊点, 并结合有限元分析方法对其应力应变进行了研究, 分析发现采用柔性层结构可以有效的降低随机振动载荷作用下焊点内的应力应变, 大大提高了焊点的振动疲劳寿命。同时, 裂纹形成在钎料基体中, 由外侧向内侧扩展, 边

角焊点的疲劳寿命为 6 171 次。

张国礼等人^[36]将焊点故障诊断过程中得到的前期故障实测数据作为原始数据, 建立了焊点失效灰色模型, 并对焊点后期健康状况进行预测, 预测结果与实测结果近似相符。采用有限元模拟的方法对处于温度场中的 CBGA 模型焊点疲劳寿命进行分析^[37], 结果表明焊点失效是由于焊点的局部热失配引起的。同时, 失效位置集中于距芯片中心较远端, 计算得出温度分布模型的寿命为 1 269 周次, 接近于试验平均值。

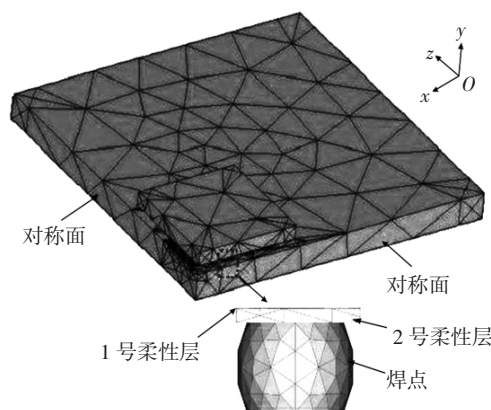


图6 柔性无铅焊点整体有限元模型

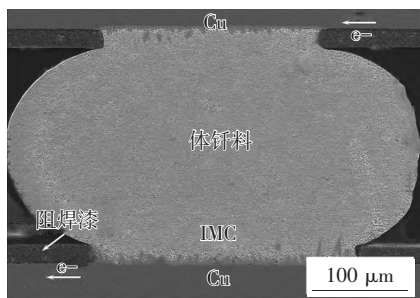
由以上成果分析可知, 采用有限元模拟分析的方法可以判断在相同热应力环境下不同位置焊点的应力及应变分布, 进而确定焊点易失效的位置往往处于组件整体受应力集中较大的边角及拐角处, 并与焊点应力应变试验结果相结合, 可以近似判断焊点的服役寿命。因此, 模拟分析方法及相关试验数据相结合对无铅钎料的实际应用具有极其重要的指导意义。

2.3 电迁移对焊点可靠性的影响

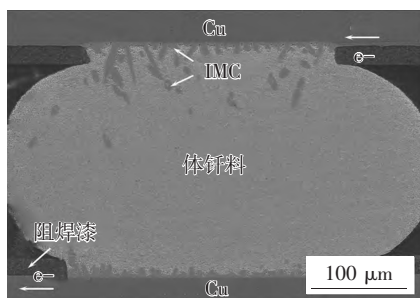
焊点在微互连接中起到机械支撑和导电连接的作用。电迁移是伴随电子微互连日益极小化及电子元器件不断趋向微型化和精密化而出现的一个问题, 它是指在电流应力作用下, 原子或离子随电子迁移而导致的成分偏析以致出现丘凸和空洞等材料结构缺陷的现象^[38]。比如在倒装芯片技术中, 直径 100 μm 的凸点 (bump) 需要流经 0.2 A 的电流, 在最先进的器件中此直径甚至小到 50 μm , 与此同时, 凸点内电流密度增加到 $1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 对焊点产生不可忽视的影响, 因此电迁移问题成为了今后的研究热点。

李雪梅等人^[39]研究了在 Cu/Sn 3.0Ag0.5Cu/Cu 微焊点电迁移过程中界面金属间化合物 (IMC) 的生长演变机制, 如图 7 和图 8^[39]所示, 发现随加载时间的延长, 两极 IMC 层厚度均增厚, 且阳极 IMC 层厚度增长速

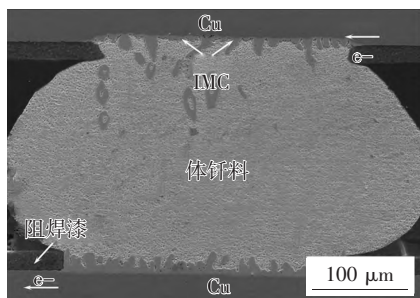
率比阴极大;与固—固电迁移相比,固—液电迁移后,阴极侧焊点 IMC 形貌更规则,且表面光滑度较高。对 Cu/Sn-15Bi/Cu 焊点在 150 °C 下的电迁移组织演变研究^[40],发现受“电子风”的影响,钎料中 Cu_6Sn_5 金属间化合物逐渐向阳极侧偏聚。同时,阴极侧金属间化合物脱落,钎料基体中的 Cu_6Sn_5 金属间化合物体积分数逐渐增加;焊点阴极/阳极侧界面金属间化合物厚度随



