

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.3.62

中图分类号: TM241.2

文献标志码: A

功率器件封装用 Cu-Sn 全 IMC 接头制备及其可靠性研究进展

胡虎安¹, 贾 强^{1,2}, 王乙舒¹, 籍晓亮¹, 邹贵生³, 郭 福^{1,4}

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学重庆研究院, 重庆 400015; 3. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 4. 北京信息科技大学机电工程学院, 北京 100096)

摘要: 随着功率半导体器件的服役环境越来越恶劣, 以碳化硅(SiC)为代表的第三代半导体凭借其优异的高温性能成为行业应用主流。但目前尚缺乏与之相匹配的低成本、耐高温的互连材料, 成为了制约行业发展的瓶颈。Cu-Sn 全金属间化合物(IMC)因其成本低、导电性好且满足低温连接、高温服役的特点被认为是理想的 SiC 芯片互连材料之一。针对功率半导体器件封装, 对国内外近年来 Cu-Sn 全 IMC 接头的制备方法和可靠性进行了分析和综述, 并讨论了目前亟待解决的问题和未来的发展趋势。

关键词: 功率器件封装; 全金属间化合物; 制备工艺; 可靠性

Research Progress in Preparation and Reliability of Cu-Sn Full IMC Joints for Power Device Packaging

HU Hu'an¹, JIA Qiang^{1,2}, WANG Yishu¹, JI Xiaoliang¹, ZOU Guisheng³, GUO Fu^{1,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Chongqing Research Institute, Beijing University of Technology, Chongqing 400015, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100096, China)

Abstract: As the service environment of power semiconductor devices becomes more and more severe, the third-generation semiconductor represented by silicon carbide(SiC) has become the mainstream of industry applications owing to its excellent high-temperature performance. However, the lack of bounding materials which not only match with SiC chips but also have a low cost and a high melting point has become a bottleneck in the development of the industry. Cu-Sn intermetallic compounds(IMCs) are considered to be ideal bounding materials for SiC chips because of their low cost, good conductivity and characteristics that meet the requirements of low-temperature bonding and high-temperature service. Aimed at the power semiconductor device packaging, the preparation and reliability of Cu-Sn full IMC joints at home and abroad in recent years are analyzed and reviewed, and the problems to be solved at present and the development trend in the future are discussed.

Keywords: Power device packaging; full intermetallic compound(IMC); preparation process; reliability

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-01; 录用日期: 2024-03-13; 网络首发日期: 2024-04-18

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-MSX0187); 北京市自然科学基金-小米创新联合基金资助项目(L233038)

This work is supported by Chongqing Natural Science Foundation project under the grant CSTB2023NSCQ-MSX0187; Beijing Natural Science Foundation-Millet Innovation Joint Fund under the grant L233038

随着高铁、电动汽车和航空航天等领域的快速发展, 作为电力控制核心的功率半导体器件的服役环境越来越恶劣, 服役温度要求越来越高。第三代半导体碳化硅 SiC(silicon carbide)等凭借其在高温、高压、高频等条件下的优异性能, 以及其理论工作温度甚至可以达 600 °C, 成为了耐高温功率器件发展的主流^[1-3]。要充分发挥 SiC 芯片在高温条件下的优异性能, 必须匹配与之合适的高熔点互连材料和

耐高温封装方法。目前,功率器件耐高温封装方法主要有3种,即高熔点合金焊料、微/纳金属颗粒烧结和全金属间化合物 IMC(intermetallic compound)结构。连接材料能在较低温度下组装并在高温下服役是实际生产的现实需求,而一般高熔点合金焊料需要较高的回流温度,可能会对芯片及其周围封装结构造成热损伤。纳米尺寸的 Ag 和 Cu 颗粒烧结虽然可满足低温连接工艺,但存在高成本和高孔隙率的问题。因此,在低温下形成全 IMC 接头已成为高温电子封装中非常有前途的解决方案。可以形成全 IMC 接头的焊料体系主要有 Cu-Sn、Cu-In、Sn-Ag、Sn-Ni、Sn-Bi 等^[48]。其中 Cu-Sn 焊料因成本低、导电性好及抗蠕变性能强等优点被认为是理想的 SiC 芯片互连材料。本文对近年来国内外 Cu-Sn 全 IMC 接头的制备方法和可靠性的研究进行综合分析和评述,并对未来的研究趋势进行展望。

