

Sn-1.5Ag-2Zn 低银无铅焊料与取向铜界面研究

肖金, 屈福康, 程伟, 李武初

(广州华立学院, 广州 511300)

摘要: **目的** 高密度封装技术能减少焊盘尺寸和焊盘里面所含晶粒的数量, 当多晶焊盘转为单晶焊盘时, 晶粒的取向会对界面处金属间化合物的形成产生重要影响。选取具有发展前景的 Sn-1.5Ag-2Zn 作为焊料合金, 研究焊料与单晶 (111) 铜基板界面反应, 得到金属间化合物的生长动力学规律。**方法** 将 Sn-1.5Ag-2Zn 无铅焊料分别与单晶 (111) 铜基板及多晶紫铜基板在 250 °C 下进行回流焊接 5 min, 将焊接后的样品在 160 °C 下分别进行 20 h, 100 h, 300 h, 600 h 热处理。用扫描电子显微镜背散射电子成像和二次电子成像、X 射线衍射仪 (XRD)、能谱仪等研究焊接界面处的显微组织、金属间化合物成分以及性能。**结果** 合金焊料与铜基板接触迅速生长出凹凸不平类似扇贝状 Cu_6Sn_5 金属间化合物层, 与单晶铜表面形成的 Cu_6Sn_5 晶粒尺寸比多晶铜的大, 单晶铜无晶界阻挡原子扩散, 影响晶粒形核与长大。合金焊料与单晶 (111) 铜焊点在 160 °C 下热处理 20 h 快速形成的 Cu_6Sn_5 生长速度是多晶铜上焊点的 2 倍左右。而后随热处理时间增加增长缓慢, 热处理 600 h 后厚层 Cu_6Sn_5 由于裂纹扩散出现溃断, 金属间化合物的厚度维持在 3.5 μm 。焊料与多晶铜焊点在热处理过程中生成的 Cu_5Zn_8 起到阻挡层的作用, 阻挡焊料与铜基板接触, 抑制 Cu_6Sn_5 生成, 热处理 300 h 后 Cu_5Zn_8 破碎分解, Cu_6Sn_5 在阻挡层消失后快速生长, 厚度约为 2.8 μm 。**结论** 单晶铜上焊点金属间化合物的厚度比多晶铜上金属间化合物的厚度多 0.7 μm , 热处理后合金焊料与单晶铜界面形成的金属间化合物致密性更好, 基本没有孔隙, 而合金焊料与多晶铜界面上金属间化合物晶粒间存在明显孔隙, 可以预测合金焊料与单晶铜界面的焊接质量更好。

关键词: Sn-1.5Ag-2Zn; 单晶铜; 合金焊料; 焊接; 扩散

中图分类号: TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)08-0406-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.08.036

Interface between Sn-1.5Ag-2Zn Low Silver Lead-free Solder and Oriented Copper

XIAO Jin, QU Fu-kang, CHENG Wei, LI Wu-chu

(Guangzhou Huali College, Guangzhou 511300, China)

ABSTRACT: High density packaging technology reduces the pad size and the number of grains contained in the pad. When the polycrystalline pad turns into a single crystal pad, the grain orientation has an important impact on the formation of the

收稿日期: 2022-06-19; 修订日期: 2022-10-26

Received: 2022-06-19; **Revised:** 2022-10-26

基金项目: 广州市科技计划基础与应用基础研究项目 (202102080571); 2021 年度增城区科技创新资金计划 (2021ZCMS11)

Fund: Guangzhou Science and Technology Plan Basic and Applied Basic Research Project (202102080571); 2021 Zengcheng District Science and Technology Innovation Fund Plan Project (2021ZCMS11)

作者简介: 肖金 (1982—) 女, 硕士, 主要研究方向为纳米材料。

Biography: XIAO Jin (1982-), Female, Postgraduate, Research focus: nano materials.

引文格式: 肖金, 屈福康, 程伟, 等. Sn-1.5Ag-2Zn 低银无铅焊料与取向铜界面研究[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 406-412.

XIAO Jin, QU Fu-kang, CHENG Wei, et al. Interface between Sn-1.5Ag-2Zn Low Silver Lead-free Solder and Oriented Copper[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 406-412.

