

DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.20250614066

Cu₃Sn 相厚度对 Cu-Sn IMC 接头剪切性能的影响研究*

王波^{1,2}, 冉光龙², 刘明³, 何凯旋¹, 张坚², 黄伟², 潘开林²

(1. 华东光电集成器件研究所, 安徽 蚌埠 233042; 2. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004;
3. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要:文中研究了具有不同 Cu₃Sn 相厚度的 Cu-Sn 金属间化合物(Intermetallic Compound, IMC)接头在无电流(0 A/cm²)作用和电流(3×10² A/cm²)作用下的剪切变形与断裂行为。结果表明:无论有无电流作用,接头的等效模量和剪切强度均随着 Cu₃Sn 相厚度的增加而增加,最高剪切强度分别为 89.1 MPa(0 A/cm²)和 83.2 MPa(3×10² A/cm²);在电流作用下,接头的等效模量与剪切强度下降,且下降率随着 Cu₃Sn 相厚度的增加而减小,说明 Cu₃Sn 相比 Cu₆Sn₅ 相具有更好的电流抗性;随着 Cu₃Sn 相厚度的增加,无论有无电流作用,接头断裂位置均由 Cu₆Sn₅ 相逐渐向 Cu₆Sn₅ 相与 Cu₃Sn 相界面转移,并最终出现在 Cu₃Sn 相体内,呈现脆性断裂特征。该研究成果为 Cu-Sn IMC 接头可靠性的准确评估提供了必要的技术支持与理论支撑。

关键词: Cu-Sn 金属间化合物接头; Cu₃Sn 相; 电流作用; 剪切性能; 断裂行为

中图分类号: TG115.5⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2025)05-0040-07

引用格式:王波, 冉光龙, 刘明, 等. Cu₃Sn 相厚度对 Cu-Sn IMC 接头剪切性能的影响研究[J]. 电子机械工程, 2025, 41(5): 40-46.
WANG B, RAN G L, LIU M, et al. A study on influence of Cu₃Sn phase thickness on shear performance of Cu-Sn IMC joint [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2025, 41(5): 40-46.

A Study on Influence of Cu₃Sn Phase Thickness on Shear Performance of Cu-Sn IMC Joint

WANG Bo^{1,2}, RAN Guanglong², LIU Ming³, HE Kaixuan¹, ZHANG Jian²,
HUANG Wei², PAN Kailin²

(1. East China Institute of Photo-Electron IC, Bengbu 233042, China; 2. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. Hubei Sanjiang Aerospace RedPeak Control Co., Ltd., Xiaogan 432000, China)

Abstract: The shear deformation and fracture behavior of Cu-Sn intermetallic compound (IMC) joints with different thicknesses of Cu₃Sn phases without current (0 A/cm²) and with current (3×10² A/cm²) stressing are studied in this paper. The results show that: whether under current stressing or not, the equivalent modulus and shear strength of the joints increase with the increase of Cu₃Sn phase thickness, and the maximum strength is 89.1 MPa (0 A/cm²) and 83.2 MPa (3×10² A/cm²) respectively; the equivalent modulus and shear strength of the joints decrease under current stressing, and the decrease rate decreases with the increase of Cu₃Sn phase thickness, which indicates that Cu₃Sn phase has better current resistance than Cu₆Sn₅ phase; with the increase of Cu₃Sn phase thickness, the fracture (a brittle fracture) position of the joints gradually changes from Cu₆Sn₅ phase to the phase interface between Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn and finally in the Cu₃Sn phase whether under current stressing or not. These research results provide necessary data support and theoretical support for the accurate evaluation of the reliability of Cu-Sn IMC joints.

Key words: Cu-Sn intermetallic compound (IMC) joint; Cu₃Sn phase; current stressing; shear performance; fracture behavior

引言

第三代宽禁带半导体材料(如碳化硅、氮化镓)凭

借其高电子迁移率、优异的热稳定性及宽能带结构特性,在高温、高频、高功率电子器件领域展现出显著优势。随着功率半导体器件向高集成度方向发展,其

* 收稿日期:2025-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2441249);广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目(23354S009);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY0220)