1 Cu-Sn 全 IMC 接头制备方法研究进展

常见的3种高温互连封装方案特点如表1所示^[9-10]。近年来,在低温下形成全 IMC 连接层技术备受研究人员关注。常见 IMC 材料体系如表2所示,主要包括 Cu-Sn、Ag-Sn、Cu-In、Sn-Ni 等。在这些材料中,Ag-Sn 材料成本较高;Cu-In 材料生成的 IMC 熔点较低,适用于低温密封结构;Sn-Ni 材料 IMC 生成速度十分缓慢;而 Cu-Sn 材料因其成本低、互连性好的特点,应用最为广泛,是目前的主流选择。Cu-Sn 全 IMC 接头制备方法大体可分为传统制备方法、快速制备方法及其他制备方法。其中,传统制备方法有瞬态液相法 TLP(transient liquid phase)、固液互扩散 SLID(solid-liquid interdiffusion)键合法等;快速制备

表1 常见3种耐高温互连封装方案特点^[9-10]

Tab. 1 Features of three common high-temperature interconnection packaging schemes^[9-10]

连接层材料	案例	优势	不足	主流工艺
高熔点合金焊料	Au-Sn	高温、高导电率,抗腐蚀能力强	成本高	回流焊等 330~410 °C
	Bi-Ag	成本适中、无毒	塑性和润湿性差	
	Pb-Sn	良好的延展性和润湿性能	有毒	
微/纳金属颗粒	烧结 Ag	导电率高,烧结时不易氧化	成本高、有电迁移问题	烧结 200~300 °C
	烧结 Cu	成本低、导电导热性好	制备、服役时易氧化	
全 IMC	Cu-Sn	成本低、应用广泛	塑性较低	TLP 等 250~300 °C
	Ag-Sn	导电性能和抗蠕变性能优异	润湿性差、成本较高	
	Cu-In	延展性好,扩散速率快	成本较高	
	Sn-Ni	生成物熔点高	扩散速度很慢	

表2 IMC 材料特点(连接温度 ≤ 300 °C时)

Tab. 2 Material characteristics of each IMC
(connection temperature ≤ 300 °C)

材料	产物	熔点/°C	特点
Cu-Sn	Cu ₆ Sn ₅	415	成本低、互连性好、
	Cu ₃ Sn	676	塑性较差
Ag-Sn	Ag ₃ Sn	480	导电性好、成本高、 塑性较差
Cu-In	Cu ₁₁ In ₉	307	延展性好,力学性能差、
	Cu ₂ In	667	成本高
Sn-Ni	Ni ₃ Sn ₄	794	塑性好、形成速度 十分缓慢

方法有加快原子扩散速度、减少原子间的扩散距离、直接使用 IMC 颗粒烧结形成接头等;而其他制备方法则包括了温度梯度制备及电感加热制备。

1.1 传统 Cu-Sn 全 IMC 接头制备方法

1.1.1 瞬态液相法

瞬态液相法依靠基板 Cu 原子与中间熔化的 Sn 层相互扩散形成 IMC。Liu Wei 等^[11]研究了温度对接头制备效率的影响,发现在 235 °C 保温 150 min 时,接头完全由 Cu₆Sn₅+Cu₃Sn 组成;当将温度提升至 265 °C 时,形成同样结构的接头仅需保温 60 min,所有接头的剪切强度为 8.5~24.2 MPa。关于 Cu₆Sn₅

和 Cu_3Sn 占比对接头力学性能的影响,邵华凯等^[12]在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 60 min 时制备了 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 接头,保温 150 min 时制备了 Cu_3Sn 接头,发现: $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 接头及全 Cu_3Sn 接头均表现为脆性断裂, Cu_3Sn 晶粒会产生细晶强化,使得全 Cu_3Sn 接头力学性能较好;当接头中 Cu_6Sn_5 含量较少时, Cu_6Sn_5 占比不会明显改变接头强度;连接温度仅对IMC形成速度有影响,对接头力学性能的影响不大。