intermetallic compounds at the interface. Sn-1.5Ag-2Zn, a promising solder alloy, was selected to study the interfacial reaction between solder and single crystal (111) copper substrate, and the growth kinetics of intermetallic was obtained. Sn-1.5Ag-2Zn lead-free solder was refluxed with single crystal (111) copper substrate and polycrystalline red copper substrate at 250 °C for 5 min, and the welded sample was heat-treated at 160 °C for 20 h, 100 h, 300 h and 600 h respectively. The microstructure, composition and properties of intermetallic at the welding interface were studied by Scanning Electron Microscope, Backscattered Electron Imaging, Secondary Electron Imaging, X-ray Diffraction (XRD) and Energy Dispersive Spectrometer. The uneven scallop like Cu_6Sn_5 intermetallic compound layer grew rapidly when the alloy solder contacted with the copper substrate. The Cu_6Sn_5 grain size formed on the surface of single crystal copper was larger than that of polycrystalline copper. Single crystal copper had no grain boundary to block atomic diffusion, which affected grain nucleation and growth. The growth rate of Cu_6Sn_5 formed by alloy solder and the single crystal (111) copper solder joint after heat treatment at 160 °C for 20 h was about twice that of the polycrystalline copper solder joint. Then, it grew slowly with the increase of heat treatment time. After 600 h of heat treatment, the thick layer of Cu_6Sn_5 broke due to crack diffusion, and the thickness of intermetallic compound remained at 3.5 μm . Cu_5Zn_8 generated at the solder and polycrystalline copper solder joint during heat treatment acted as a barrier layer, preventing the solder from contacting the copper substrate and inhibiting the formation of Cu_6Sn_5 . After 300 h of heat treatment, Cu_5Zn_8 was broken and decomposed, and Cu_6Sn_5 grew rapidly after the barrier layer disappeared, with a thickness of about 2.8 μm . The thickness of intermetallic compound of solder joint on single crystal copper is 0.7 μm more than that on polycrystalline copper. After heat treatment, the intermetallic compound formed at the interface between alloy solder and single crystal copper has better compactness and basically no pores, while there are obvious pores between intermetallic compound grains at the interface between alloy solder and polycrystalline copper, which can predict that the welding quality of the interface between alloy solder and single crystal copper is better.

KEY WORDS: Sn-1.5Ag-2Zn; single crystal copper; alloy solder; welding; diffusion

共晶锡铅焊料熔点低、成本低、性能优良,曾普遍应用于电子封装领域。然而电子产品中锡铅焊料分解出的铅污染环境会威胁人类健康,且锡铅焊料热工作性差,抗蠕变能力差,无法满足封装技术发展要求。研究者一直在寻找能媲美锡铅焊料性能的无铅焊料^[1-2]。由于 Sn 熔点约 232 °C,润湿性能良好,故一般无铅焊料中的锡含量常高于 90%。Sn-Ag 系焊料目前公认是最理想的无铅焊料,比 Sn-Pb 焊料强度高、抗蠕变性更强,但焊料熔点高,成本高^[3-6]。很多研究通过在 Sn-Ag 焊料中添加 Cu、Zn、Ni、Bi 等组元提高润湿性,降低熔点^[7-10]。Sn-3.5Ag 是最常用的无铅焊料,其 Ag 含量高,成本高。其中银成本占了焊料成本的一半以上。焊料老化后焊点处金属化合物 Ag_3Sn 、 Cu_6Sn_5 呈粗大板条状,脆性大,影响可靠性^[11-13]。低银含量焊料可以降低焊料成本,同时带来熔融性和强度下降的问题^[14-15]。HAMMAD 等^[16-17]发现焊点处颗粒状 Ag_3Sn 能提高焊料机械强度,层片状 Ag_3Sn 塑性变形差。Sn-Ag 焊料中加入微量添加剂 Zn 形成 Sn-Ag-Zn 焊料,锡成本低,环境友好,润湿性好。有报道称添加 Zn 可以改变枝晶组织,在基体中形成更细的共晶^[18-19]。RAMOS 等^[20-21]发现在 SAC 305 焊料中添加 0.1~0.7% 的 Zn 作为合金元素可以减少过冷度,抑制大型 Ag_3Sn 板金属间化合物的形成。WEI 等^[22]人的研究表明添加 0.1~0.3% 的 Zn 微粒后,金属间化合物的厚度略有下降。添加 0.3% 的锡不会

影响拉伸和冲击强度,然而进一步添加则会使其恶化,当锡焊料增至 0.9% 时,蠕变抗力不断提高^[23]。

随着封装密度增加,焊料接触铜层将由多晶体缩小为单晶体,金属间化合物晶粒成为 3D 封装中的关键问题, Cu_6Sn_5 金属间化合物晶粒的形态取决于 Cu 层的取向。铜的晶粒取向对界面金属间化合物的形貌以及位相有重要影响,形态和取向具有高度各向异性特性的界面 Cu_6Sn_5 晶粒将显著影响微焊点的可靠性^[24]。QIAO 等^[25]研究铅-锡焊料与单晶铜的固液界面,发现 Cu_6Sn_5 晶粒生长方式与取向铜晶面有关。MA 等^[26]研究了 Sn-Ag-Cu 焊料与 (001) 取向铜生成的 Cu_6Sn_5 形貌及位相,在回流焊不同阶段实现对 Cu_6Sn_5 取向、尺寸的控制。DONG 等^[27-28]采用多次回流焊工艺,发现 Sn-3Ag 焊料与 (001) Cu 单晶界面通过晶粒旋转和吞并形成取向优选的 Cu_6Sn_5 , Cu_6Sn_5 形貌从扇形向小面转变,有利于提高焊点的可靠性。

