

# 外加载荷对镀锡层锡须生长行为的影响

姚宗湘<sup>1,2</sup>, 罗 键<sup>1</sup>, 尹立孟<sup>2,3</sup>, 王 刚<sup>2</sup>, 张丽萍<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院,  
重庆 401331; 3. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 首先研究了三种不同厚度镀锡层(3, 5, 13 μm)在相同试验条件(70 °C时效24 h后室温放置60天)下的锡须生长情况, 并在此基础上首次采用精密动态力学分析仪(DMA Q800)研究了精确控制相同载荷条件下拉、压两种外力对相同厚度镀锡层(3 μm)锡须生长行为的影响。结果表明, 相同时效条件下, 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作用下, 承受压力作用镀锡层, 其表面锡须生长比承受拉力时生长更快, 并且主要呈柱状生长。

**关键词:** 电子封装; 镀锡层; 锡须; 外力; 生长行为

**中图分类号:** TG 113    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0027-04

## 0 序 言

近年来, 在全球普遍实施无铅化电子封装的同时, 电子产品持续趋向微小型化、便携化和多功能化等方向发展, 直接导致了电子封装系统和结构的可靠性问题日益突出, 已经引起电子工业界和科研人员的广泛关注。锡须(tin whisker)正是电子产品在封装后或服役过程中出现的一个重要而关键的可靠性问题, 如F15喷气式战斗机的雷达设备出现故障、2005年美国康涅狄格州Millstone核电站发生的重大停机事故及2006年美国航天飞机引擎出现问题等, 均是由于电子元器件中镀层锡须生长而导致的失效, 并且造成了巨大的经济损失。

截至目前, 国内外对锡须可靠性问题展开了较为广泛的研究, 其中锡须的生长机理是研究者最为关心也是研究得最多的方面, 最早认为锡须是一种位错生长机制<sup>[1,2]</sup>; 由于镀锡层内部存在一定的残余应力, 因此有研究认为这种残余应力可能就是锡须生长的驱动力<sup>[2,3]</sup>; 还有研究者认为锡须的生长是一种特殊的再结晶现象<sup>[2]</sup>; Tu在1994年提出了锡须生长的氧化膜破裂生长机制, 获得了普遍支持<sup>[1,2,4]</sup>。最近有研究者提出了活性锡原子机制<sup>[5,6]</sup>, 即Sn-RE合金在大气下放置时, 氧与RE反应形成

稀土氧化物而置换出锡, 进而形成锡须。总体来看, 目前尚没有一种合适的锡须生长机理被广泛接受与认可, 特别是外力作用等因素对镀锡层表面锡须生长的影响尚需进一步理解, 因为大多数电子产品通常处于复杂条件下服役, 不可避免地受到不同程度的外力作用。Fisher等人<sup>[3]</sup>认为外加压应力使锡晶须的生长速率加快, 并且外加压力越大晶须生长速率越高; 而Doremus等人<sup>[7]</sup>发现, 无论施加压应力还是拉应力, 都促进镀层表面晶须生长。因此外加载荷对锡须生长行为的影响有待进一步深入研究。

为此, 文中以纯铜表面的锡镀层为研究对象, 在对比研究三种不同镀层厚度表面锡须生长情况的基础上, 选择最容易引发锡须生长的镀层厚度, 研究拉、压两种不同应力状态对镀锡层表面锡须生长的影响, 以期为深入理解锡须的生长机制提供参考, 并为抑制或减缓锡须生长的方法提供指导。

## 1 试验方法

试验采用在无氧纯铜片(尺寸为40 mm × 15 mm × 0.2 mm)电镀锡, 电镀液采用硫酸亚锡 + 硫酸 + 明胶 + 茶酚。电镀前, 先将铜片用4000号砂纸打磨, 然后用抛光机进行铜片表面抛光处理; 然后将抛光好的铜片先后置于酒精、丙酮中进行超声波清洗, 时间约为10 min; 随后再用吹风机将其吹干待用。电镀锡采用WWL-LDX精密直流电源, 电流密度为1.1 A/dm<sup>2</sup>, 电镀时间分别为5, 10, 20 min, 对应的三种不同镀锡层平均厚度分别为3, 5和13 μm。

收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 重庆市前沿与应用基础研究项目(cstc2014jcyjA40009); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ131415); 重庆科技学院内科研基金(CK2013Z12); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(AWJ-M15-05)