1.1.2 固液互扩散键合法

Yao Peng 等^[13]使 $\text{Cu}/\text{Sn}(6\text{ }\mu\text{m})/\text{Cu}$ 结构在温度为 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力为 0.04 MPa 下保温, 120 min 时获得了由 $\text{Cu}_3\text{Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 组成的全IMC接头, 300 min 时获得了全 Cu_3Sn 接头,并研究了不同 Cu_3Sn 占比下接头力学性能变化,发现 Cu_3Sn 含量提升会提高接头的剪切强度,全 Cu_3Sn 接头的剪切强度为 57.9 MPa 。Lee B S 等^[14]采用 $\text{Sn}-0.7\text{Cu}$ 焊膏作为中间层,焊接温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$,在压力为 0.2 MPa 下键合 1 h 后获得由 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 组成的接头,在压力为 2.0 MPa 下键合 2 h 后获得全 Cu_3Sn 接头,结果表明 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 接头的剪切强度仅有 10 MPa ,而全 Cu_3Sn 接头剪切强度有 55 MPa 。Hang Chunjin 等^[15]在温度为 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 下对 $\text{Cu}/\text{Sn}(30\text{ }\mu\text{m})/\text{Cu}$ 接头保温 720 min 后获得了含有孔洞的 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 接头,当温度上升至 $300\text{ }^\circ\text{C}$,保温 480 min 后获得了 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ 接头。金凤阳等^[16]对 $\text{Cu}-\text{Sn}-\text{Cu}$ 三明治结构在压力为 0.06 MPa 下进行钎焊,制备了有残余 Sn 、 $\text{Cu}_3\text{Sn}-\text{Cu}_6\text{Sn}_5-\text{Cu}_3\text{Sn}$ 、 $\text{Cu}-\text{Cu}_3\text{Sn}-\text{Cu}$ 这3种接头(图1),其剪切强度分别为 23.26 、 33.59 、 51.83 MPa 。

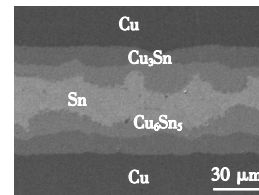
1.2 Cu-Sn 全 IMC 接头快速制备方法

传统方法制备全IMC接头的速度缓慢,尤其是当连接层的厚度超过 $30\text{ }\mu\text{m}$ 时,制备时间甚至可达十几个小时,难以满足高效封装的工况。为此,研究者们提出了多种方式来加快反应速度,从原理上大致可以分为加快 $\text{Cu}-\text{Sn}$ 原子的扩散速度、减少 $\text{Cu}-\text{Sn}$ 原子间的扩散距离、直接使用 $\text{Cu}-\text{Sn}$ IMC颗粒烧结形成接头等。

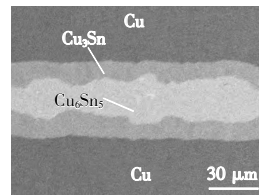
1.2.1 加快 $\text{Cu}-\text{Sn}$ 原子的扩散速度形成接头

通过辅助外加能量场能够明显加快接头制备

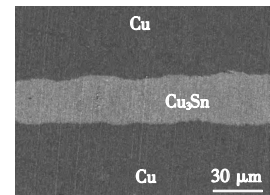
速度,目前的方式有超声辅助和电流驱动辅助等。在超声辅助上,陈达龙等^[17]将铜片和锡箔堆叠为 $\text{Cu}-\text{Sn}-\text{Cu}$ 三明治结构,在铜片上方施加的压力为 0.06 MPa 、超声频率为 20 kHz 、功率为 600 W ,当超声时间为 15 s 时形成了 $\text{Cu}_3\text{Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 接头,当超声时间为 20 s 时形成了全 Cu_3Sn 接头,接头组织变化如图2所示。陈达龙等^[17]还对试样进行了剪切试验,发现断口呈现出明显的脆性断裂或者以脆性断裂为主的断裂特征。Liu J H 等^[18]同样采用超声辅助TLP工艺获得了完整的 $\text{Cu}-\text{Sn}$ 全IMC接头,并对其组织和力学性能进行了研究,结果表明,相较于传统的TLP工艺,超声辅助TLP工艺制备的接头力