综合低银焊料成本优势、熔融性、润湿性能,选择具有发展前景的 Sn-1.5Ag-2Zn 焊料,将 Sn-1.5Ag-2Zn 合金焊料与取向单晶铜基板进行焊接,将焊点在 250 °C 回流、不同热处理条件下焊点与不同基板界面处金属间化合物种类和性能进行观察和研究。

1 实验材料与方法

选择商业 (111) 取向铜圆棒 ($\phi 20$ mm), 采用

线切割切成厚度为 1 mm 的铜片, 用 800#, 1 200#, 1 600#, 2 000#砂纸依次打磨, 用金刚石研磨膏抛光, 丙酮除油, 超纯水清洗后吹干备用。

高纯度 (99.99%) 锡粒、银粒和锌粒采用直接熔炼法获得 Sn-Ag-Zn 焊料。将原材料按一定质量配比加入刚玉坩埚中熔化, 熔化温度设置为 650 °C, 保温时间为 40 min, 每 4 min 搅拌一次, 使合金液体成分均匀。保温过程中, 合金液上方覆盖 LiCl-KCl 盐防止液体蒸发和氧化, 冷却后获得一定成分合金焊料。用电子天平称取 0.5 g 合金焊料, 将其放入 260 °C 的松香液体中, 防止其氧化, 焊料熔化后由于表面能作用形成球状, 在淬火油中冷却获得合金焊球。将焊球除油清洗后备用。

将制备好的 0.5 g 焊球蘸取少量松香助焊剂后置于铜片上, 铜片有 2 种, 一种是上述制备好的取向单晶铜片 ($\phi 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$), 另一种是商用多晶紫铜片 (规格 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)。将铜片置于恒温加热板上加热至 250 °C, 焊接时间设置为 5 min, 如图 1 所示。待试样冷却到室温后用丙酮清洗除油。将焊后试样置于恒温干燥箱中加热, 温度设定为 160 °C, 老化时间分别为 20 h, 100 h, 300 h, 600 h。

将回流焊和老化后的焊点垂直切片后冷镶制成截面试样, 用 800#、1 200#、1 600#和 2 000#砂纸依次打磨, 用金刚石研磨膏抛光, 抛光后用无水乙醇冲洗吹干保存。

制备俯视形貌试样时用砂纸预打磨多余焊料至薄层, 然后将试样放入金相腐蚀液中腐蚀 (10%硝酸溶液) 直至界面处的金属间化合物完全裸露出来, 清洗吹干。用场发射扫描电子显微镜 (日立 Regulus 8100) 背散射电子成像 (BSE) 和二次电子成像 (SE)、

能谱仪 (赛默 EscaLab 250Xi)、X 射线多晶衍射仪 (布鲁克 D8 Advance) 观察界面形貌, 定量分析界面处组织成分以及元素分布。

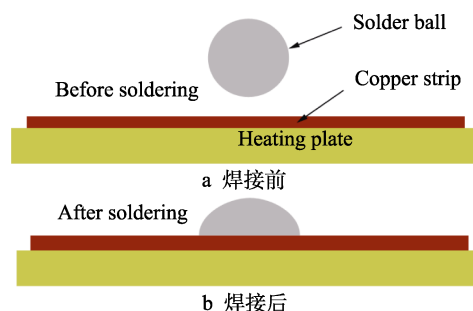


图 1 合金焊料与铜基板焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding of alloy solder and copper substrate: a) before welding; b) after welding

2 结果与分析

2.1 焊料与不同铜基板界面形貌

多晶、(111) 取向单晶铜基板与 Sn-1.5Ag-2Zn 在 250 °C 下, 回流时间 5 min 的界面形貌示意图, 见图 2。

发现多晶铜上的金属间化合物层较平坦, 厚度约 1.4 μm , (111) 取向单晶铜上的金属间化合物层有短棒状凸起结构, 厚度约为 2 μm 。单晶铜没有晶界阻碍原子扩散, 金属间化合物长大的速率较快。

通过对图 2 中点 1 和点 2 的 EDX 分析 (如表 1 所示), 发现焊料与铜基板界面的金属间化合物都是 Cu_6Sn_5 , 图 2 界面上的衬度也说明只形成了 1 种金属间化合物。