由于 $50\sim70^{\circ}\text{C}$ 是锡须最容易生长的温度,因此电镀后的试样分两批进行试验,一批是先将试样置于恒温箱中进行 $70^{\circ}\text{C}$ 时效处理24 h后,再在室温下放置60天,随后采用扫描电子显微镜(SEM)观察铜片镀锡层的锡须生长情况。另外一批试样在电镀后直接置于精密动态力学分析仪(DMA Q800, TA Instruments, USA)上进行试验,采用控制力模式(controlled force)并选用薄膜拉伸夹具加载,试验外加载荷为17.5 N的拉力或压力(图1),加载时间为24 h,试验温度为 $70^{\circ}\text{C}$ ,加载后的试样随后在室温下放置60天,再采用电子显微镜观察试样表面的锡须生长情况。

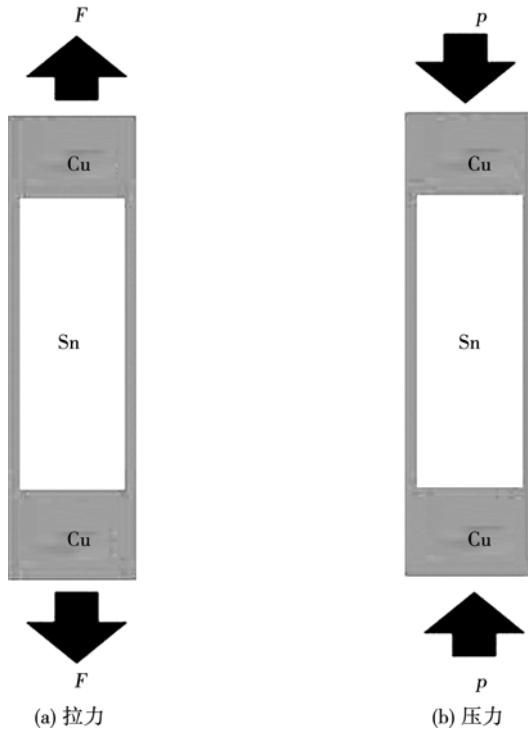


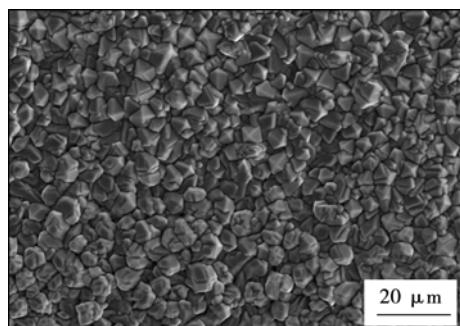
图1 DMA 夹具试样加载不同载荷示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of external force loading on DMA

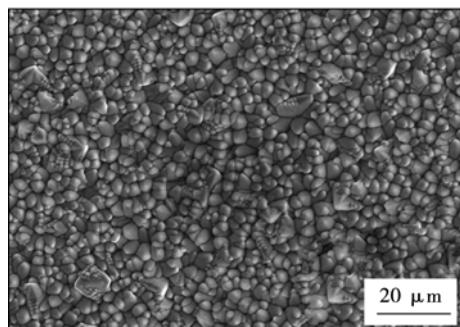
## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同厚度镀锡层下的锡须生长情况

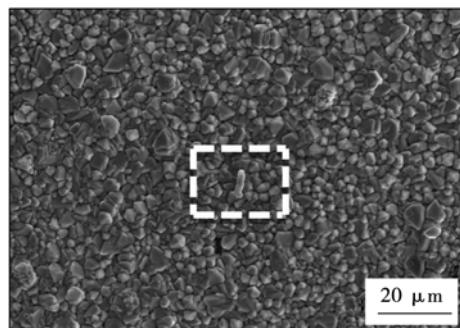
图2a,b分别为 $13\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$ 两种厚度镀锡层试样经 $70^{\circ}\text{C}$ 时效处理24 h后,再在室温下放置60天的SEM形貌,两种厚度的镀锡层均没有发现锡须,而 $3\mu\text{m}$ 镀锡层表面则长出了棒状锡须,如图2c,d所示。由此可见,镀锡层厚度对锡须生长具有显著的影响,镀锡层越薄则锡须生长的倾向越大,这与有些研究得到的结论一致<sup>[8]</sup>。出现这一现象的主要原因是在铜基体上电镀锡时,容易在镀锡层内