工作环境温度已突破传统阈值,这对封装互连材料在 300 °C 以上高温环境中的可靠性提出了严苛要求^[1-2]。尽管国际环保法规推动了电子封装材料的无铅化进程,但当前无铅焊料体系在高温条件下的机械性能、抗氧化性及界面稳定性仍存在局限,尚未开发出满足 300 °C 以上高温应用需求且兼具高可靠性的无铅焊料^[3]。此外,与高温服役环境相比,键合或回流温度通常限制在 350 °C 以下,以避免电子零部件的热损伤^[4]。因此,全金属间化合物(Intermetallic Compound, IMC)互连技术应运而生,通过瞬态液相(Transient Liquid Phase, TLP)键合工艺将低熔点焊料作为中间层组装在两个高熔点基板之间,从而形成坚固的高熔点 IMC 接头^[5],是一种非常前景的实现“低温制备,高温服役”的方案,其中最具代表性的是 Cu-Sn IMC 接头^[6-7]。

在制备过程中,通过增加 TLP 键合时间,使液态焊料中间层被完全消耗并转化为 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn,熔点分别为 415 °C 和 676 °C^[4]。其中,Cu₆Sn₅ 由基板中的 Cu 原子与焊料中的 Sn 原子发生扩散反应生成,生成的 Cu₆Sn₅ 进一步与 Cu 原子反应生成 Cu₃Sn,二者对整个 IMC 接头的性能均有着重要影响。文献[8]研究了在 235 °C、250 °C 和 265 °C 温度及不同键合时间下的 Cu-Sn TLP 键合 IMC 接头的组织演变与剪切强度。发现在 235 °C 下保温 150 min 后形成了约 40 μm 厚的 IMC 接头,该接头主要由 Cu₆Sn₅ 组成,Cu₃Sn 仅为 2.6 μm;随着键合温度的增加,形成全 IMC 接头的的时间减少,且在相同保温时间下 Cu₃Sn 相厚度更大;随着键合温度与保温时间的增加,IMC 接头的剪切强度出现单调增加,断口类型为脆性断裂。文献[9]通过优化中间层 Sn 焊料的厚度,在 260 °C 下保温 30 min,形成了完整的 Cu₃Sn 接头。该接头经 200 °C 的高温老化 200 h 后,仍保持一个较高的剪切强度(75.44 MPa)。上述研究结果表明,Cu₃Sn 相的剪切性能优于纯 Sn 相(约 30~40 MPa)和 Cu₆Sn₅ 相,但在实际的 Cu-Sn IMC 接头中,通常以 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 混合相的形式存在,因此有必要进一步研究 Cu₃Sn 相厚度(占比)对整个 IMC 接头力学性能的影响。

此外,国内外学者在 IMC 接头力学性能研究方面做了大量工作。文献[10]研究了 Sn 与 Cu-8Ni 基板形成的 (Cu, Ni)₆Sn₅ IMC 接头的剪切性能。结果显示:接头的平均剪切强度高达 71.87 MPa,且在 200 °C 下老化 400 h 后仍保持 67.63 MPa 的高剪切强度;接头的断裂行为表明,老化前后的接头均断裂于 IMC 层内部,且裂纹倾向于靠近 IMC 中心位置扩

展,呈现脆性断裂特征。文献[11]研究了在超声辅助键合下含不同尺寸 Ni 颗粒(29~35 μm、3~5 μm 及二者按 50% 比例混合)的 Sn/Ni 复合焊膏与 Ni 基板的反应。结果表明,含混合尺寸 Ni 颗粒的焊膏形成的 Ni₃Sn₄ IMC 接头具有最高的剪切强度。文献[5]将 Cu 基板进行微纳结构处理后,形成全 Cu-Sn IMC 接头的的时间缩短至 7 min。在全 IMC 接头形成过程中,接头的剪切强度呈现出先减小后增加的变化趋势,其断裂模式发生了由韧性断裂到脆脆混合断裂再到脆性断裂的转变。然而,当前关于 IMC 接头的力学性能测试主要在单一载荷(剪切)条件^[12-15]下进行,而服役时的接头通常还会受到电流的作用。文献[16]发现在电流(密度为 10⁴ A/cm²)辅助键合工艺下,Cu₃Sn 晶粒沿着立方晶格的边(即<100>方向)定向生长,获得的 IMC 接头的剪切强度高达 63.4 MPa。该研究表明,电流能够诱导 IMC 接头的微观组织发生变化,故其对接头力学性能的影响不容忽视。此外,文献[17]在非全 IMC 接头拉伸性能的研究中发现,电流作用下接头的拉伸变形与无电流时接头的变形明显不同,而该现象在全 IMC 接头中是否存在尚不清楚。因此,在探索 IMC 接头的力学性能时有必要考虑电流的影响。

本文通过 TLP 键合制备具有不同 Cu₃Sn 相厚度的 Cu-Sn IMC 接头,并系统地研究在无电流与电流作用下接头剪切性能与断裂行为的演变规律,揭示 Cu₃Sn 相对接头剪切性能的影响机理,旨在为 Cu-Sn IMC 接头的可靠性评估提供一定的数据支持和理论支撑。