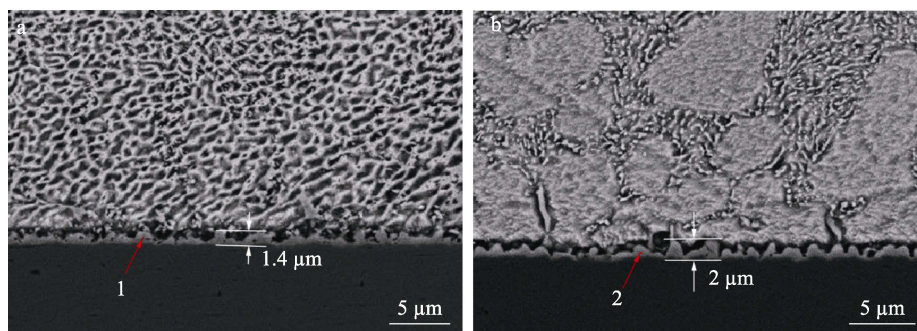


图 2 合金焊料 250 °C 与不同铜基板回流 5 min 的界面形貌 (a) 多晶铜和 (b) (111) 单晶铜

Fig.2 Interface morphology of alloy solder refluxed with different copper substrates at 250 °C for 5 min (a) polycrystalline red copper and (b) single crystal (111) copper

表 1 图 2 中 EDX 分析结果
Tab.1 EDX analysis results in Fig.2

Point code	Atomic/%				Phase identification
	Sn	Ag	Zn	Cu	
1	49.32	1.31	1.13	48.24	Cu_6Sn_5
2	45.24	2.14	3.28	49.34	Cu_6Sn_5

图 3a—3b 为多晶、(111) 取向单晶铜基板与 Sn-1.5Ag-2Zn 在 250 °C 下, 回流时间 5 min 的俯视形貌示意图。从图中发现, 焊料与多晶铜界面生成的 Cu_6Sn_5 金属间化合物的晶粒直径约 1.5 μm , 而焊料与 (111) 单晶铜界面生成的 Cu_6Sn_5 金属间化合物的晶粒直径明显比多晶铜界面的金属间化合物要大, 约

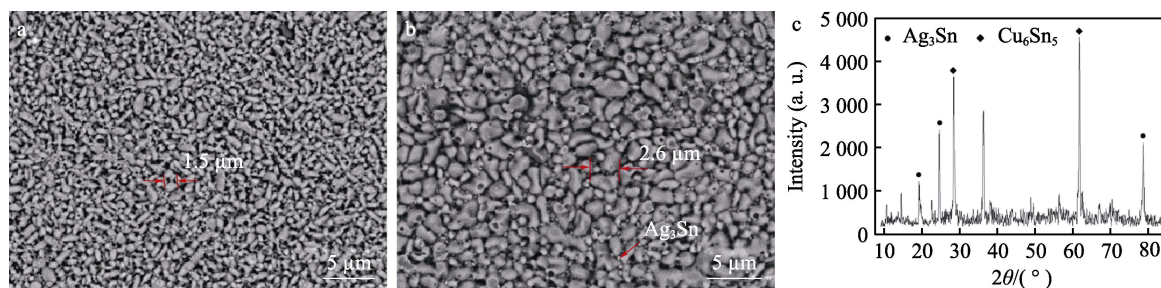


图 3 合金焊料 250 °C 与不同铜基板回流 5 min 的俯视形貌(a) 多晶铜、(b) (111) 单晶铜和 (c) 焊料与单晶铜界面处 XRD 图谱

Fig.3 Top view of alloy solder refluxed at 250 °C with different copper substrates for 5 min (a) polycrystalline red copper, (b) single crystal (111) copper and (c) XRD pattern of interface between solder and single crystal copper

2.6 μm。这是由于单晶铜没有晶界而多晶铜有晶界, 晶界处存在界面能有利于形核, 单晶铜界面的形核率远低于多晶铜; 在 Cu_6Sn_5 金属间化合物的长大过程中伴随着原子扩散, 多晶铜中的晶界对原子扩散起阻碍作用, 而单晶铜无晶界阻碍原子扩散。这就造成了 Cu_6Sn_5 金属间化合物在不同铜基板上的晶粒尺寸差异性明显。图 3c 为合金焊料与 (111) 单晶铜形成的俯视界面进行 XRD 分析衍射图谱, 发现界面的金属间化合物有 Cu_6Sn_5 、 Ag_3Sn , 在图 3b 表面 Cu_6Sn_5 晶粒间存在白色的纳米级别小颗粒, 结合 XRD 分析, 应为 Ag_3Sn 小颗粒。

