

引文格式: 武洋, 张志杰, 梁旺荣, 等. 激光焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的界面反应与剪切性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(9): 84 – 92. WU Yang, ZHANG Zhijie, LIANG Wangrong, *et al.* Interfacial Reaction and Shear Properties of Laser-Soldered Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P Microbumps[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(9): 84 – 92.



## 激光焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的界面 反应与剪切性能

武洋<sup>1</sup>, 张志杰<sup>2</sup>, 梁旺荣<sup>2</sup>, 陈雷达<sup>1</sup>

(1. 珠海天成先进半导体科技有限公司, 珠海, 519005; 2. 江苏科技大学, 材料科学与工程学院, 镇江, 212003)

**摘要:** 激光焊因局部加热、快速、免助焊剂和易自动化等优势, 在微凸点连接领域备受关注, 文中对比研究了激光焊与回流焊工艺及回流次数对微凸点微观组织和剪切性能的影响, 结果表明, 激光焊微凸点界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 金属间化合物 (IMC) 层较薄, 呈松散颗粒状; 随激光能量增加, IMC 略增厚; 多次回流后转变为密集短棒状, 回流焊微凸点初始 IMC 较厚呈针状, 多次回流后变为不规则块状或长棒状, IMC 形貌与其固溶 Ni 含量密切相关, Ni 原子分数含量在 7.02% ~ 10.13% 是颗粒状向棒状转变的临界范围, 剪切性能测试表明, 无论初始态还是多次回流态, 激光焊微凸点 (尤其 7.5 mJ 能量下制备) 的平均剪切力始终高于回流焊微凸点, 体现了其更优的界面可靠性。

**创新点:** (1) 对比激光焊和回流焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的界面反应和剪切性能。

(2) 对比不同焊接方法得到的 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点再经历多次回流焊后的界面反应和剪切性能。

(3) 基于 Jackson 参数  $\alpha$  估算 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 由颗粒状转变为棒状时 Ni 的临界值范围在 7.02% ~ 10.13%。

**关键词:** Sn3.0Ag0.5Cu; 激光焊; 回流焊; 界面反应; 剪切力

**中图分类号:** TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240628001

## Interfacial Reaction and Shear Properties of Laser-Soldered Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P Microbumps

WU Yang<sup>1</sup>, ZHANG Zhijie<sup>2</sup>, LIANG Wangrong<sup>2</sup>, CHEN Leida<sup>1</sup>

(1. Tiancheng Advanced Semiconductor Technology Co., Ltd., Zhuhai, 519005, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212003, China)

**Abstract:** Laser welding has garnered significant attention in the field of microbump interconnections due to its advantages such as localized heating, rapid processing, flux-free operation, and ease of automation. A comparative study was conducted on the effects of laser welding and reflow welding processes, as well as the number of reflows, on the microstructure and shear properties of microbumps. The results indicate that the interfacial (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> intermetallic compound (IMC) layer in laser-soldered microbumps is relatively thin and exhibits a loose particulate morphology. With increasing laser energy, the IMC layer slightly thickens, and after multiple reflows, it transforms into dense short rod-shaped structures. Reflow-soldered microbumps initially feature a thicker and needle-like IMC layer, which evolves into irregular blocky or elongated rod-shaped structures following multiple reflows. The morphology of the IMC is closely related to its solid-solution Ni content, with a critical range of 7.02 at.%–10.13 at.% Ni content marking the transition from particulate to rod-like formations. Shear performance tests demonstrate that, both in the initial state and

收稿日期: 2024-06-28; 录用日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52475361); 江苏省自然科学基金项目 (BK20180987)

after multiple reflows, laser-soldered microbumps (particularly those fabricated at 7.5 mJ energy) consistently exhibit higher average shear forces compared to reflow-soldered microbumps, highlighting their superior interfacial reliability

**Highlights:** (1) The interfacial reactions and shear resistance properties of Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P microbumps in laser welding and reflow welding were compared.

(2) The interfacial reactions and shear resistance properties of Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P microbumps obtained by different welding methods after multiple reflow welding were compared.

(3) Based on the Jackson parameter  $\alpha$  estimation, the critical value range of Ni when  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC changes from particulate to rod-shaped formation was estimated to be 7.02%–10.13%.

**Key words:** Sn3.0Ag0.5Cu; laser welding; reflow welding; interfacial reaction; shear force

## 0 序言

目前, 芯粒 (Chipsets) 异构集成技术可将多个不同类型与功能的小芯片在三维 (3D) 方向上实现灵活的模块化整合与系统芯片集成, 有望成为“后摩尔时代”的主角<sup>[1-4]</sup>. 此时, 如何实现芯片的高可靠性互连是目前需要解决的核心问题, 考虑到不同电子元器件的耐热性存在差异, 选用不同熔点的钎料按钎料熔点由高到低进行顺序回流焊是目前常用的连接方案, 但重复与长时间的加热会导致焊点界面脆性 IMC 的过度生长, 影响焊点的力学可靠性, 并有可能对器件造成热损伤<sup>[5]</sup>. 相比于传统的回流焊工艺, 激光焊工艺具有局部非接触快速加热和冷却等特点, 可有效避免焊接过程中热量积聚带来的热损伤和热应力等问题<sup>[6-8]</sup>, 被广泛应用于电子器件点焊和密封焊接过程中<sup>[9]</sup>. 与传统的回流焊工艺不同, 激光焊工艺下焊点温度的快速变化与极短的热反应时间会影响其界面 IMC 的厚度、形貌以及钎料的微观组织, 进而影响到焊点的服役可靠性, 值得进行深入研究.