(a)有残余 Sn



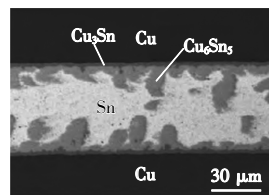
(b) $\text{Cu}_3\text{Sn}-\text{Cu}_6\text{Sn}_5-\text{Cu}_3\text{Sn}$



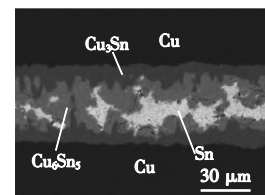
(c) $\text{Cu}-\text{Cu}_3\text{Sn}-\text{Cu}$

图 1 3 种不同类型的接头^[16]

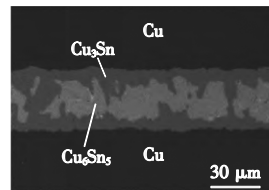
Fig. 1 Three different types of joint^[16]



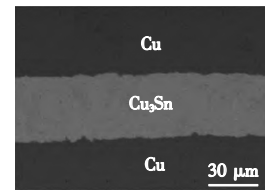
(a)2 s



(b)8 s



(c)15 s



(d)20 s

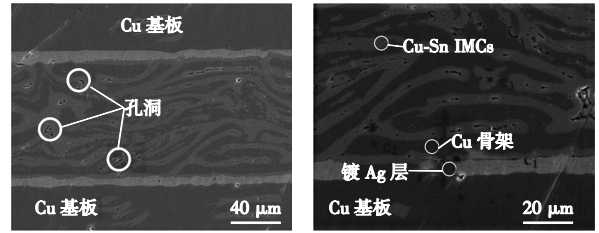
图 2 不同超声辅助时间下接头组织变化^[17]

Fig. 2 Changes in joint tissue at different ultrasonic assisted time^[17]

学性能更为均匀,接头弹性模量为 123 GPa,硬度值为 6.0 GPa、抗剪强度为 60.1 MPa。也有研究人员利用电流驱动键合制备全金属间化合物接头。在电场作用下,金属原子通常会沿着电子运动方向发生定向迁移,可以促进阳极界面 IMC 的生长^[19]。Feng Jiayun 等^[20]在电流密度为 2×10^2 A/cm² 条件下制备 Cu-Sn 全 IMC 接头,在电流作用下,Cu₆Sn₅ 快速生长,最终形成全 Cu₆Sn₅ 接头。超声辅助 TLP 连接工艺为高温功率器件的芯片互连提供了一种新的方案,但是超声波会对电子器件造成不可逆的损伤。电流驱动辅助制备对 Cu₆Sn₅ 的生长有明显促进作用,但对 Cu₃Sn 相的生长效果不明显,而且当外加电流较大时也可能可能会对芯片造成损伤。

1.2.2 减少 Cu-Sn 原子间的扩散距离形成接头

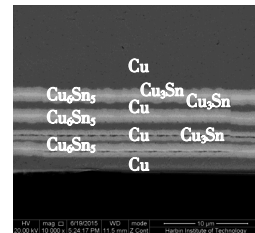
减少 Cu-Sn 原子间的扩散距离是目前较为可行的快速制备思路,主要采用 Cu@Sn 颗粒、多种颗粒混合、泡沫 Cu+Sn 焊料和多层三明治结构等。Peng Xianwen 等^[21]研究了 Cu@Sn 核壳($w(\text{Sn})=60\%$)粉末瞬时液相烧结连接的组织演变和性能,在键合过程中,当 Sn 逐渐消耗完毕,接头由 Cu₆Sn₅、Cu₃Sn 和 Cu 组成。Tang Y 等^[22]以 Cu@Sn 粉末与 SAC305 粉末为基础制备混合焊膏,使接头在温度为 250 °C、压力为 1.0 MPa 下保温 30 min,接头组织主要由 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 组成,抗剪强度超过 40 MPa;当 Cu@Sn 颗粒作为连接材料时,可防止 Cu 在回流期间氧化形成 CuO,进而提高接头的剪切强度。Liu Jiaxin 等^[23]制备了镀 Sn 的泡沫 Cu 焊片,并将该焊片置于 2 个镀银 Cu 基板之间,在温度为 280 °C、压力为 2.0 MPa 下保温不同时间研究接头的性能。研究结果显示,接头具有较好的抗氧化性,随着时间延长接头孔隙率逐渐减少,30 min 后接头孔隙率降至最低,接头形貌如图 3 所示。江琛^[24]对多层 Cu-Sn 结构形成全 IMC 接头进行了研究,在温度为 300 °C、20 N 条件下,不同保温时间的接头组织变化如图 4 所示,可见:在保温时间为 2~5 min 时,Cu 层的溶解使 Cu 层呈扇贝状形貌,Cu₃Sn 层较为平整;在保温时间为 10 min 时,接头中相邻 Cu₃Sn 生长合并,最终呈现 Cu-Cu₃Sn-Cu 结构。