2.2 焊料与不同铜基板界面微观组织演变

为了研究 Sn-1.5Ag-2Zn 与多晶铜焊点处金属间化合物随着热处理时间变化的演化特点, 将 Sn-

1.5Ag-2Zn 与多晶铜焊点置于 160 °C 恒温干燥箱中, 分别时效处理 20 h、100 h、300 h 和 600 h, 图 4 为 160 °C, 不同热处理时间条件下, 焊点界面的组织演变形貌图。发现随着热处理时间增加, 原本凹凸不平的金属间化合物界面趋于平坦, 厚度增大。在 24 h 后, 界面处的金属间化合物出现分层结构。直至时效时间增加至 600 h, 金属间化合物的形貌都是在双层结构上演变。通过对图 4 中点 1—4 的 EDX 进行分析 (如表 2 所示), 发现 100 h 后, Ag_3Sn 覆盖在 Cu_5Zn_8 的上方, 厚度约 1.5 μm。在 300 h 后, Cu_5Zn_8 的厚度和平整度都比较稳定, 显然 Cu_5Zn_8 的存在限制了 Cu_6Sn_5 的生长。在 600 h 后, Cu_5Zn_8 分解, 生成 Cu_6Sn_5 。热处理 600 h 后生成的金属间化合物 (Ag_3Sn , Cu_6Sn_5) 厚度约为 2.8 μm。

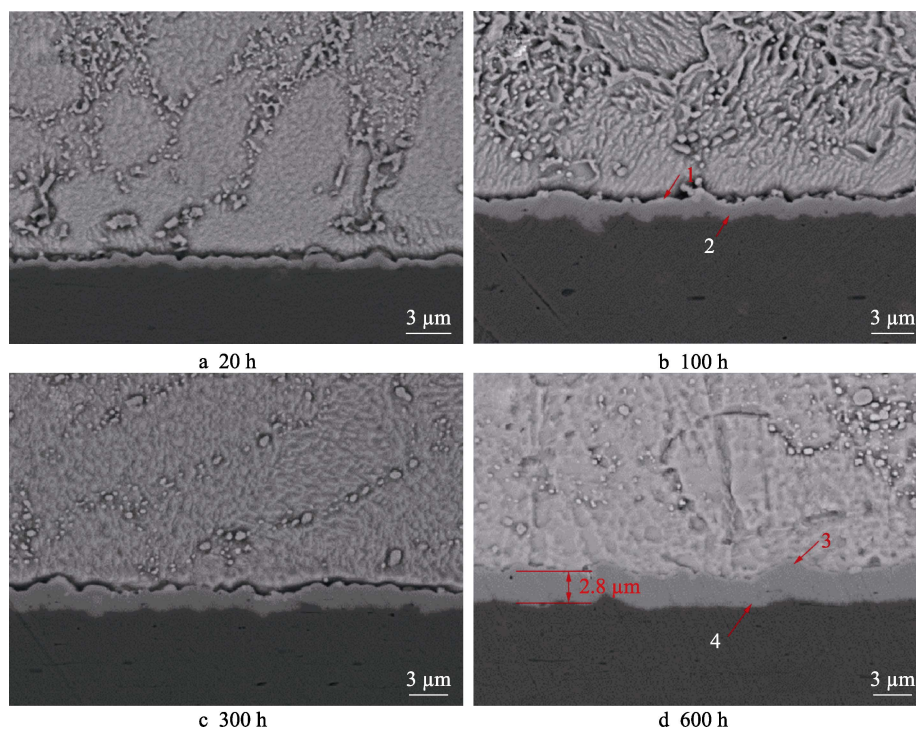


图 4 合金焊料/多晶铜焊点 160 °C, 不同热处理时间组织形貌

Fig.4 Microstructure of alloy solder/polycrystalline copper solder joint at 160 °C for different heat treatment time: a) 20 h; b) 100 h; c) 300 h; d) 600 h

表 2 图 4 中 EDX 分析结果
Tab.2 EDX analysis results in Fig.4

Point code	Atomic/%				Phase identification
	Sn	Ag	Zn	Cu	
1	19.98	20.88	27.72	31.42	$\text{Ag}_3\text{Sn}+\text{Cu}_5\text{Zn}_8$
2	1.12	3.16	62.05	33.67	Cu_5Zn_8
3	42.38	22.57	2.98	32.07	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Ag}_3\text{Sn}$
4	46.34	2.34	3.04	48.28	Cu_6Sn_5

为了进一步研究 Sn-1.5Ag-2Zn 与单晶铜焊点处金属间化合物随着热处理时间变化的演化特点,将 Sn-1.5Ag-2Zn 与单晶铜 (111) 焊点置于 160 °C 恒温干燥箱中,分别时效处理 20 h、100 h、300 h 和 600 h。