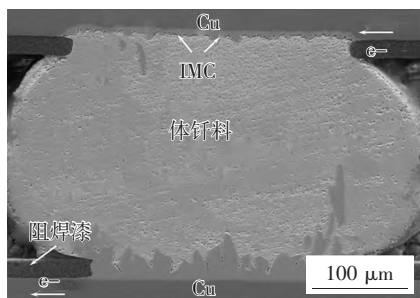
(a) 4 min



(b) 10 min



(c) 20 min



(d) 25 min

图7 电荷作用下固—液扩散焊点的微观形貌

电迁移时间的延长逐渐增加。

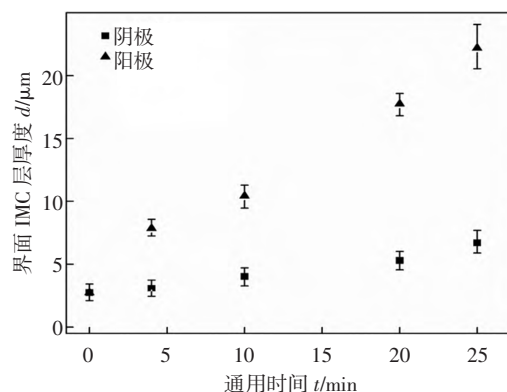


图8 电荷作用下固—液扩散焊点的界面 IMC 层厚度变化

尹立孟等人^[41]研究了电迁移条件下不同电流密度 ($0.63 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$) 和通电时间 (0 ~ 48 h) 对低银无铅 SnAgCu 微尺度焊点的拉伸力学行为的影响,发现电迁移导致焊点的抗拉强度显著降低,随着电流密度的增加或通电时间的延长,焊点的抗拉强度均呈下降趋势,同时电迁移还导致焊点的拉伸断裂模式发生明显变化,在经历高电流密度或长时间通电的电迁移后,焊点在服役条件下会发生由韧性断裂向脆性断裂的转变。同时,王家兵等人^[42]研究了无铅焊点在高电流密度下服役的可靠性,发现导致焊点失效的主要原因是焊点在承受一定电流作用之后,阴极金属间化合物 (IMC) 分解,铜焊盘受侵蚀,阳极形成大量的脆性化合物 Cu_6Sn_5 。同时,发现添加微量元素如 Bi 和 Ni 后,钎料基体得到明显的细化,界面 IMC 层较薄,焊点的抗电迁移能力得到了明显的加强。姚宗湘等人^[43]分析了 $0.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 恒定电流密度和不同加载时间的电迁移条件对 $6.5 \mu\text{m}$ 厚镀锡层表面锡须生长行为的影响,发现电迁移加速了镀层表面锡须的形成与生长,随着电迁移时间的延长,锡须长度不断增加。

电迁移的驱动力是“电子风”,当电子从左到右流过时,左侧界面的金属间化合物变厚,而右侧变薄,焊点的组织改变严重影响其力学性能。综合以上研究成果,适量的合金化元素的添加有利于细化钎料的组织,抑制 IMC 界面的生长,提高焊点的抗电迁移能力。同时,在“电子风”的驱动下焊点内部原子的迁移致使内部压力的增大并引发锡须的生长。一般认为,当锡须长度为 $50 \mu\text{m}$ 时就可能给电子产品带来了极大的失效风险^[44]。国内学者针对焊点锡须现象开展了一系列研究。近年来有研究表明^[44],在相同的时效条件下,镀锡层越薄,锡须生长的可能性越大;相同的外加载荷和试

验温度下,承受压力作用的镀锡层比承受拉应力作用时锡须生长得更快。有学者研究了 Sn9Zn/Cu 无铅焊点中 ZnO 须自发生长行为^[45],证明了富锌相氧化是导致富锌相表面 ZnO 须自发生长的原因。叶焕等人^[47]在向 Sn9Zn 0.5Ga 基体合金中添加 0.7% (质量分数) 的稀土 Pr 元素后,仅需室温时效 12 h,合金组织中的稀土相表面即发生了锡须的自发生长,随时效时间的延长,锡须继续长大,最终长度可达 100 μm ,稀土相氧化所产生的微观压应力可能为锡须的生长提供了驱动力。同时,叶焕等人^[47]研究了相同时效时间(30 d),3 种不同氧化条件下 SnZnGa-xPr 无铅钎料表面的锡须生长行为,发现在室温环境下,锡须呈典型的针状生长;在湿热条件下,锡须呈丘状生长;而在氮气气氛的近似无氧条件下仅发现有少量锡粒在稀土相 PrSn_3 表面产生,基于稀土相氧化驱动锡须理论,得出 3 种条件环境下锡须生长行为的不同是由于稀土相氧化程度不同造成的。田君等人^[48]在 Sn3.8Ag 0.7Cu 钎料中添加过量的稀土 Ce 和 Er 元素,通过常温及 150 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理的方法研究稀土相 CeSn_3 及 ErSn_3 表面锡须的生长行为,发现稀土相的表面出现了大量规则的针状及线状锡须,其在生长过程中始终保持恒定的截面,当锡须根部的顶点位置存在某些稀土化合物时,会出现锡须的分枝现象;当两枝锡须的根部相距很近时,会出现锡须的合并现象。