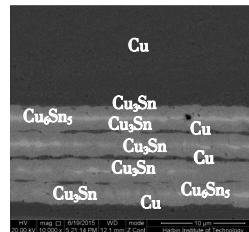
(a)连接 30 min 后接头截面 (b)接头底部区域放大图像形貌

图 3 接头形貌^[23]

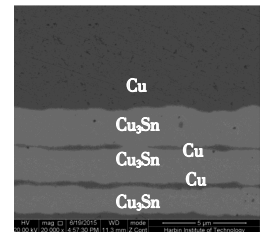
Fig. 3 Joint morphology^[23]



(a) 2 min



(b) 5 min



(c) 10 min

图 4 300 °C 下接头组织演化过程^[24]

Fig. 4 Evolution of joint tissue at 300 °C^[24]

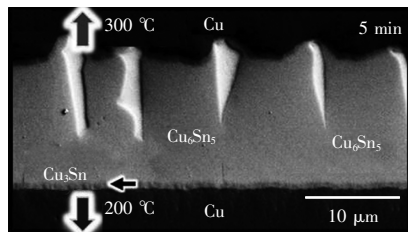
1.2.3 Cu-Sn IMC 颗粒烧结形成接头

使用 Cu-Sn IMC 颗粒烧结形成接头具有较好的导热性、导电率及韧性。Zhong Ying 等^[25]在温度为 200 °C、压力为 5 MPa 下烧结纳米 Cu₆Sn₅ 膏体,保温 20 min 后得到全 Cu₆Sn₅ 接头。Guo Longjun 等^[26-27]在温度为 200 °C、压力为 10 MPa 下烧结纳米 Cu₁₀Sn₃ 膏体,保温 20 min 后得到全 Cu₁₀Sn₃ 接头,但由于温度较低,有机物挥发较为困难,接头内有大量裂纹和孔洞;当温度升高至 300 °C 时,裂纹及孔洞消失。由此可见,纳米 IMC 颗粒烧结增强了接头的塑性和韧性,但 IMC 颗粒制备流程复杂、成本较高,同时还要考虑烧结时有机物挥发及孔隙问题。

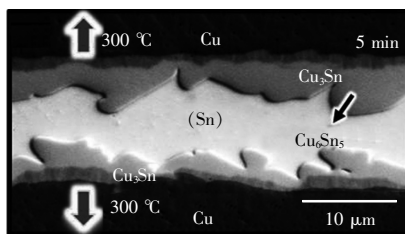
1.3 其他方法

在温度梯度的作用下,金属原子从高温区域向低温区域发生定向迁移,这种现象被称为热迁

移效应^[28]。Yang T L 等^[29]研究了温度梯度对接头组织生长的影响,对接头上、下端分别加热,上端温度为 300 °C,下端温度为 200 °C,保温 5 min 后接头上、下两端的 Cu_6Sn_5 便相互接触并合并;然而,对于两侧等温加热的样品,即使两侧加热温度均为 300 °C,相同时间下两侧 Cu_6Sn_5 晶粒依旧未发生相互接触,如图 5 所示。刘昊宇^[30]采用感应加热的方式对 Cu/Cu-Sn 复合焊片/Cu 三明治结构进行焊接,发现高频感应焊接过程与传统回流焊有所不同,由于电磁搅拌作用促进了 Cu 元素的扩散,使得接头中 Cu_3Sn 组织先是以平面层状生长,后变成柱状生长。