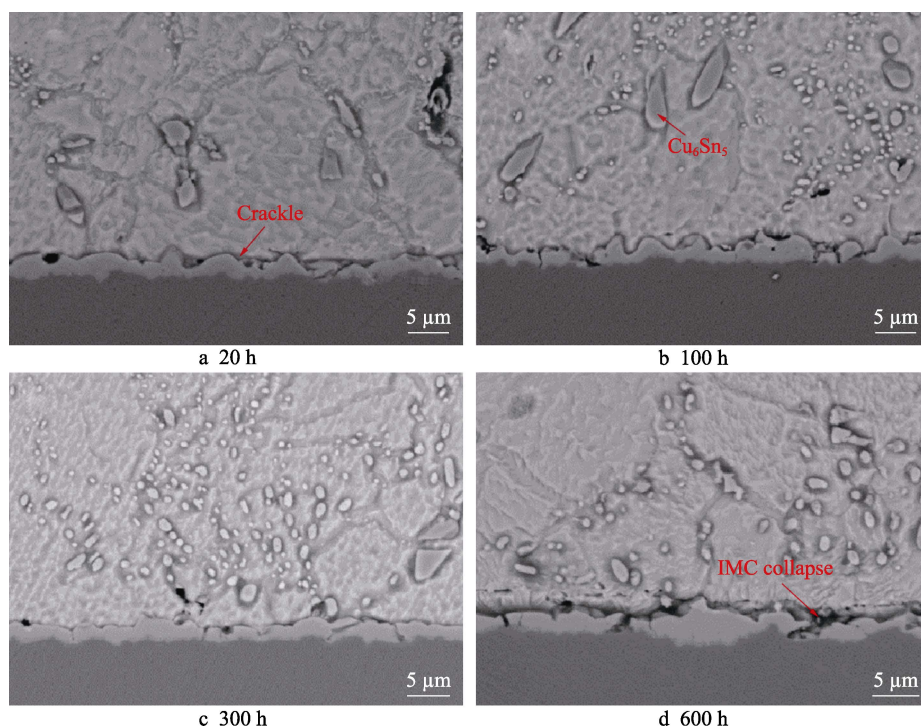


图 5 合金焊料/单晶铜 (111) 焊点 160 °C, 不同热处理时间组织形貌
Fig.5 Microstructure of alloy solder/single crystal copper (111) solder joint at 160 °C for different heat treatment time: a) 20 h; b) 100 h; c) 300 h; d) 600 h

表 3 160 °C, 不同热处理时间下的金属间化合物厚度
Tab.3 Thickness of intermetallic compound at 160 °C for different heat treatment time

Heat treatment time/h	IMC thickness average/ μm
20	2.87
100	2.98
300	3.30
600	3.47

图 6 为合金焊料与单晶铜 (111) 焊点在 160 °C 下热处理 20 h 后界面的俯视形貌组织图。发现经过时效处理后, Cu_6Sn_5 晶粒明显长大, 晶粒之间的晶界分明, 热处理前凹凸不平的金属间化合物层经过扩散

图 5 为 160 °C 时, 不同热处理时间条件下, 焊点界面的组织演变形貌图。由图 5 可发现, 焊料内部处的 Cu_6Sn_5 呈大块状, 焊接界面处快速形成 Cu_6Sn_5 金属间化合物, 其厚度随着热处理时间的增加有所增加, 但生长缓慢。在热处理 300 h 后, 界面金属间化合物的厚度约为 3.3 μm 。

在 160 °C 下, 不同热处理时间, 每组选 6 个样品取平均值后获得的金属间化合物 (IMC) 厚度统计表, 见表 3。可以推测长时间热处理后焊接界面 IMC 厚度稳定在 3.5 μm 左右。热处理 20 h 后, 金属间化合物层上方开始出现明显裂纹, 主要是由于 IMC 呈硬脆特性, 受力容易产生裂纹。热处理 600 h 后, 裂纹急剧扩散, 焊接界面处厚层 IMC 出现溃断现象。

趋向平坦, 晶粒的高度基本一致, 高度差明显缩小, 致密度良好, 基本没有孔洞。在 Cu_6Sn_5 晶粒间弥散分布 Ag_3Sn 小颗粒, 这是热处理前纳米 Ag_3Sn 小颗粒长大的结果。发现在 Cu_6Sn_5 晶粒上存在一些孔洞, 应为超声清洗时由于振动造成其上附着的 Ag_3Sn 颗粒脱落的结果。对比合金焊料与多晶铜、单晶铜界面上的金属间化合物层, 发现合金焊料与单晶铜界面形成的金属间化合物致密性更好, 基本没有孔隙, 而合金焊料与多晶铜界面上金属间化合物晶粒间存在明显孔隙, 可以预测合金焊料与单晶铜界面的焊接质量更好。

图 7 是合金焊料与不同铜基板界面间形成的金属间化合物的厚度与热处理时间的关系。横坐标为热

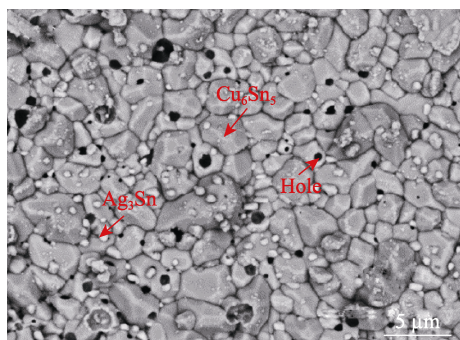


图 6 合金焊料/单晶铜 (111) 在 160 °C 热处理 20 h 后界面金属间化合物俯视形貌组织

Fig.6 Top view morphology and structure of intermetallic compound at the interface of alloy solder/single crystal copper (111) after heat treatment at 160 °C for 20 h