1 实验方法

1.1 Cu-Sn IMC 接头制备

本文将纯度为 99.9% 的纯 Sn 球和 99.9% 的 Cu 片分别作为制备 IMC 接头的中间层焊料和基板材料。其中,Sn 球的直径为 300 μm,Cu 基板经线切割处理后,尺寸为 10.0 mm×2.0 mm×0.2 mm(长×宽×厚)。如图 1 所示,IMC 接头的制备流程为:1) 将 Sn 球植于 Cu 基板上,在 Sn 球与基板接触的位置涂覆助焊剂;2) 沿着 Cu 基板长度方向的 Sn 球两边放置厚度为 30 μm 的 Ti 片以控制接头的高度;3) 放置另一块基板并施加一定压力使焊球变形,高度降低至与 Ti 片厚度一致;4) 在基板两端放置垫片以保证接头在后续受压时受力均匀;5) 将步骤 4) 完成的搭接结构装夹于特制夹具中,然后施加一定的压力并置于通入氮气的管式炉中进行 TLP 键合,键合温度为 350 °C,保温时间分别为 60 min、180 min、300 min

和 420 min 以获得不同 Cu_3Sn 相厚度的接头; 6) 完成键合后, 移除垫片与 Ti 片, 并将接头试样置于无水乙醇中进行超声清洗以去除残留的助焊剂。

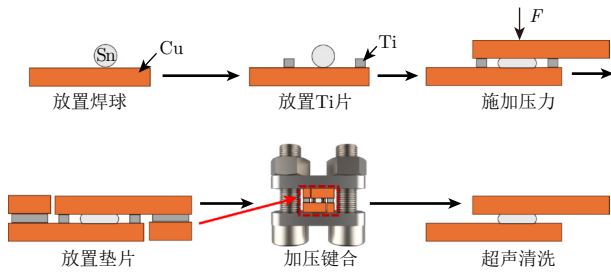


图1 Cu-Sn IMC 接头制备流程

1.2 剪切力学测试

对电流作用下的接头进行力学测试, 联合使用直流稳压电源(ANS1560D)与自研拉伸机(图2), 以同时加载电流和力学载荷。以动态力学分析仪(DMA Q800)为参考, 对自研拉伸机进行校正, 确保其测试结果的准确性。

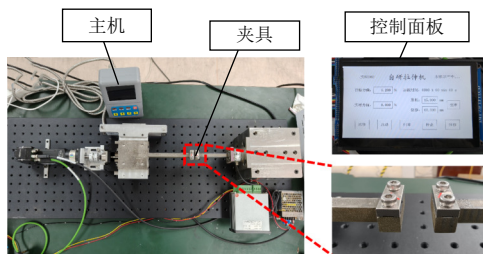


图2 自研拉伸机

在对接头进行剪切强度测试时, 先将接头装夹至夹具上, 并使用垫片使接头上下基板在受压时保持平行, 如图3所示; 然后采用位移控制模式对其进行剪切加载, 剪切速率为 $20 \mu\text{m/s}$ 。通电测试是在剪切加载前先给接头通电(电流密度为 $3 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$) 3 min 使接头温度稳定, 再施加剪切载荷(期间保持通电)。接头剪切强度取 5 个试样的平均值。

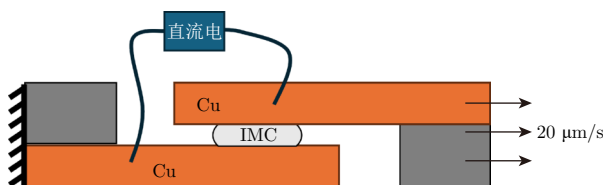


图3 电流作用下接头剪切强度测试示意图

1.3 接头组织与断口表征

采用激光共聚焦显微镜(OLS4100)和配备能量色散 X 射线光谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)(ZEISS Sigma 360)进行接头组织与断口表面/截面的表征。

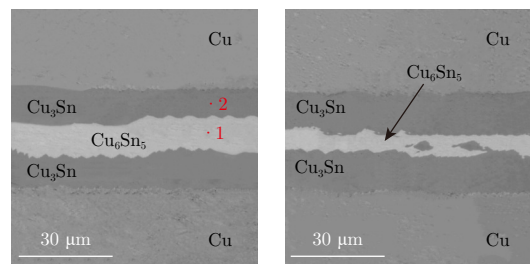
1.4 IMC 厚度测量方法

首先, 将待测量的数据图像导入 Photoshop 软件, 使用测量工具结合比例尺测量出 IMC($\text{Cu}_3\text{Sn} + \text{Cu}_6\text{Sn}_5$)的厚度; 然后, 使用像素工具统计出 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5 的像素占比, 根据比例求出 Cu_3Sn 单侧的厚度, 该数据为多组实验的平均值^[18]。