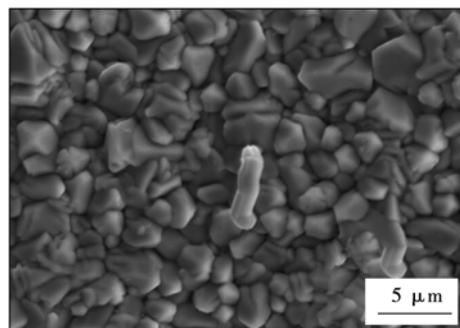
(a)  $13\mu\text{m}$ 镀锡层表面SEM形貌



(b)  $5\mu\text{m}$ 镀锡层表面SEM形貌



(c)  $3\mu\text{m}$ 镀锡层表面SEM形貌



(d) 图2c的局部放大

图2 不同厚度锡薄膜 $70^{\circ}\text{C}$ 时效24 h后室温放置60天后表面SEM形貌

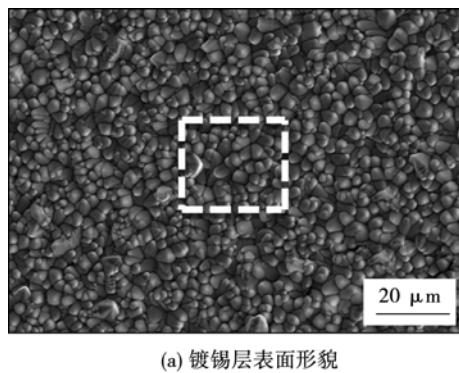
Fig. 2 SEM morphology photos of tin coatings with different thickness after thermal aging for 24 h and placed for 60 days at RT

部产生残余压应力,并且残余压应力与镀锡层的厚度成反比,镀锡层厚度越小,形成的残余压应力就越大,晶须生长的驱动力也就越大,而且锡原子在较薄

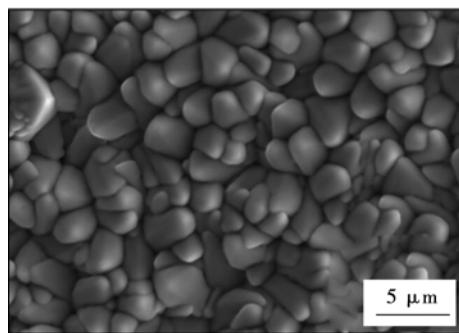
镀层中的扩散距离比较厚镀层中的要近些,没有足够的时间与空间来抑制锡晶须生长。另一方面,锡电镀到铜上后,铜和锡会在薄膜界面处发生互扩散并产生反应生成金属间化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,此过程会伴随着体积的膨胀,从而产生压应力,加之 Cu 原子的扩散速率比 Sn 要快,所以会有更多的 Cu 原子扩散到 Sn 原子所在一端,进一步产生压应力,为锡须的生长提供了动力。

## 2.2 外加载荷对镀锡层锡须生长的影响

图 3 和图 4 分别是 3  $\mu\text{m}$  厚度镀锡层在 70  $^{\circ}\text{C}$  温度下,载荷为 17.5 N 的拉伸、压缩两种不同受力状态作用 24 h 后得到的 SEM 表面形貌。



(a) 镀锡层表面形貌



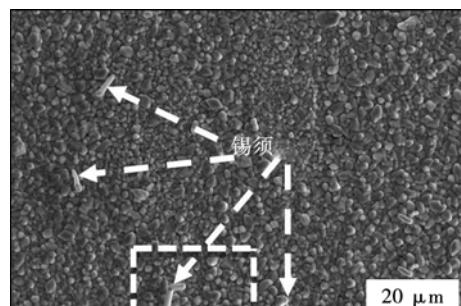
(b) 图3a局部放大

图 3 受拉伸载荷作用后的镀锡层表面 SEM 形貌

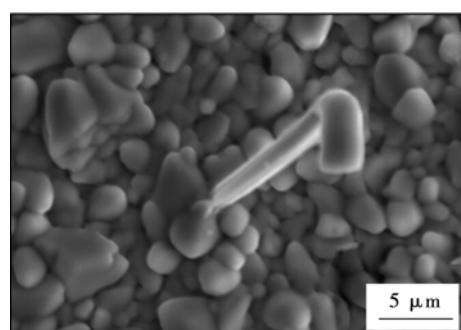
Fig. 3 SEM morphology photos of tin coatings after tensile loading

可以看出,受拉伸载荷作用的镀锡层表面基本没有观察到锡须,而受压缩载荷作用的镀锡层则生长出了大量的锡须,并且锡须的形态、长度与时效作用情况不完全相同,部分锡须呈现弯折状柱形(图 4b),长度由时效时的 7  $\mu\text{m}$  增长为约 14  $\mu\text{m}$ 。

拉、压两种载荷导致不同的镀锡层锡须生长行为可以用动态再结晶机制<sup>[9,10]</sup>和金属间化合物(IMC)生长致内应力机制<sup>[4]</sup>协同作用的复合机制来解释。如图 5 所示,对于压力载荷而言,其导致的压缩应力  $\sigma_1$ (主要压应力)与金属间化合物生长产生