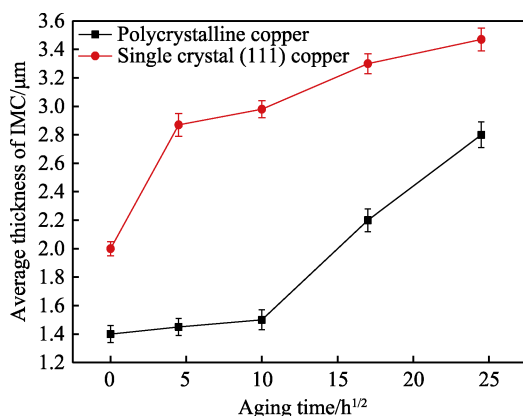


图 7 金属间化合物厚度与热处理时间的关系
Fig.7 Relationship between the thickness of the intermetallic compound and heat treatment time

处理时间的平方根,从图 7 中发现金属间化合物的厚度与热处理时间的平方根基本保持线性关系,符合扩散定律。在热处理时间为 0~20 h 内,单晶铜 (111) 的金属间化合物的生长速度明显比多晶铜上的金属间化合物的生长速度快,是多晶铜上的 2 倍左右。热处理时间 100 h 后,多晶铜上的金属间化合物的生长速度加快,应为 Cu_5Zn_8 阻挡层溶解所致。热处理时间 600 h 后,单晶铜 (111) 的金属间化合物的厚度比多晶铜上的略厚 0.7 μm 。

3 结论

1) Sn-1.5Ag-2Zn 合金焊料与铜基板接触后迅速生长出 1 层凹凸不平类似扇贝状 Cu_6Sn_5 金属间化合物。单晶铜表面形成的 Cu_6Sn_5 晶粒尺寸比多晶铜的大,主要是由于单晶铜没有晶界,对晶粒形核和长大有一定影响。

2) Sn-1.5Ag-2Zn 合金焊料与多晶铜基板焊点在 160 °C 热处理过程中生成 Cu_5Zn_8 金属化合物,某种程度上作为焊料与铜基板之间的阻挡层,抑制 Cu_6Sn_5 的生成,随着热处理时间增加, Cu_5Zn_8 金属化合物破

碎分解, Cu_6Sn_5 在阻挡层消失后快速生长。

3) Sn-1.5Ag-2Zn 合金焊料与单晶 (111) 铜基板焊点在 160 °C 下 20 h 短时热处理后,金属间化合物的生长速度是多晶铜基板上的 2 倍左右。而后快速形成 Cu_6Sn_5 金属间化合物厚度随着热处理时间的增加生长缓慢,厚度约为 3.5 μm 。热处理 600 h 后,因为裂纹扩张,厚层 IMC 出现溃断现象。

参考文献:

- [1] LAI Zhong-min, YE Dan. Effect of Cooling Method and Aging Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Sn-10Bi Solder Alloy[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(2): 1398-1407.
- [2] GUO Qin-han, ZHAO Zhen-jiang, SHEN Chun-long. Comparison Study on Microstructure and Mechanical Properties of Sn-10Bi and Sn-Ag-Cu Solder Alloys and Joints[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 78: 72-79.
- [3] TIAN Shuang, LI Sai-peng, ZHOU Jian, et al. Thermodynamic Characteristics, Microstructure and Mechanical Properties of Sn-0.7Cu-xIn Lead-free Solder Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 742: 835-843.
- [4] SAYYADI R, NAFFAKH-MOOSAVY H. Physical and Mechanical Properties of Synthesized Low Ag/lead-free Sn-Ag-Cu-xBi ($x=0, 1, 2.5, 5$ wt%) Solders [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 735: 367-377.
- [5] CHEN G, WANG X H, YANG J, et al. Effect of Micromorphology on Corrosion and Mechanical Properties of SAC305 Lead-free Solders[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 108: 113634.
- [6] SILVA B L, GARCIA A, SPINELLI J E. Complex Eutectic Growth and Bi Precipitation in Ternary Sn-Bi-Cu and Sn-Bi-Ag alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 691: 600-605.
- [7] EL-DALY A A, IBRAHIEM A A, ABDO M A, et al. Viscoplastic Characterization and Mechanical Strength of Novel Sn-1.7Ag-0.7Cu Lead-free Solder Alloys with Microalloying of Te and Co[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(14): 12937-12949.
- [8] TAN A T, TAN A W, YUSOF F. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Cu/SAC305/Cu Solder Joints Under the Influence of Low Ultrasonic Power[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 705: 188-197.
- [9] YAO Yao, YU Xue-mei. Thermal Cycling Aging Effects on the Tensile Property and Constitutive Behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Alloy[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(1): 867-875.
- [10] JATTAKUL P, MADSA T, SUNASUAN P, et al. Influence of Cooling Conditions on Microstructure and Mechanical