Sn3.0Ag0.5Cu 钎料具有良好的润湿性与优异的可焊性, 是激光焊中常用的钎料成分. YANG、RAHIM、LEE 和 NISHIKAWA 等人<sup>[10-14]</sup> 对激光焊和回流焊 Sn-Ag-Cu/Cu 微凸点的界面反应和抗剪性能进行了比较研究, 发现激光焊形成薄而平坦的 IMC 层, 而回流焊形成的 IMC 层相对厚而不均匀, 并且在特定的激光参数下激光焊微凸点的抗剪强度较高, 但经等温时效处理后激光焊微凸点的抗剪强度下降到与回流焊微凸点的类似水平; AN 等人<sup>[15]</sup> 研究了激光焊参数对 Sn-Ag-Cu/Cu 界面反应的影响, 发现随着激光能量的增加,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  晶粒的形貌演变过程为表面光滑的扇贝状→表面有小平面的扇贝状→棱晶状→板状; TIAN 等人<sup>[16]</sup>

研究了激光参数对 Sn3.5Ag0.5Cu 和 Sn3.5Ag 焊点特性的影响, 发现 IMC 层的厚度随着激光能量输入的增加而增加, 并且受激光功率的影响大于受焊接时间的影响. 由此可见, 激光焊工艺参数作为界面反应中的敏感条件, 显著影响微凸点的可靠性.

目前关于 Sn3.0Ag0.5Cu 微凸点激光焊大多以 Cu 为凸点下金属层 (under bump metallization, UBM). 化学镀 Ni-P 层具有优异的扩散阻挡性, 已广泛应用在微电子封装技术中<sup>[16-18]</sup>, 然而, 目前对以 Ni-P 为 UBM 的激光焊微凸点的研究较少. 再者, 芯片上通过激光焊植入微凸点后, 再进行下一级封装过程中, 势必需要经历多次回流过程, 而对于微凸点激光焊后再多次回流的研究还鲜有报道. 因此, 文中选用 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料球, 以 Ni-P 作为 UBM, 对比研究初始激光焊和回流焊微凸点的界面反应及抗剪性能, 随后对 2 种焊接方法获得的微凸点再经历多次回流, 对其界面 IMC 形貌及抗剪性能进行研究, 揭示 2 种焊接工艺得到的微凸点及回流后微凸点界面 IMC 的转变机理.

## 1 试验方法

选用无铅钎料焊球 Sn3.0Ag0.5Cu 作为焊接材料, 其熔点为 217 °C, 直径为 100  $\mu\text{m}$ , 所用硅基转接板 (10.54 mm  $\times$  10.54 mm) 上具有直径为 90  $\mu\text{m}$  的化学镀 Ni-P UBM, UBM 上 Ni-P 镀层的厚度约为 5  $\mu\text{m}$ , 其上溅射有约 0.1  $\mu\text{m}$  的 Au 层用于保护 Ni 免受氧化, 试验示意图, 如图 1 所示. 试验中使用 Nd: YAG 固体激光器 (m-nano-20-100-mj-PR13) 进行激光焊接, 激光能量分别设置为 6.5、7.5 和 8.5 mJ, 激光焊接工艺见图 1(b). 同时使用热风回流焊机制备回流焊微凸点, 进行对比研究. 为

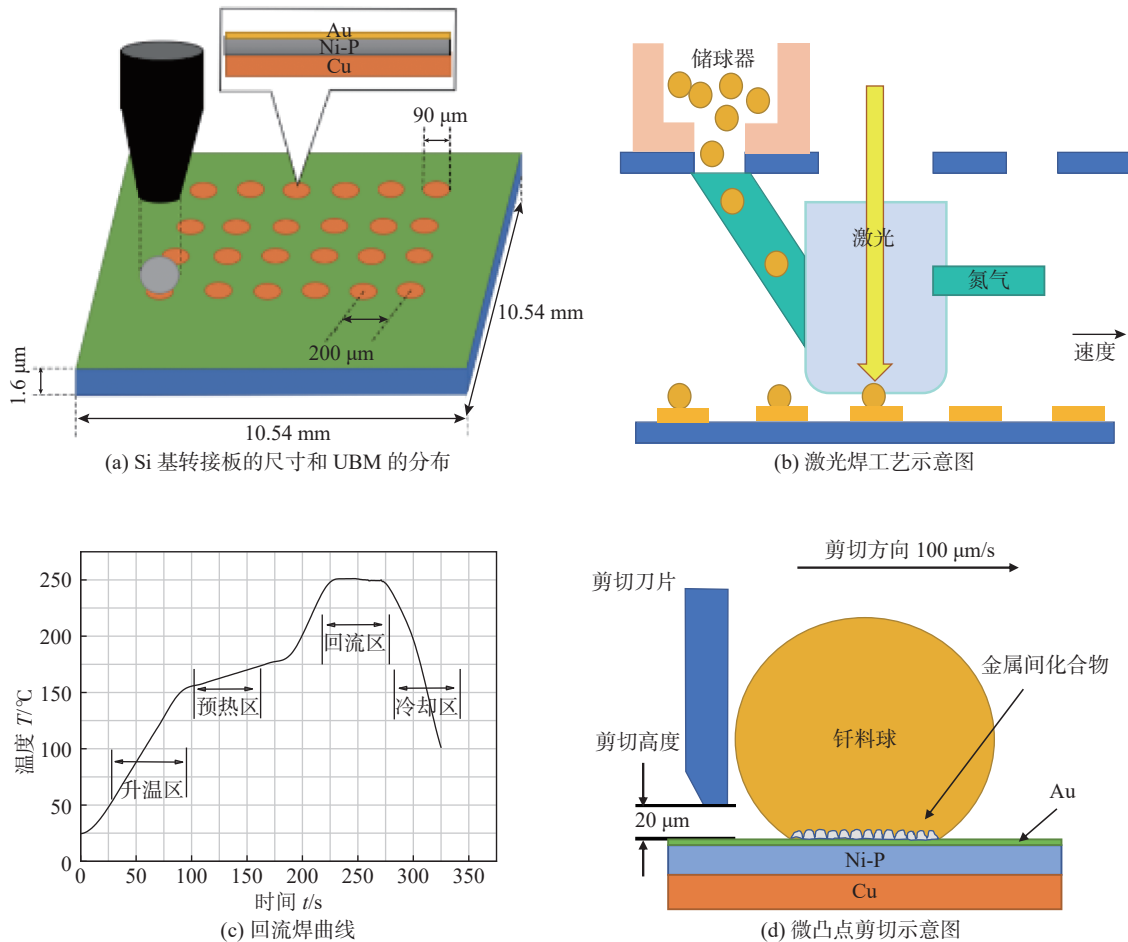


图1 Si基转接板的尺寸和UBM的分布、激光焊工艺示意图、回流焊曲线及微凸点剪切示意图

Fig. 1 Size of Si based interposer and distribution of pad. (a) size of Si based interposer and distribution of pad; (b) schematic of laser assisted bonding process; (c) reflow profile; (d) profile schematics of shear testing.