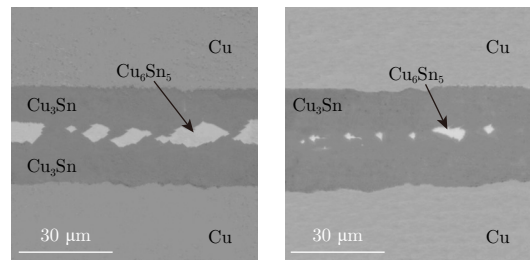
2 结果与讨论

2.1 Cu-Sn 接头的组织演变

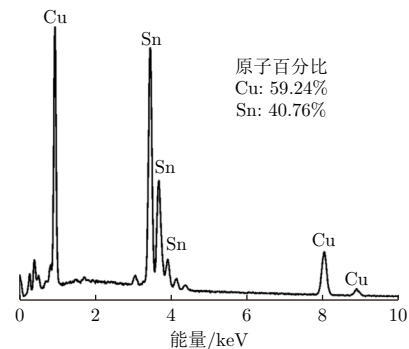
图4所示为不同保温时间下接头的微观组织形貌



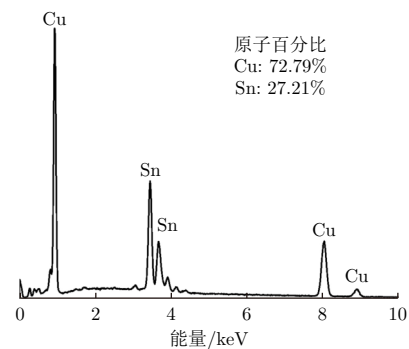
(a) 60 min (b) 180 min



(c) 300 min (d) 420 min



(e) 图4 (a) 中点1的EDS结果



(f) 图4 (a) 中点2的EDS结果

图4 不同保温时间下的接头微观组织形貌

貌。结合接头的 EDS 结果可知,图 4(a)中点 1 处的 Cu 和 Sn 原子比为 59.24:40.76(图 4(e)),接近 6:5,由此可推断其为 Cu₆Sn₅;而点 2 处的 Cu 和 Sn 原子比为 72.79:27.21(图 4(f)),接近 3:1,由此可推断其为 Cu₃Sn,表明在 60 min 的保温时间下已形成完全的 Cu-Sn IMC 接头。此外,通过对接头 Cu₃Sn 单侧厚度的测量(后面所称“Cu₃Sn 相厚度”均指单侧厚度),得出其厚度分别为 10.9 μm(保温 60 min)、13.6 μm(保温 180 min)、14.9 μm(保温 300 min)和 15.4 μm(保温 420 min)。显然,Cu₃Sn 层的厚度随保温时间的增加呈现增长趋势,而在 300~420 min,其厚度增幅相较于前两个阶段有所减小,这与 Cu₃Sn 相的成核以及 Cu₆Sn₅ 向 Cu₃Sn 转变的速度减缓有关。值得说明的是,在保温时间为 420 min 时,整个接头几乎全部由 Cu₃Sn 相组成,由于两侧 IMC 并非完全对称生长,因此单侧 Cu₃Sn 层的厚度超过 15 μm。

2.2 不同 Cu₃Sn 相厚度的接头剪切性能

2.2.1 无电流作用下的接头剪切性能

测试统计了不同 Cu₃Sn 相厚度的接头在无电流作用下的剪切强度,结果见表 1。当接头中的 Cu₃Sn 相厚度为 10.9 μm 时,接头的剪切强度为 61.24 MPa;随着 Cu₃Sn 相厚度增加至 13.6 μm 和 14.9 μm,接头的剪切强度分别提升至 68.64 MPa 和 79.49 MPa;当 Cu₃Sn 相厚度达到 15.4 μm 时,接头的剪切强度进一步增加至 89.1 MPa。上述结果表明,接头的剪切强度随 Cu₃Sn 相厚度的增加而单调增加,其原因在于 Cu₃Sn 相由 Cu₆Sn₅ 相在高温键合过程中转化形成(反应式为 Cu₆Sn₅ + 9Cu → 5Cu₃Sn),此过程伴随体积收缩与空洞减少,使得界面更加致密,且 Cu₃Sn 相中的 Sn 和 Cu 原子比更低,金属键结合更强,从而提高了抵抗剪切应力的能力^[19-20]。