- Property of Sn-0.3Ag-0.7Cu Lead-free Solder[J]. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2021, 31(2): 129-136.
- [11] HU Xiao-wu, QIU Yu, JIANG Xiong-xin, et al. Effect of Cu_6Sn_5 Nanoparticle on Thermal Behavior, Mechanical Properties and Interfacial Reaction of Sn3.0Ag0.5Cu Solder Alloys[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(18): 15983-15993.
- [12] YIN Li-meng, ZHANG Zhong-wen, ZUO Cun-guo, et al. Microstructures and Properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Doped with Graphene Nanosheets[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(3): 1861-1867.
- [13] TUNTHAWIROON P, KANLAYASIRI K. Effects of Ag Contents in Sn-xAg Lead-free Solders on Microstructure, Corrosion Behavior and Interfacial Reaction with Cu Substrate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(8): 1696-1704.
- [14] CHEN H, CHOU T T, FLESHMAN C, et al. Investigating the Effect of Ag Content on Mechanical Properties of Sn-Ag-Cu Micro-BGA Joints[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(10): 6866-6871.
- [15] REN X L, WANG Y P, ZOU L J, et al. Effects of Size and Cooling Rate on Solidification Behavior of Freestanding Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Balls[J]. *Materials Characterization*, 2021, 182: 111530.
- [16] HAMMAD A E, RAGAB M. Achieving Microstructure Refinement and Superior Mechanical Performance of Sn-2.0Ag-0.5Cu-2.0Zn (SACZ) Solder Alloy with Rotary Magnetic Field[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 113: 113932.
- [17] ZHU T K, ZHANG Q K, BAI H L, et al. Improving Tensile Strength of SnAgCu/Cu Solder Joint through Multi-elements Alloying[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 29: 102768.
- [18] LI Yu-long, LIN Wei, LI Xue-wen, et al. Effects of Zn Contents on Microstructure, Thermodynamic Characteristic and Mechanical Properties of Sn-Bi-based Lead-free Solder[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33(4): 1741-1751.
- [19] ZENG Xian-wei, LIU Yi-chi, ZHANG Jian-kang, et al. Effect of Rare Earth Ce on the Thermal Behavior, Microstructure and Mechanical Properties of Zn-30Sn-2Cu High Temperature Lead-free Solder Alloy[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(19): 16437-16447.
- [20] RAMOS L S, REYES R V, GOMES L F, et al. The Role of Eutectic Colonies in the Tensile Properties of a Sn-Zn Eutectic Solder Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 776: 138959.
- [21] EID E A, EL-BASATY A B, DEGHADY A M, et al. Influence of Nano-metric Al_2O_3 Particles Addition on Thermal Behavior, Microstructural and Tensile Characteristics of Hypoeutectic Sn-5.0Zn-0.3Cu Pb-free Solder Alloy[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(4): 4326-4335.
- [22] WEI Yu-hang, LIU Ying-xia, ZHANG Lei, et al. Effects of Endogenous Al and Zn Phases on Mechanical Properties of Sn58Bi Eutectic Alloy[J]. *Materials Characterization*, 2021, 175: 111089.
- [23] ZHOU S Q, MOKHTARI O, RAFIQUE M G, et al. Improvement in the Mechanical Properties of Eutectic Sn58Bi Alloy by 0.5 and 1 wt% Zn Addition before and after Thermal Aging[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 765: 1243-1252.
- [24] QIAO Yuan-yuan, LIU Xiao-ying, ZHAO Ning, et al. Morphology and Orientation Evolution of Cu_6Sn_5 Grains on(001)Cu and(011)Cu Single Crystal Substrates under Temperature Gradient[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 95(36): 29-39.
- [25] QIAO Y Y, ZHAO N, LIU C Y, et al. Dramatic Morphological Reservation of Prism-type Cu_6Sn_5 Formed on Single Crystal Cu Substrates under Temperature Gradient[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 23: 100928.
- [26] MA H R, DONG C, CHEN J, et al. Mechanism and Control of Preferred Cu_6Sn_5 Growth on Single Crystal (001)Cu[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(8): 5966-5974.
- [27] DONG Chong, SHANG Min, MA Haoran, et al. Mechanism on the Nucleation of Orientation-preferred Cu_6Sn_5 at Different Temperatures and Solder Compositions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 896: 163157.
- [28] DONG Chong, SHANG Min, CHEN Fei, et al. Investigation on Growth of the Orientation-preferred Cu_6Sn_5 on (001) Cu during the Temperature-increased Multiple Reflow Process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 885: 161205.

责任编辑：蓝英侨