为了评估回流次数对焊点组织和性能的影响,对激光焊与回流焊制备的微凸点分别进行了1次、3次和5次回流,回流峰值温度为250℃,回流时间设置为50s,回流曲线见图1(c).

使用环氧树脂将初始与多次回流后的微凸点进行镶嵌,依次使用800号、1200号、2000号和4000号砂纸以及粒度为1.5 μm的金刚石研磨膏对微凸点进行打磨和抛光.使用配备X射线能谱仪(energy dispersive X-Ray spectroscopy, EDX)的JSM-6480型钨灯丝扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)观察微凸点的界面IMC形貌并分析其成分.使用2% HCl和5% HNO<sub>3</sub>腐蚀样品20分钟溶解溶解焊料,观测界面IMC的顶部图像.对于每个条件下的微凸点,使用PTR-1102抗剪测试仪对10个焊球进行抗剪测试,剪切高度为20 μm,抗剪速度为100 μm/s,剪切示意图见图1(d),获得的剪切力数据去除最大值和最小值后取平均值.

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 初始 Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu/Ni-P 微凸点的界面微观组织

初始激光焊和回流焊 Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu/Ni-P 微凸点的界面微观组织和去除钎料后界面 IMC 的顶部 SEM,如图2所示.不同焊接方法得到的初始微凸点界面 IMC 的厚度及形貌存在显著差异.激光焊后界面 IMC 为颗粒状,随着激光能量的增加其颗粒度和厚度稍有增加,平均厚度约为 0.5 μm;回流焊后界面 IMC 为尺寸较大的针状,其厚度约为 1.3 μm.由于 UBM 最上面的 Au 层较薄(0.1 μm),焊接过程中 Au 层迅速溶解到焊料中,之后 Ni-P 层与熔融的 Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu 焊料发生冶金反应,在界面处形成一层 Cu-Sn-Ni 三元界面化合物.经 EDX 检测,界面处和钎料内部的 IMC 均为 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>见表1,微凸点 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 形貌的不同主要是由

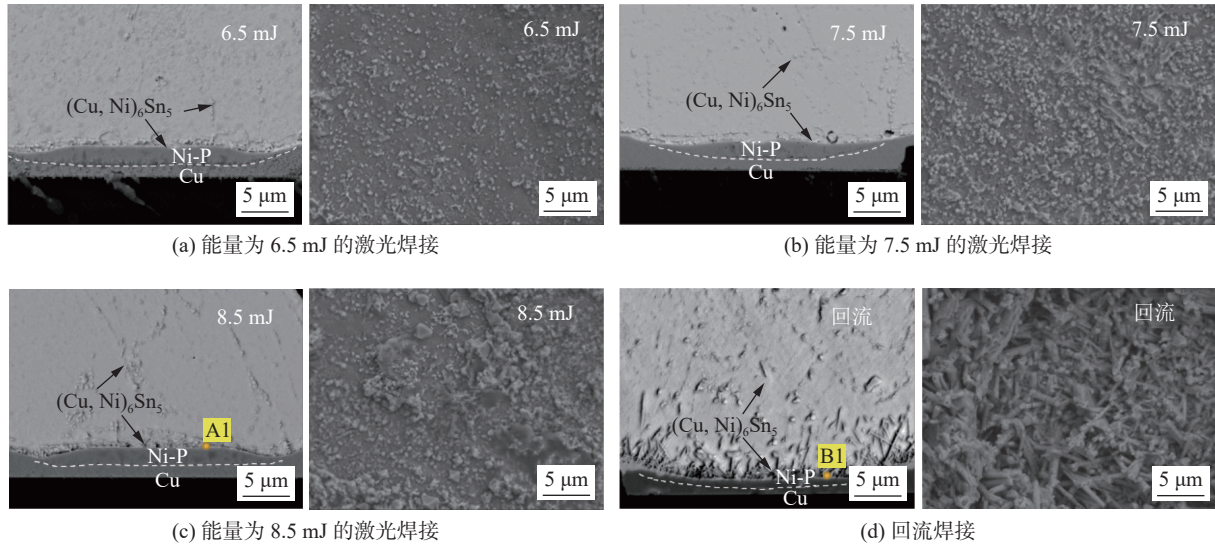


图 2 Ni-P/SAC 305 焊点界面 IMC 的横截面与俯视图扫描电镜图像

Fig. 2 Cross-sectional and top-view SEM images of the interfacial IMCs in Ni-P/SAC 305 joints. (a) laser soldering with 6.5 mJ; (b) laser soldering with 7.5 mJ; (c) laser soldering with 8.5 mJ; (d) reflow soldering.