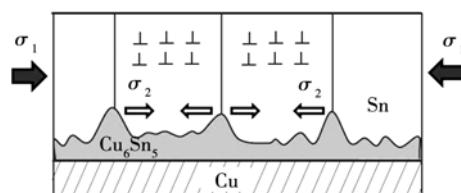
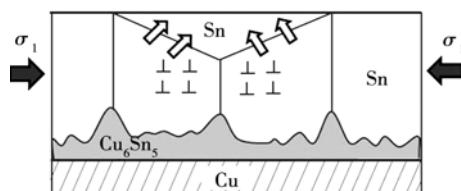
(a) 镀锡层表面形貌



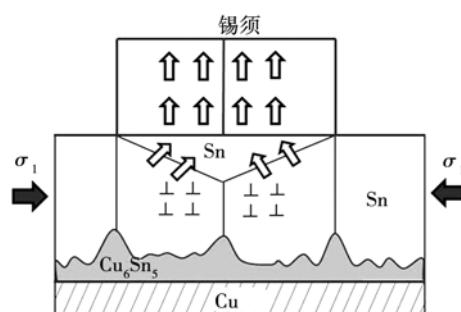
(b) 4a局部放大

图 4 受压缩载荷作用后的镀锡层表面 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology photos of tin coatings after compressive loading

(a) 压缩应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  共同作用产生位错

(b) 动态再结晶生成新的锡晶粒



(c) 在压应力作用下晶粒进一步生长成锡须

图 5 压缩应力诱发锡须生长示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of compressive force induced tin whisker growth

的压缩应力  $\sigma_2$ (次要压应力)相互协同,共同作用,产生向上的位错,在70℃的温度下发生动态再结晶而使位错密度降低,并生长出新的晶粒,随着时间的延长而成晶须。

与压力载荷相反,拉力载荷(图6)导致的拉伸应力  $\sigma_3$ (主要应力)与金属间化合物生长产生的压缩应力  $\sigma_2$ (次要压应力)共同作用,最终表现为拉伸应力,造成位错消失或产生向下的位错,即使在70℃的温度下发生动态再结晶,新的锡晶粒难以生成,因此镀锡层的晶须非常少见,甚至不会生长出锡须。

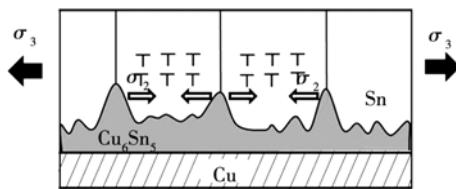


图6 拉伸应力抑制锡须生长示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of tensile force suppressed tin whisker growth

### 3 结 论

(1) 不同镀锡层厚度对锡须的生长影响明显,镀层越薄越有利于锡须的生长。

(2) 在拉、压载荷作用下,镀锡层表面分别生成拉张应力和压缩应力,压缩应力更容易诱发锡须的生长。

(3) 在外加载荷作用下,镀锡层锡须生长机制是一种动态再结晶机制和IMC生长压应力机制协同作用下的复合机制。

### 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 Xinping, Yin Limeng, Yu Chuobao. 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] 赵子寿,冼爱平.锡晶须生长机理研究的现状与问题[J].中国有色金属学报,2012,22(8):2267-2275.  
Zhao Zishou, Xian Aiping. Mechanism and questions of tin whisker growth [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2267-2275.
- [3] Fisher R M, Darken L S, Carroll K G. Accelerated growth of tin whiskers[J]. Acta Metallurgica, 1954, 2(3): 368-369, 371-373.
- [4] Tu K N, Li J C M. Spontaneous whisker growth on lead-free solder finishes[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 409(1-2): 131-139.
- [5] Shi H C, Xian A P. Tin whisker growth on NdSn<sub>3</sub> powder[J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 40(9): 1962-1966.
- [6] Hao H, Xu G C, Song Y L, et al. A model for rapid tin whisker growth on the surface of ErSn<sub>3</sub> phase[J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(2): 184-189.
- [7] Doremus R H, Roberts B W, Turnbull D. Growth and perfection of crystals[M]. New York: John Wiley & Sons, 1958.
- [8] Moriuchi H, Tadokoro Y, Sato M, et al. Microstructure of external stress whiskers and mechanical indentation test method[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(3): 220-225.
- [9] Vianco P T, Rejent J A. Dynamic recrystallization (DRX) as the mechanism for Sn whisker development. part I: a model[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(9): 1815-1825.
- [10] Vianco P T, Rejent J A. Dynamic recrystallization (DRX) as the mechanism for Sn whisker development. part II: experimental study[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(9): 1826-1837.

**作者简介:**姚宗湘,女,1978年出生,硕士研究生,副教授。主要从事电子封装可靠性方面的科研和教学工作。发表论文10余篇。  
Email: yaozongx@163.com

**通讯作者:**尹立孟,男,博士,副教授,硕士研究生导师。Email: yenlm@cqust.edu.cn