表 1 不同 Cu₃Sn 相厚度的接头平均剪切强度

Cu ₃ Sn相厚度/μm	平均剪切强度/MPa	标准差/MPa
10.9	61.24	3.48
13.6	68.64	2.33
14.9	79.49	3.02
15.4	89.10	5.58

此外,进一步分析了 Cu-Sn IMC 接头在剪切过程中的变形情况。测试获得接头的应力-应变曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,随着 Cu₃Sn 相厚度的增加,接头的应力-应变曲线的斜率逐渐增大,表明 Cu₃Sn 相比 Cu₆Sn₅ 相具有更加优异的抵抗剪切变形的能

力,也侧面反映了 Cu₃Sn 相占比越高,接头的剪切强度就越大。

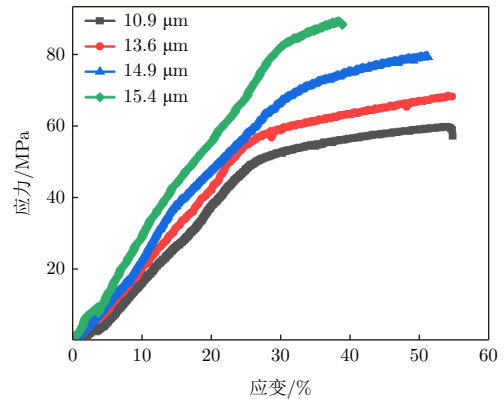


图 5 无电流时不同 Cu₃Sn 相厚度接头的应力-应变曲线

2.2.2 电流作用下的接头剪切性能

为进一步理解接头在实际工况下(通常是同时加载电流与机械应力)的剪切性能,测试了电流作用下接头的应力-应变曲线,结果如图 6 所示。相比于无电流作用的情况,在电流作用下接头的应力-应变曲线斜率明显降低,但二者的变形特征相似。

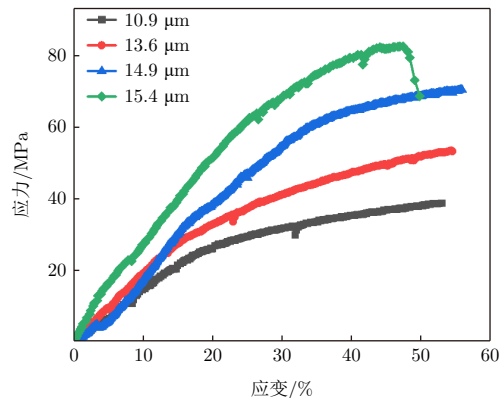


图 6 电流作用下不同 Cu₃Sn 相厚度接头的应力-应变曲线

根据接头的应力-应变曲线,统计了电流作用下不同接头的剪切(断裂)强度。同时,为了更加清晰地对比有/无电流作用时 Cu₃Sn 相对接头剪切性能的影响,将两种情况绘制于同一图中,如图 7 所示。在密度为 3×10² A/cm² 的电流作用下,Cu₃Sn 相厚度为 10.9 μm 的接头的剪切强度为 39.51 MPa。随着 Cu₃Sn 相厚度分别增加至 13.6 μm、14.9 μm 和 15.4 μm,接头的剪切强度分别为 51.36 MPa、70.27 MPa 和 83.20 MPa。相比于无电流作用(0 A/cm²),电流作用下接头的剪切强度在同一 Cu₃Sn 相厚度条件下均降低,表明电流对接头的剪切性能具有恶化效果。然而,随着 Cu₃Sn 相厚度的增加,由电流引起的接头剪切强度下降率逐渐降低,这意味着 Cu₃Sn 相具有比 Cu₆Sn₅ 相更优异

的抗电流损伤性能。该现象的发生可归因于 Cu_3Sn 相具有比 Cu_6Sn_5 相更高的熔点,根据力-热能量密度等效原理^[21],在同一电流密度下,由焦耳热诱导的接头软化在具有更高 Cu_3Sn 相占比的接头中产生的影响更小,从而导致接头的剪切强度下降率更低。