表 1 由 EDX 测量获得不同位置 IMC 的成分 (质量分数, %) Table 1 Compositions of IMCs at different locations determined by EDX

样本	回流次数	焊接工艺	Sn	Ni	Cu	P	化合物识别类型
A1	0	激光焊	46.36	7.02	45.62	—	(Cu <sub>0.86</sub> Ni <sub>0.14</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
A2	1	激光焊	45.79	12.03	42.18	—	(Cu <sub>0.79</sub> Ni <sub>0.23</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
A3	5	激光焊	46.07	17.92	36.01	—	(Cu <sub>0.67</sub> Ni <sub>0.33</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
B1	0	回流焊	45.58	10.13	44.29	—	(Cu <sub>0.71</sub> Ni <sub>0.19</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
B2	1	回流焊	46.13	18.55	35.32	—	(Cu <sub>0.64</sub> Ni <sub>0.34</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
B3	5	回流焊	46.29	20.31	33.43	—	(Cu <sub>0.63</sub> Ni <sub>0.37</sub> ) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
C1	1	回流焊	—	73.56	—	26.44	Ni <sub>3</sub> P

于界面 IMC 中 Ni 固溶量不同所致<sup>[19]</sup>. 所有微凸点的钎料内部均存在小颗粒状 IMC, 其中激光焊微凸点的钎料中较少. 这是由于激光焊具有快速加热和冷却的特点, 熔融钎料与 Ni-P UBM 反应时间较短, 仅有少量 Ni 原子扩散进入钎料基体中形成 IMC; 而回流焊焊接时间较长, Ni-P 基体除了与钎料充分反应生成尺寸较大的针状 IMC 外, 还会有部分 Ni 原子扩散至钎料内部, 在冷却过程中以小颗粒 IMC 的形式析出.

### 2.2 多次回流后 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的微观组织演变

初始激光焊与回流焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点经历分别经历 1 次、3 次和 5 次回流后界面的微观组织演变, 如图 3 所示. 初始激光焊微凸点经历多次回流后, 其界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 的厚度发生显著的变化, 随着回流次数的增加其厚度逐渐增

大. 而初始回流焊微凸点在经历多次回流焊后界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 发生一定程度的融合生长, 厚度也有所增加. 在回流焊微凸点的 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 和 Ni-P UBM 之间生成一层黑色的相, 经 EDX 检测该相为 Ni<sub>3</sub>P 层见图 3(d). 由于大量的 Ni 原子从 Ni-P 层中扩散出去, 剩余的 Ni 原子与 P 原子结晶所致, 在此过程中没有其他原子互扩散填补 Ni 原子的位置, 因此, 这种不平衡扩散导致 Ni<sub>3</sub>P 层呈现多孔状形貌, 该多孔状 Ni<sub>3</sub>P 层将严重降低焊点的可靠性<sup>[20]</sup>.

多次回流后 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 的顶面, 如图 4 所示. 随着回流次数的增加, (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 的晶粒逐渐粗化. 初始激光焊微凸点再经历多次回流后界面 IMC 形貌由松散的颗粒状转变为密集的短棒状, 且随着激光能量的增加, 界面 IMC 的棒状结构越粗大; 而初始回

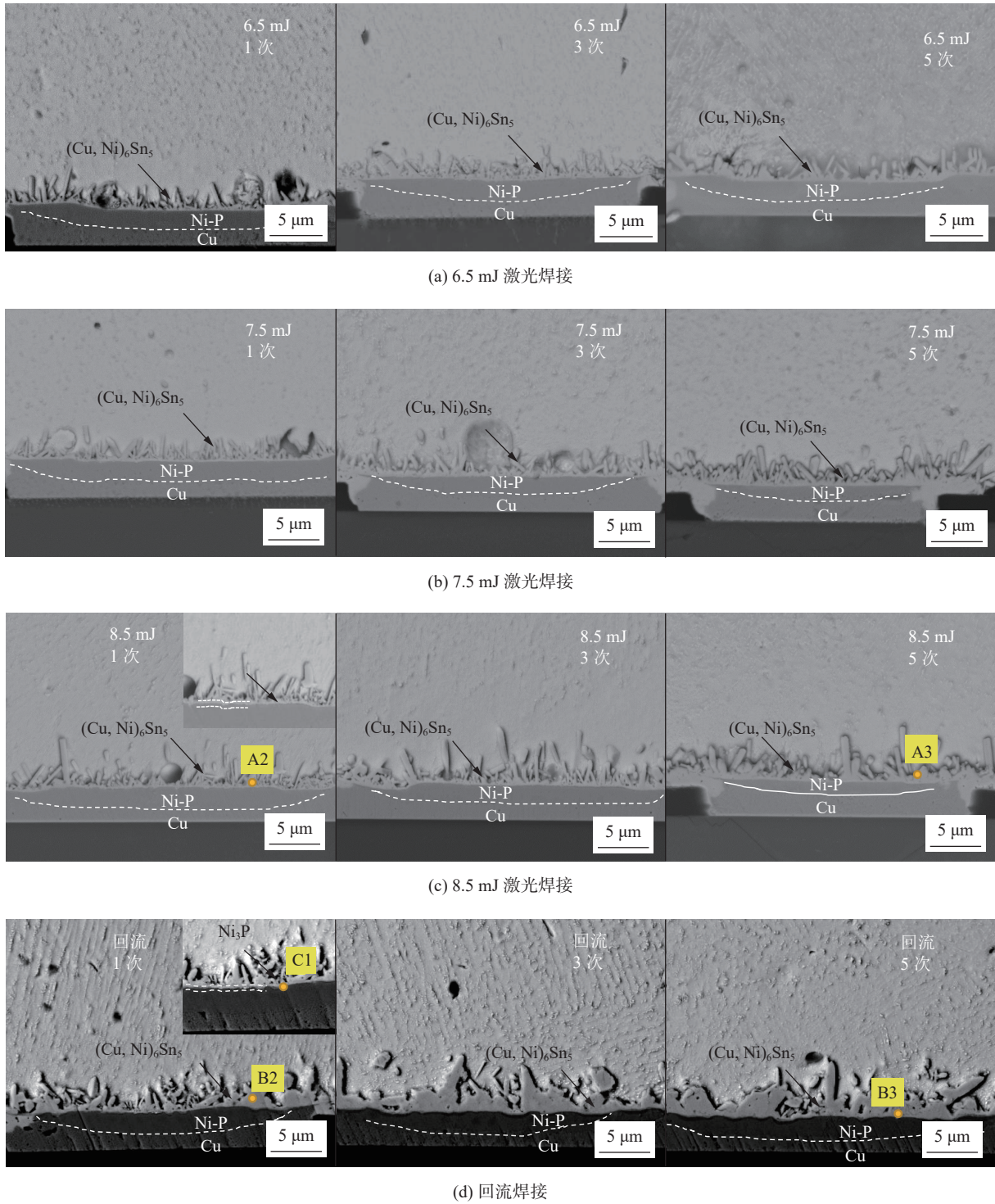


图 3 多次回流 (1 次、3 次及 5 次) 过程中界面 IMC 的横截面扫描电镜图像

Fig. 3 Cross-sectional SEM images of the interfacial IMCs during multiple reflow (1 time, 3 times and 5 times). (a) laser soldering with 6.5 mJ; (b) laser soldering with 7.5 mJ; (c) laser soldering with 8.5 mJ; (d) reflow soldering.