(a) 100 °C

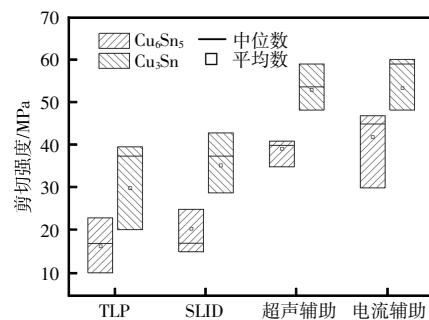


(b) 无温度梯度

图 5 不同温度梯度下接头组织变化^[29]Fig. 5 Changes in joint tissue at different temperature gradients^[29]

目前,在全 IMC 接头的制备方法中,TLP 及 SLID 互连技术虽然无须助焊剂,但由于 Cu 原子只能从基板处扩散至连接层中心,导致接头制备速度

缓慢,在功率器件封装中的应用受到限制。在快速制备方法中,外加能量场确实能大幅加快制备速度,但外加能量场机构设置困难,外加的能量容易损坏器件其他结构。利用物理或者化学手段直接制备出纳米 IMC 颗粒,再通过烧结工艺制备接头的方法增强了接头的塑性和韧性,但颗粒制备流程复杂,还要克服烧结工艺中出现的问题。上述不同制备方法中 Cu-Sn 全 IMC 接头剪切强度如图 6 所示^[11-24],对于同一方法制备的接头,全 Cu_3Sn 接头相较于 Cu_6Sn_5 接头剪切强度更高,这一方面是因为 Cu_3Sn 强度比 Cu_6Sn_5 高(表 3),另一方面是因为全 Cu_3Sn 接头中 Cu_3Sn 晶粒比 Cu_6Sn_5 小,会产生细晶强化现象,再加上接头中界面减少,共同提高了接头剪切强度。对于不同的制备方法,与传统 TLP 工艺得到的全 IMC 接头剪切强度(约 35~40 MPa)及锡基钎料接头的剪切强度(约 20~30 MPa)相比,超声和电流辅助接头普遍具有更高的互连强度(约 50~70 MPa),这是因为外加能量场细化晶粒起到了强化接头力学性能的效果。

图 6 不同制备方法中 Cu-Sn 全 IMC 接头剪切强度^[11-24]Fig. 6 Shear strength of Cu-Sn full IMC joint prepared using different methods^[11-24]表 3 Sn、 Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn 和 Cu 的物理性质Tab. 3 Physical properties of Sn, Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn and Cu

材料	硬度/GPa	杨氏模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	导热率/[W·(cm·K) ⁻¹]	电阻率/($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	熔点/°C
Sn	0.11±0.05	51.00±5.00	35.0±0.4	220	40~50	0.668	11.50	232
Cu_6Sn_5	5.67~6.09	116.89±2.04	2 009.00±63.00	1 130±40	670	0.341	17.50	415
Cu_3Sn	7.00	133.39±4.44	4 600.00	6 100~17 500	1 700~4 400	0.704	8.80	676
Cu	1.70±0.20	110.00	33.30	210	—	4.000	1.71	1 085

接头制备时工艺参数涉及连接温度、连接层厚度、辅助压力大小及外加能量场等,依据 Vianco P T 等^[31]对 IMC 层的生长机理的研究,发现其生长厚度^[31-32]符合

$$X(t) = X_0 + [A_0 \exp(-Q/RT)]t^n \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为时间 t 后界面处 IMC 层的厚度; X_0 为界面处初始 IMC 层的厚度; A_0 为数值常数; Q 为扩散活化能; R 为气体摩尔常数, $R=8.314 \text{ J}(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为热力学温度; t 为加热时间; n 为时间指标。