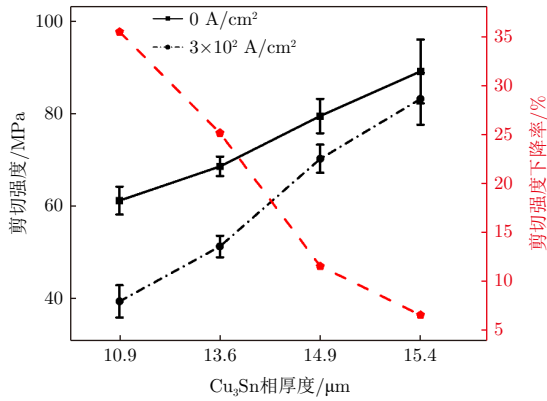


图7 不同 Cu_3Sn 相厚度接头的剪切强度

此外,为进一步探讨有/无电流作用的接头变形差异,统计了这两种条件下接头的等效模量(即应力-应变曲线斜率),结果如图8所示。显然,在电流作用下,接头的等效模量下降。这是由于:1) 焦耳热作用导致接头在相同力学载荷下更易变形;2) Cu_3Sn 相具有比 Cu_6Sn_5 相更好的抵抗变形的能力,故随着 Cu_3Sn 相厚度的增加,接头等效模量的下降率减小。

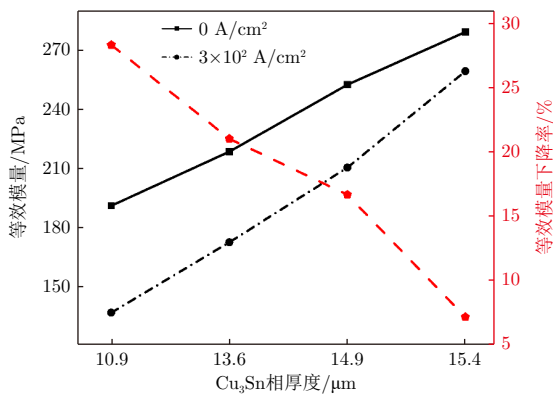


图8 不同 Cu_3Sn 相厚度接头的等效模量

2.3 不同 Cu_3Sn 相厚度的接头断裂行为

对剪切断裂后的接头断口表面进行 SEM 表征,结果如图9所示。从图9可以看到,无论是否有电流作用,接头的断口表面都比较平整,呈现出明显的脆性断裂特征,这与 Cu-Sn IMC 相脆性较大有关。

对图9所示的接头断裂表面各点的元素成分占比进行分析,结果见表2。断口较高处的 Cu 和 Sn 的原子比接近 6:5,为 Cu_6Sn_5 相,而较低处 Cu 和 Sn 的原子比接近 3:1,为 Cu_3Sn 相,这表明接头断裂位

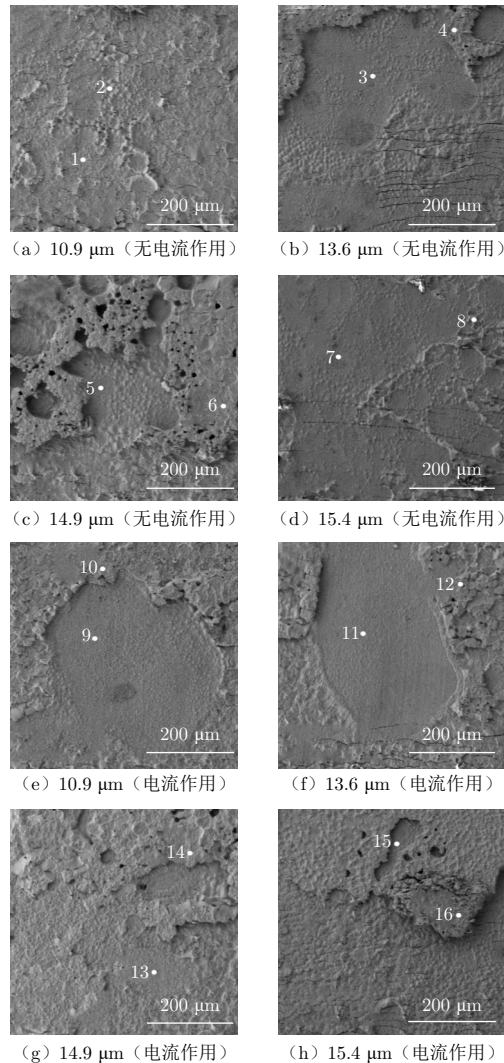


图9 不同 Cu_3Sn 相厚度接头断口表面 SEM 形貌

置既出现在 Cu_6Sn_5 相体内,也出现在 Cu_6Sn_5 相与 Cu_3Sn 相界面或 Cu_3Sn 相体内。同时,对比不同 Cu_3Sn 相厚度的接头以及是否有电流作用的情况,发现所有接头断口表面形貌相似,断口位置均为 Cu_6Sn_5 相体内和 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}_3\text{Sn}$ 相界面(或 Cu_3Sn 相体内)。