流焊微凸点在经历多次回流焊后界面 IMC 从初始的针状成长为不规则的块状及长棒状。

### 2.3 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的界面 IMC 生长动力学

Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点界面 IMC 厚度随着回流次数的变化关系曲线, 如图 5 所示。界面

IMC 的厚度借助 Photoshop 软件测定 IMC 层面积  $S$  和长度  $L$ , 将其面积与长度的比值记作 IMC 平均厚度。随着回流次数的增加, 微凸点界面 IMC 厚度不断增加, 且回流焊微凸点的界面 IMC 厚度始终大于激光焊微凸点的界面 IMC 厚度。在激光焊微凸点中, 高激光能量值下获得的微凸点界面 IMC 的

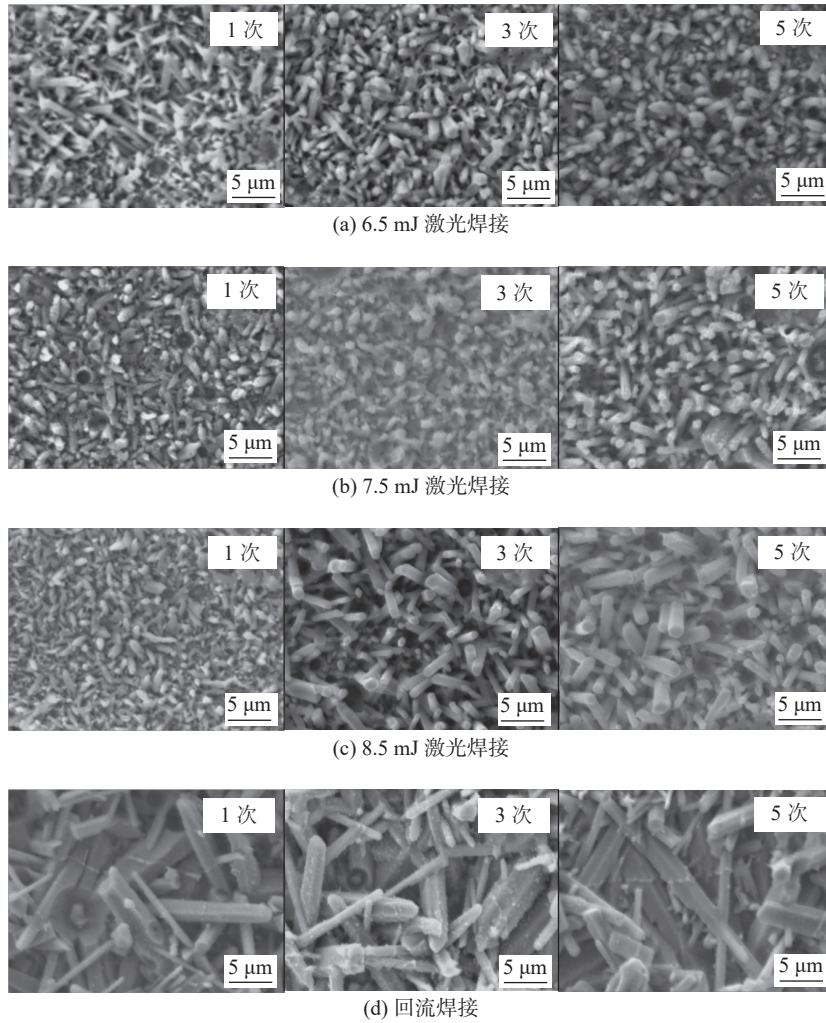


图 4 多次回流后 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 顶部 SEM 图

Fig. 4 Top-view SEM images of the interfacial IMCs during multiple reflow. (a) laser soldering with 6.5 mJ; (b) laser soldering with 7.5 mJ; (c) laser soldering with 8.5 mJ; (d) reflow soldering

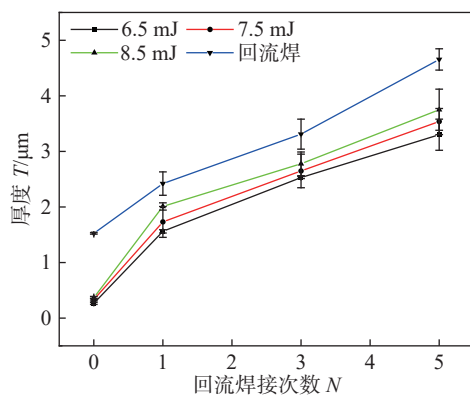


图 5 多次回流后微凸点界面 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 的厚度随回流次数变化图

Fig. 5 Thickness of interfacial (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMCs in the joints after multiple reflowing

厚度总是略高于低激光能量值下获得的微凸点界面 IMC 的厚度, 可见在一定激光工艺参数范围内, 激光能量值越高, 界面反应速度越快. 这归因于激

光输入能量值越高, 焊球吸收的热量值越高, 具体的过程影响如下.