综合以上研究结果发现,锡须的生长驱动力是元素的快速扩散,当存在镀层时元素内部向表面扩散,然后在镀层表面形成锡须。同时,电迁移,外界的压力及钎料中稀土相的氧化均可能引起内部压力的增加进而引发锡须的生长。然而,到目前为止国内外研究机构仍然没有阐明锡须的基础生长机理及高适用性的锡须抑制对策。因此,锡须问题依然是无铅钎料领域内的研究热点。

3 结论

(1) 采用适量的合金元素或稀土元素对无铅钎料进行合金化改性,可以抑制界面 IMC 层的生长,一定程度上提高焊点的可靠性。

(2) 外加载荷及热循环作用是无铅焊点失效的主要原因,可以采用模拟分析与实际试验相结合的方法,对不同位置的焊点寿命进行预判。

(3) 锡须严重影响电子产品的可靠性,其生长机理尚不明确。通过以上研究成果可以明确,电迁移作用可以诱发锡须,并有待进一步深入研究。

(4) 无铅钎料可以代替传统 SnPb 钎料在微电子连接领域里发挥作用。但目前没有一种无铅钎料的综合性能达到或超越传统 SnPb 钎料,因此新型高可靠性无铅钎料及新型微连接技术仍是当下研究的热点方向。

参考文献

- [1] 张亮,薛松柏,皋利利,等. 稀土元素对无铅钎料组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1680-1696.
- [2] 史益平,薛松柏,王俭辛,等. Sn-Cu 系无铅钎料的研究现状与发展[J]. 焊接, 2007(4): 14-18.
- [3] Anderson I E. Development of Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-X alloys for Pb-free electronic solder applications [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18(1-3): 55-76.
- [4] 张群超,张富文,胡强. 低银 Sn-Ag-Cu 无铅钎料的发展现状及发展趋势[J]. 焊接, 2011(11): 28-31.
- [5] Shen Y L, Chawla N, Ege E S, et al. Deformation analysis of lapshear testing of solder joints [J]. Acta Materialia, 2005, 53(9): 2633-2642.
- [6] Zimprich P, Saeed U, Weiss B, et al. Constraining effects of lead-free solder joints during stress relaxation [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(3): 392-399.
- [7] 菅沼克昭. 无铅软钎焊技术基础[M]. 刘志权,李明雨,译. 北京: 科学出版社, 2017.
- [8] 薛鹏,王克鸿,周琦,等. Sn-Zn-Nd 钎料焊点高温时效界面组织演变[J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 33-36.
- [9] Zeng G, Xue S B, Zhang L, et al. A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn-Ag-Cu based solders and substrates [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2010, 21(5): 421-440.
- [10] 王健,刘洋,张洪武,等. 冷热冲击对无铅钎料可靠性的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(3): 91-94.
- [11] 李帅,闫焉服,赵永猛,等. 基于原位观察 Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu 钎焊接头 110 $^{\circ}\text{C}$ 时效过程中的显微结构[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 43-46.
- [12] 胡玉华,薛松柏,杨晶秋,等. 时效对 Sn-Zn 无铅钎料焊点可靠性的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 41-44.
- [13] 薛鹏,薛松柏,沈以赴,等. 时效处理对 Sn-Zn-Ga-Nd 钎焊接头界面及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 29-32.
- [14] 张洪武,王健,刘洋,等. 温度对振动载荷下互连微焊点寿命的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 83-86.
- [15] 尹立孟,姚宗湘,林捷翔,等. 不同体积无铅微尺度焊点的蠕变力学性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 61-64.