表2 接头断裂表面各点成分占比 %

点位号	Cu	Sn	点位号	Cu	Sn
1	73.19	26.81	9	76.35	23.65
2	58.82	41.18	10	51.73	48.27
3	78.57	21.43	11	77.16	22.84
4	50.33	49.67	12	56.75	43.25
5	74.76	25.24	13	71.28	28.72
6	53.77	46.23	14	47.70	52.30
7	77.33	22.67	15	70.11	29.89
8	57.04	42.96	16	52.25	47.75

为进一步理解 Cu₃Sn 相厚度对接头断裂行为的影响,利用激光共聚焦显微镜对接头的断口截面进行表征,结果如图 10 所示。在无电流作用时,接头的断裂位置随着 Cu₃Sn 相厚度的增加逐渐由 Cu₆Sn₅ 相体内主导转变至 Cu₆Sn₅/Cu₃Sn 相界面,如图 10(a)、图 10(b)和图 10(c)所示,并在 Cu₃Sn 相厚度达到 15.4 μm 时出现以 Cu₃Sn 相体内主导的脆性断裂,如图 10(d)所示。与无电流作用时的接头断裂相似,在电流作用下接头的断裂位置随着 Cu₃Sn 相厚度的增加也发生了由 Cu₆Sn₅ 相体内主导向 Cu₃Sn 相体内主导的转变,如图 10(e)~10(h)所示。

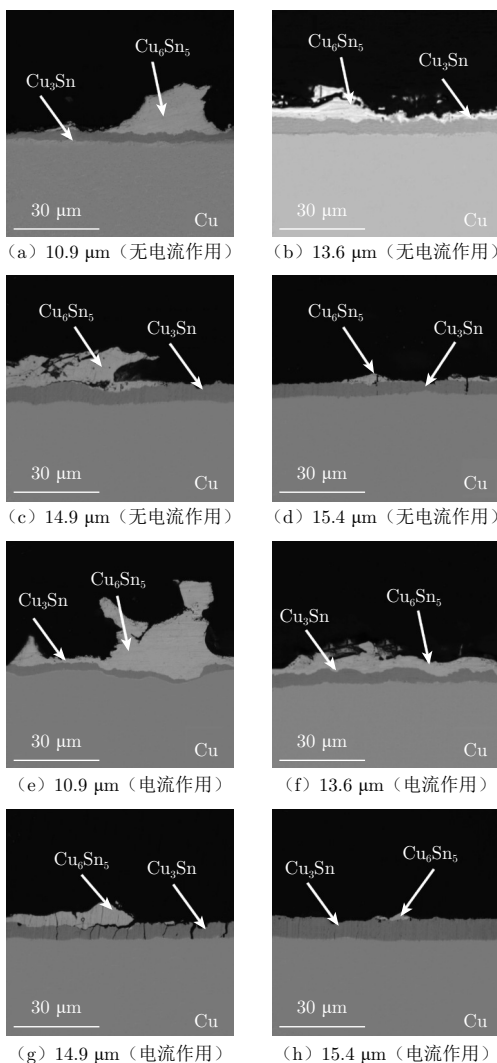


图 10 不同 Cu₃Sn 相厚度接头断口截面形貌

3 结束语

本文探讨了 Cu₃Sn 相厚度对 Cu-Sn IMC 接头在无电流和电流作用下的剪切变形及断裂行为的影响。结果发现:1) Cu₃Sn 相厚度的增加有利于提升接头对

剪切应力和电流的抗性;2) 具有不同 Cu₃Sn 相厚度的接头的断裂路径存在较大差异。由于断裂位置不同(相体内断裂和相界面断裂),需要不同的模型(如寿命预测模型)对接头的可靠性进行评估,这将增加评估的难度。此外,形成全 Cu₃Sn 接头在工艺制备上需要的时间过长、成本过高,因此仍有必要进一步研究含 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 的多相 IMC 接头的可靠性。

在当前研究的基础上,仍有以下 3 点值得进一步探索:1) 当前的工作能够实现缺陷少、一致性较好的全 IMC 接头的制备,但制备时间长、温度高,难以应用于实际工程,故如何在保证接头质量的同时缩短键合时间、降低键合温度有待进一步研究;2) Cu₆Sn₅ 相和 Cu₃Sn 相本质较脆,尽管其具有较高的力学强度,但难以衡量其综合可靠性,故仍需通过振动、热循环等测试对其可靠性进行全面分析与评估;3) 当前研究使用的电流参数单一,难以全面反映电流对全 IMC 接头的影响,故有必要对多个电流密度条件下的接头的可靠性进行研究,进一步揭示电流的影响机理。