为了讨论激光照射效率, 定义  $Q_{total}$  为总输入能量

$$Q_{total} = P \cdot t \quad (1)$$

式中:  $P$  为激光功率,  $t$  为激光加热时间, 假设激光照射强度为高斯分布, 记辐射到半径为  $r$  的钎料小球上的能量为  $Q_i$ .

$$Q_i = Q_{total} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}}\right) \quad (2)$$

式中:  $2\omega$  为  $1/e^2$  的激光脉宽, 约为  $1.699 \cdot \text{CDOT}$  EWHM(半高宽), 此外焊球吸收的热量也有所变化, 定义  $Q_{ball}$  为半径为  $r$  的焊球吸收的热量变化.

$$Q_{ball} = \frac{A}{100} \cdot Q_i \quad (3)$$

式中:  $A$  为钎料对激光的吸收率, 结合式 (1)~(3)

(3) 可得

$$Q_{ball} = \frac{A}{100} \cdot Q_{total} \cdot \left(1 - e^{-\frac{P \cdot t}{Q_{total}}}\right) \cdot P \cdot t \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 当同焊球尺寸条件下输入能量值越高, 其焊球吸收能量越高. 多次回流后微凸点界面  $(Cu,Ni)_6Sn_5$  IMC 的厚度随回流次数变化, 如图 5 所示. 在初始状态下, 回流焊微凸点 IMC 的厚度 ( $1.3 \mu m$ ) 约为激光焊微凸点 IMC 厚度 ( $0.5 \mu m$ ) 的约 3 倍, 经历 1 次回流焊后, 激光焊微凸点界面的 IMC 快速生长, 生长速度高于回流微凸点; 经历 3 次及 5 次回流焊后, 激光焊微凸点的界面 IMC 生长速度与回流焊相当, 但其厚度始终小于回流焊微凸点, 约小 20%. 可见, 相比与回流焊微凸点, 激光焊微凸点的 IMC 较薄, 可有望提高微凸点的服役可靠性.

### 2.4 不同焊接方法下 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点的剪切性能

两种焊接方法下, 初始及不同次数回流后微凸点平均最大剪切力随回流次数变化关系, 如图 6 所示. 随着回流次数的增加, 微凸点剪切力稍有下降, 且激光焊微凸点的最大剪切力总体大于回流焊微凸点的剪切力. 初始 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点中, 采用 7.5 mJ 激光能量值获得微凸点的剪切力明显高于其他条件下获得的样品.

在经历多次回流焊的微凸点中, 微凸点的平均最大剪切力稍有下降, 其中, 下降较为明显的是 8.5

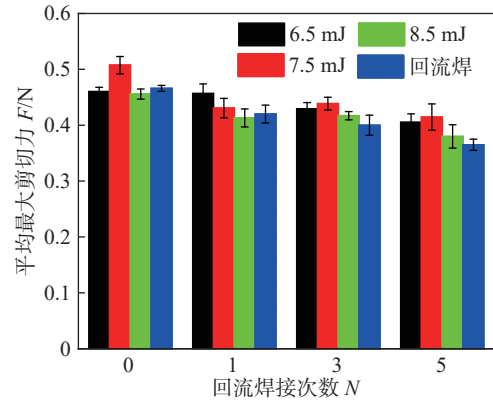


图 6 初始及不同次数回流后的微凸点最大剪切力随回流次数变化图

Fig. 6 Shear strength of the solder joints of as soldered and after multiple reflow

mJ 激光焊与回流焊微凸点. 最终经过 5 次回流后, 初始回流焊微凸点的平均最大剪切力为 0.36 N, 下降了 28%; 而 7.5mJ 激光焊微凸点的平均最大剪切力为 0.42 N, 只下降了 19%. 可见, 激光焊中采用合理的激光参数不仅可以有效降低界面 IMC 厚度, 还可以提高微凸点回流焊后的力学性能.

### 2.5 界面 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ IMC 的形貌演变机理

激光焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点经历多次回流焊后界面  $(Cu,Ni)_6Sn_5$  IMC 形貌由松散的颗粒状转变为密集的短棒状; 而回流焊 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点经历多次回流焊后界面  $(Cu,Ni)_6Sn_5$  IMC 从初始的针状成长为不规则的块状及长棒状结构, IMC 形貌转变, 如图 7 所示.

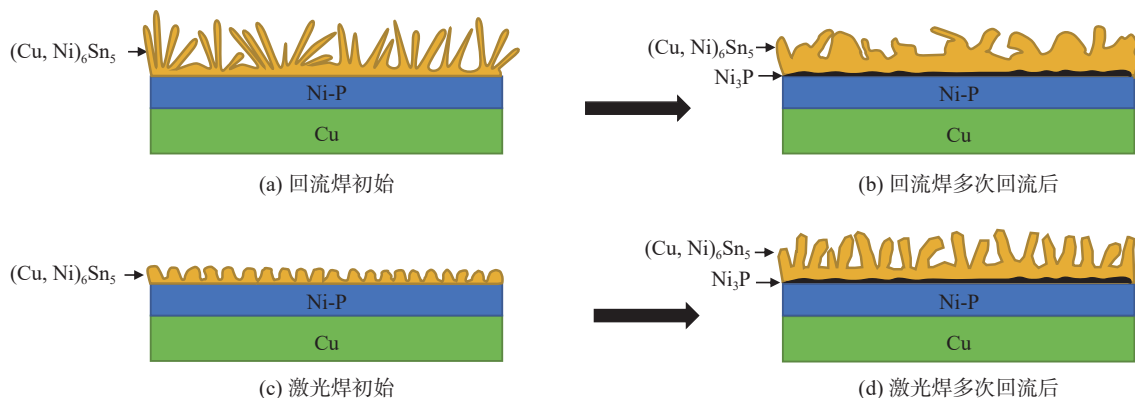


图 7 微凸点界面 IMC 在回流过程中的形貌演变示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the evolution of the microbump interface IMC during multiple reflow soldering. (a) initial reflow-soldered joints; (b) reflow-soldered joints after multiple reflow; (c) initial laser-soldered joints; (d) laser-soldered joints after multiple reflow

界面  $(Cu,Ni)_6Sn_5$  IMC 的形貌强烈依赖于 Jackson 参数  $\alpha$ ,  $\alpha$  是用于描述固溶体中固溶元素与基体元素相互作用强度的一个物理量<sup>[21]</sup>. 在金属材

料中, 当固溶元素与基体元素的相互作用强度较弱时, 固溶元素更容易从基体中分离出来形成析出物; 而当相互作用强度较强时, 固溶元素则更难从

基体中分离出来. 一般来说,  $\alpha$  值越大, 金属间键合能越弱, 金属间化合物的形貌越接近棒状, 而  $\alpha$  值越小, 金属间键合越强, 金属间化合物的趋于球状或颗粒状.