- [16] 尹立孟, Michael Pecht, 位松, 等. 焊点高度对微尺度焊点力学行为的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 27-30.
- [17] 田野, 吴懿平, 安兵, 等. 热时效过程中微米级 SnAgCu 焊点的界面金属间化合物形成及演变[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 101-104.
- [18] 杨森森, 孙凤莲, 邹鹏飞, 等. 低银 SnAgCuBi-xNi/Cu 焊点塑性及蠕变性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 31-34.
- [19] 王丽凤, 戴文琴, 孟工戈, 等. BGA 焊点界面化合物纳米压痕力学行为[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 11-14.
- [20] 戴文琴, 王丽凤, 何冰, 等. La 对 Sn-0.3Ag-0.7Cu 回流焊点纳米力学性能影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 75-78.
- [21] 贾克明, 王丽凤, 张世勇, 等. BGA 单板结构与板级结构焊点剪切力学行为分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 94-98.
- [22] 韦何耕, 黄春跃. 基于模糊理论的随机振动条件下叠层 PBGA 焊点可靠性分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 49-52.
- [23] 温桂琛, 雷永平, 林健, 等. BGA 无铅焊点在跌落冲击载荷下的失效模式与机理[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 73-76.
- [24] 田野. 热冲击条件下倒装组装微焊点的可靠性—裂纹生长机理[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 43-46.
- [25] 高瑞婷, 李晓延, 朱永鑫, 等. 加载速率和钎料厚度对 SnAgCu/Cu 焊点剪切行为影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 94-98.
- [26] 毛勤书, 刘剑, 葛兵, 等. 片式电容 Sn96.5/Ag3/Cu0.5 焊点热疲劳性能比较[J]. 焊接学报, 2017, 38(3): 117-120.
- [27] 田野, 任宁. 热冲击条件下倒装组装微焊点的可靠性—寿命预测[J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 51-54.
- [28] 田茹玉, 王晨曦, 田艳红, 等. 极限温度下 CBGA 焊点热冲击疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 93-97.
- [29] 孔达, 张亮, 杨帆, 等. 基于 Anand 模型 SnAgCu-X 焊点疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 17-21.
- [30] 田野. 热冲击条件下倒装组装微焊点的可靠性—应力应变[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 67-70.
- [31] 魏鹤琳, 王奎升. 考虑 IMC 影响的 PBGA 无铅焊点温度循环有限元数值模拟[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 109-112.
- [32] 熊明月, 张亮, 刘志权, 等. 基于田口法的 CSP 器件结构优化设计[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 51-54.
- [33] 韦何耕, 黄春跃, 梁颖, 等. 热循环加载条件下 PBGA 叠层无铅焊点可靠性分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 91-94.
- [34] 张亮, 韩继光, 郭永环, 等. WLCSP 器件 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 97-100.
- [35] 梁颖, 黄春跃, 黄伟, 等. 基于正交设计的 WLCSP 柔性无铅焊点随机激励应力应变分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 13-16.
- [36] 张国礼, 王建业, 刘苍, 等. 基于灰色模型的焊点健康状态预测[J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 108-110.
- [37] 王尚, 田艳红, 韩春, 等. CBGA 器件温度场分布对焊点疲劳寿命影响的有限元分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 113-118.
- [38] 尹立孟, 张新平. 电子封装微互连中的电迁移[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1610-1614.
- [39] 李雪梅, 孙凤莲, 张浩, 等. 微焊点 Cu/SAC305/Cu 固液界面反应及电迁移行为[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 61-64.
- [40] 郭沁涵, 赵振江, 沈春龙, 等. 电流作用下 Cu/Sn-15Bi/Cu 焊点的组织演变[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 103-106.
- [41] 尹立孟, 姚宗湘, 张丽萍, 等. 电迁移对低银无铅微尺度焊点力学行为的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 81-84.
- [42] 王家兵, 孙凤莲, 刘洋, 等. 微量元素对无铅焊点电迁移性能的改善[J]. 焊接学报, 2012, 36(12): 29-32.
- [43] 姚宗湘, 罗键, 尹立梦, 等. 电迁移诱发镀层锡须生长行为分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 35-38.
- [44] 姚宗湘, 罗键, 尹立梦, 等. 外加载荷对镀锡层锡须生长行为的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 27-30.
- [45] 张亮, 杨帆, 郭永环, 等. Sn-9Zn/Cu 无铅焊点 ZnO 须自发生长[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 1-4.
- [46] 叶焕, 薛松柏, 薛鹏, 等. Sn-Zn-Ga-Pr 钎料表面锡须的自发生长[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 42-45.
- [47] 叶焕, 薛松柏, 龙伟民, 等. 氧化对含稀土无铅钎料表面锡须生长的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 59-62.
- [48] 田君, 李东南, 李巍, 等. 稀土相表面特殊形态锡晶须生长现象[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 73-75.

第一作者简介: 邹阳, 1990 年出生, 硕士, 助理工程师; 主要从事焊接、精密及超精密加工设备及技术方向的研究。

通信作者简介: 郭波, 1981 年出生, 硕士, 副研究员; 主要从事超精密加工设备及技术方向的研究。

(编辑: 王龙权)