参考文献

- [1] CHIN H S, CHEONG K Y, ISMAIL A B. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2010, 41: 824-832.
- [2] 张兆华, 孟伟, 崔凯, 等. 纳米银双面烧结 SiC 半桥模块封装技术[J]. *电子机械工程*, 2023, 39(4): 37-41.
- [3] 刘聪, 甘贵生, 江兆琪, 等. 功率互连全 IMC 焊点的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(10): 2876-2896.
- [4] LAI Y Q, XU R S, CHEN S, et al. Rapid formation, grain refinement and shear property of high-temperature-stable full IMC joints[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 6146-6158.
- [5] JIANG W, LI Z L, PAN Z, et al. Effect of micro- nanostructured Cu coating on the growth and mechanical behavior of Cu-Sn intermetallic compound joints [J]. *Materials Today Communications*, 2025, 44: 111873.
- [6] CHEN C, ZHANG L, GUO X Y, et al. Optimizing temperature gradient for rapid fabrication of Cu/Sn/Cu full intermetallic compounds joints via vacuum thermal compression bonding[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35(12): 823.
- [7] 施权, 张志杰, 高幸, 等. 全金属间化合物微焊点的制备及性能表征研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(4): 1129-1143.

- [8] SUN L, CHEN M H, ZHANG L. Microstructure evolution and grain orientation of IMC in Cu-Sn TLP bonding solder joints[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 786: 677-687.
- [9] WU Z J, CAI J, WANG Q, et al. Wafer-level hermetic package by low-temperature Cu/Sn TLP bonding with optimized Sn thickness[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(10): 6111-6118.
- [10] LAI Y Q, LI G, LIU M, et al. Rapid TLPD bonding of highly reliable full (Cu, Ni)₆Sn₅ IMC micro-joints using Cu-8Ni substrate for power device packaging [J]. *Intermetallics*, 2025, 179: 108675.
- [11] ZHANG W W, CAO Y C, HUANG J Y, et al. Ultrasonic-accelerated metallurgical reaction of Sn/Ni composite solder: principle, kinetics, microstructure, and joint properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 66: 105090.
- [12] FENG J Y, HANG C J, TIAN Y H, et al. Effect of electric current on grain orientation and mechanical properties of Cu-Sn intermetallic compounds joints [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 753: 203-211.
- [13] BRINCKER M, SÖHL S, EISELE R, et al. Strength and reliability of low temperature transient liquid phase bonded Cu—Sn—Cu interconnects[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76-77: 378-382.
- [14] ZHAO H Y, LIU J H, LI Z L, et al. A comparative study on the microstructure and mechanical properties of Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn joints formed by TLP soldering with/without the assistance of ultrasonic waves[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 2739-2749.
- [15] MO L, CHEN Z, WU F, et al. Microstructural and mechanical analysis on Cu-Sn intermetallic micro-joints under isothermal condition[J]. *Intermetallics*, 2015, 66: 13-21.
- [16] LIU B L, TIAN Y H, WANG C X, et al. Ultrafast formation of unidirectional and reliable Cu₃Sn-based intermetallic joints assisted by electric current[J]. *Intermetallics*, 2017, 80: 26-32.
- [17] 李望云, 秦红波, 周敏波, 等. 电-力耦合作用下 Cu/Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu 微焊点的拉伸力学性能和断裂行为 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(10): 46-53.
- [18] 刘宝磊. Cu-Sn 化合物电流辅助定向生长与微焊点瞬态键合机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [19] 梁晓波, 李晓延, 姚鹏, 等. 微电子封装中全 Cu₃Sn 焊点形成过程中的组织演变及生长形貌[J]. *材料工程*, 2018, 46(8): 106-112.
- [20] 赏敏. Sn/Cu 钎焊界面 Cu₃Sn 生长及控制机制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [21] WANG B, LI W Y, PAN K L. Abnormal shear performance of microscale ball grid array structure Cu/Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu solder joints with increasing current density[J]. *Crystals*, 2022, 12(1): 85.

王波男, 1994年生, 博士, 讲师, 主要从事电子封装互连材料、结构及可靠性研究。

官网变更通知

即日起, 《电子机械工程》对官网和投审稿系统进行了更换和升级并集成了微信服务号, 新地址为 <http://dzjxgc.xml-journal.net/>, 请扫码关注《电子机械工程》微信服务号, 咨询电话: 025-51821077。