当  $\alpha > 2$  时,  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC 晶粒形貌为长的棒状形态, 而当  $\alpha < 2$  时,  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC 为短的颗粒状 (圆状颗粒) 形态<sup>[22]</sup>. Jackson 参数  $\alpha$  为<sup>[23-26]</sup>

$$\alpha = \zeta \frac{\Delta H_m}{R \cdot T_m} \quad (5)$$

式中:  $R$  为气体常数;  $T_m$  为界面反应温度;  $\zeta$  为界面的平面中最接近相邻原子总数的分数 (小于 1).  $\zeta$  对于 fcc, hcp 和 bcc 晶体结构的最大值是 0.5. 对于焊

$$\Delta H = (n_1 \Delta H_{f1} + n_2 \Delta H_{f2} + \dots + n_n \Delta H_{fn}) - (n'_1 \Delta H'_{f1} + n'_2 \Delta H'_{f2} + \dots + n'_n \Delta H'_{fn}) \quad (7)$$

式中:  $\Delta H_{f1}$ 、 $\Delta H_{f2}$ 、 $\dots$ 、 $\Delta H_{fn}$  是反应物的标准焓,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\dots$ 、 $n_n$  是反应物中每种物质的摩尔数, 标准焓是指在标准状态下, 单位摩尔物质的焓. 结果表明, 界面反应的焓变对  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  结构中 Ni 的溶解度非常敏感. 当 Ni 的原子占比达到 10% 时, 在 250 °C 下界面反应期间的焓变计算为 30 484 J, 对应的化合物  $(\text{Cu}_{0.82}\text{Ni}_{0.18})_6\text{Sn}_5$  计算的  $\alpha$  为 3.5 > 2, 对应的  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  晶粒形貌为棒状. 当 Ni 在  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  中的含量降低至 6% 时, 焓变值将急剧下降至 14 367 J, 对应计算的  $\alpha$  为 1.65 < 2, 对应的  $(\text{Cu}_{0.89}\text{Ni}_{0.11})_6\text{Sn}_5$  晶粒形貌为颗粒状. 有研究表明 Ni 在  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  中浓度可最高达到 20% 以上. 在实验中分别对激光焊与回流焊初始、回流 1 次、5 次的样品界面 IMC 中间部位做 EDS 点扫成分分析见表 1, 发现当 Ni 的原子占比为 7.02% 时, 金属间化合物的形貌趋于球状或颗粒状, 当 Ni 的原子占比为 10.13% 时,  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC 晶粒形貌已转变为针状或棒状, 发现形貌转变的 Ni 原子临界值范围为 7% ~ 10%.

### 3 结论

(1) 在初始焊后 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点中, 通过激光焊均形成松散的小颗粒状  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC, 而回流焊产生了长的针状  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC; 再经历多次回流的 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点中, 初始激光焊微凸点界面 IMC 转变为密集的短棒状, 而初始回流焊微凸点界面 IMC 成长为不规则

接过程,  $\Delta H_m$  为界面反应过程中产生的焓变, 焓变可以由界面反应期间的焓变化代替, 并且  $T_m$  可以变为钎焊温度  $T_{\text{soldering}}$ .

$$\alpha = \zeta \frac{\Delta H_m}{R \cdot T_{\text{soldering}}} \quad (6)$$

因此, 计算 Jackson 参数  $\alpha$  的关键是计算焓变  $\Delta H_m$ . 固溶体中溶质原子的量的变化可以引起反应的焓变. 计算反应产生的焓变需要知道反应前后的热力学状态, 包括反应物和产物的物质的量、温度、压力等. 根据热力学定律, 反应产生的焓变等于反应物的焓减去产物的焓. 在固溶体中, 如果溶质原子的量发生变化, 可以使用下面的公式计算反应产生的焓变

的块状及长棒状结构.  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC 形貌的转变与 Ni 的含量密切相关. 基于 Jackson 参数  $\alpha$  得到 IMC 由颗粒状转变为棒状 Ni 的临界值范围位于 7.02% ~ 10.13%.

(2) 回流焊微凸点 IMC 厚度约为激光焊微凸点 IMC 厚度的 3 倍; 随着回流次数的增加, 界面  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC 的厚度不断增加, 但激光焊微凸点界面 IMC 厚度总是比回流焊微凸点界面 IMC 厚度小约 20%. 并且激光焊工艺可有效抑制微凸点界面处  $\text{Ni}_3\text{P}$  的形成, 有望提升微凸点的可靠性.

(3) 随着回流次数的增加, 微凸点平均最大剪切力稍有下降, 且激光焊微凸点的最大剪切力总体大于回流焊微凸点的最大剪切力. 其中, 采用 7.5 mJ 的激光能量值进行激光焊的微凸点在初始与 5 次回流后均有较优的剪切力学性能. 对于初始采用 7.5 mJ 的激光能量值的激光焊参数焊接的 Sn3.0Ag0.5Cu/Ni-P 微凸点, 不仅可以有效降低微凸点界面 IMC 厚度, 在后续回流焊过程中的剪切性能与初始回流焊微凸点比也更优异.

### 参考文献

- [1] LAU J H. Recent advances and trends in advanced packaging[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Recent advances and trends in advanced packaging, 2022, 12(2): 228 - 252.
- [2] LI M J, BAKIR M S. 3-D Integrated chiplet encapsulation (3-D ICE): high-density heterogeneous integration using  $\text{SiO}_2$ -reconstituted tiers[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and

- Manufacturing Technology, 2021, 11(12): 2242 – 2245.
- [3] XUE L Y, LI X, ZHANG H. Thermal stress and drop stress analysis based on 3D package reliability study[J]. Microelectronics Reliability, 2023, 141: 114888.
- [4] 许居衍. 复归于道—封装改道芯片业 [J]. 电子与封装, 2019, 19(10): 1 – 3.  
XU Zhanyan. Back to basics: Advanced packaging reshapes the chip industry[J]. Electronics & Packaging, 2019, 19(10): 1 – 3.
- [5] 陈雷达, 武洋, 张志杰, 等. 激光辅助键合制备焊料微凸点的液固界面反应研究, 2022 年第 23 届国际电子封装技术会议 (ICEPT). IEEE 出版社, 2022: 1 – 5.  
Chen Leida, Wu Yang, Zhang Zhijie, *et al.* Study on the liquid-solid interfacial reaction of solder micro bumps prepared by laser assisted bonding[C]//2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2022: 1 – 5.
- [6] 崔鹏, 杨婉春, 彭飞, 等. 局部加热焊接技术综述 [J]. 中国焊接, 2023, 32(2): 1 – 15.  
CUI Peng, YANG Wanchun, PENG Fei, *et al.* A review of soldering by localized heating[J]. China Welding, 2023, 32(2): 1 – 15.
- [7] 李瑞, 乔媛媛, 任晓磊, 等. 温度梯度下 Cu/Sn-58Bi/Cu 微焊点热迁移及界面反应行为 [J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 71 – 78.  
LI Rui, QIAO Yuanyuan, REN Xiaolei, *et al.* Thermomigration and interfacial reaction in Cu/Sn-58Bi/Cu micro solder joint under temperature gradient[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(4): 71 – 78.
- [8] JEONG M S, LEE D H, KIM H T, *et al.* Reliability of laser soldering using low melting temperature eutectic SnBi solder and electroless Ni-electroless Pd-immersion Au-finished Cu pad[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112397.
- [9] LIU B L, TIAN Y H, L W, *et al.* TEM observation of interfacial compounds of SnAgCu/ENIG solder bump after laser soldering and subsequent hot air reflows[J]. Materials Letters, 2016, 163: 254 – 257.
- [10] YANG Z F, LI L J, CHEN W, *et al.* Numerical and experimental study on laser soldering process of SnAgCu lead-free solder[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 273: 125046.
- [11] RAHIM K, MIAN A. A review on laser processing in electronic and MEMS packaging[J]. Journal of Electronic Packaging, 2017, 139(3): 030801.
- [12] NISHIKAWA H, IWATA N. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn–Ag Cu solder on a Cu Pad[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 6 – 11.
- [13] NISHIKAWA H, IWATA N. Improvement of joint reliability of Sn–Ag–Cu solder bumps on Cu by a laser process[J]. Materials Transactions, 2015, 56(7): 1025 – 1029.
- [14] LEE D H, JEONG M S, YOON J W. Comparative study of interfacial reaction and bonding property of laser-and reflow-soldered Sn–Ag–Cu/Cu joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(10): 7983 – 7994.
- [15] AN L L, MA H T, QU L, *et al.* The effect of laser-soldering parameters on the Sn–Ag–Cu/Cu interfacial reaction, 2013 14th international conference on electronic packaging technology (ICEPT) [C]. IEEE, 2013: 264 – 267.
- [16] TIAN Y H, WANG C Q, CHEN Y R. Characteristics of laser reflow bumping of Sn3.5Ag and Sn3.5Ag0.5Cu lead-free solder balls[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2008, 24(2): 220 – 226.
- [17] KIM J O, JUNG J P, LEE J H, *et al.* Effects of laser parameters on the characteristics of a Sn-3.5 wt. %Ag solder joint[J]. Metals and Materials International, 2009, 15: 119 – 123.
- [18] SEO S K, CHO M G, LEE H M. Crystal orientation of  $\beta$ -Sn grain in Ni(P)/Sn-0.5Cu/Cu and Ni(P)/Sn-1.8Ag/Cu joints[J]. Journal of Materials Research, 2010, 25(10): 1950 – 1957.
- [19] KIM D G, KIM J W, HA S S, *et al.* Effect of reflow numbers on the interfacial reaction and shear strength of flip chip solder joints[J]. Journal of alloys and compounds, 2008, 458(1-2): 253 – 260.
- [20] CHEN B S, HUANG Y F, TANG S W, *et al.* Effects of multiple reflows on microstructure and shear strength of (Au-20Sn)-2Ag/Au/Ni (P)/Kovar joints[J]. Materials Science and Engineering: A[J], 2020, 788: 139568.
- [21] TSAI J Y, HU Y C, TSAI C M, *et al.* A study on the reaction between Cu and Sn3.5Ag solder doped with small amounts of Ni[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(11): 1203 – 1208.
- [22] KANG H B, BAE J H, YOON J W, *et al.* Characterization of ternary Ni<sub>2</sub>SnP layer in Sn–3.5Ag–0.7Cu/electroless Ni(P) solder joint[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(11): 1108 – 1111.
- [23] KIM J H, JEONG S W, LEE H M. Abnormal grain growth of Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> at Sn-3.5 Ag/Ni interface[J]. Materials transactions, 2004, 45(3): 710 – 713.
- [24] CHOI W K, JANG S Y, KIM J H, *et al.* Grain morphology of intermetallic compounds at solder joints[J]. Journal of materials research, 2002, 17(3): 597 – 599.
- [25] GAO F, TAKEMOTO T, NISHIKAWA H. Morphology and growth pattern transition of intermetallic compounds between Cu and Sn-3.5Ag containing a small amount of additives[J]. Journal of electronic materials, 2006, 35: 2081 – 2087.
- [26] TSAI J Y, HU Y C, TSAI C M, *et al.* A study on the reaction between Cu and Sn3.5Ag solder doped with small amounts of Ni[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32: 1203 – 1208.

作者简介: 武洋, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 2.5D/3D 异质异构立体集成技术及其可靠性; Email: wuyang@natural-semicon.com.

张志杰 (通信作者), 博士, 副教授; Email: zjzhang@just.edu.cn.

(编辑: 刘启明)