根据时间指标 n 的取值,可以区分出以下 3 种类型的 IMC 生长机制。当 $n=1$ 时,生长规律服从线性生长。线性生长意味着生长速率仅受生长部位反应速率的限制,而不受 IMC 组分扩散到反应部位速率的限制。当 $n=1/2$ 时,增长规律遵循抛物线增长。当层生长受元素向反应界面体积扩散控制时,抛物线生长动力学适用。随着 IMC 层厚度的增加,IMC 层的生长变得越来越困难,这是因为 1 个或多个 IMC 组成元素的扩散必须通过已有的 IMC 层扩散才能到达反应部位。当 $n=1/3$ 时,增长规律为次抛物线增长,当层生长受元素向反应部位晶界扩散控制时,采用次抛物线生长动力学^[33]。

由式(1)可知,当 IMC 生长类型相同时,界面处 IMC 厚度的增加受温度、时效时间和扩散系数等因素的共同影响,快接头制备速度需要提高连接温度、提高辅助压力、减少接头厚度并增加外加能量。但在实际生产应用中,由于材料及结构限制,提高温度、压力和外加能量可能导致芯片受损,而减薄接头厚度可能使得结构可靠性下降,因此减少 Cu-Sn 原子间的扩散距离实现制备速度与焊料层厚度的解耦是未来较有潜力的发展方向。

2 Cu-Sn 全 IMC 接头可靠性

随着电力电子系统服役环境越来越严苛,功率器件的封装可靠性成为近年来研究关注的重点。接头可靠性研究主要包括热老化、温度循环、电迁移下组织及其性能变化等。对于全 IMC 接头而言,目前的研究主要针对接头的力学性能与高温可靠性展开。

2.1 热老化作用下 Cu-Sn 全 IMC 接头的可靠性

功率器件的连接层在长时间服役过程中受到自身产热和复杂环境温度影响,其服役温度范围涵盖了 150~600 °C。研究全 IMC 接头在不同热老化温度下的组织变化和可靠性极为必要。Sun Lei 等^[34]发现 Cu_3Sn 接头在温度为 150 °C、时效为 90 d 后, Cu_3Sn 与 Cu 之间出现了许多明显的裂纹,且裂纹出现在 Cu 基板附近较大的 Kirkendall 空洞中,并逐渐向 Cu_3Sn 内部延伸,最终与 Cu_3Sn 内部的空洞相连,严重影响了接头的可靠性。Tang Y 等^[22]发现 Cu@Sn 粉末与 SAC305 粉末制备的接头在温度为 300 °C、时效为 800 h 后,Cu@Sn 颗粒为 IMC 的快速生成提供了许多反应界面,而 SAC305 提供的 Sn 原子抑制了 Cu_3Sn 的形核和生长,使得老化中形成的 Kirkendall 空洞分布在 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 之间的界面上,这一特征让接头具有优异的抗剪切能力,老化后的接头强度仍保持在 60 MPa 以上。对于温度为 500 °C 以上的高温环境,何溪等^[35]通过 TLP 连接工艺制备全 Cu_3Sn 接头,并在温度为 570 °C 下进行高温老化,结果表明,全 Cu_3Sn 接头中的 Cu_3Sn 层首先会全部转变为 $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$,最终转变为均匀的 $\alpha(\text{Cu})$ 固溶体。在固溶体转变过程中,接头中心处产生大量连续空洞,严重影响接头的可靠性。朱阳阳等^[36]将全 Cu_3Sn 接头置于管式炉中进行 620 °C 时效,时效过程中连接层内出现了 Cu_3Sn 、 $\text{Cu}_{20}\text{Sn}_6$ 、 $\text{Cu}_{13.7}\text{Sn}$ 三种相。当时效时间为 7 min 时,焊缝中间位置就已出现了微小空洞,但该微小空洞非但不会降低接头的力学性能,反而能够阻止裂纹扩展,从而提高接头的可靠性;而当时效时间至 120 min 时,焊缝中间位置的空洞数量进一步增加,聚合成为微裂纹,接头可靠性降低。

2.2 温度循环下 Cu-Sn 全 IMC 接头的可靠性

器件在服役过程中连接层会受到来自环境和冷却系统的影响而经历较大的温度波动,由于 IMC 连接层和 DBC 基板热膨胀系数 CTE(coefficient of thermal expansion)不匹配,随着热循环次数的增多,界面应力集中处会萌生裂纹而导致器件失效。为了探究 Cu-Sn 全 IMC 接头在温度循环下的组织变

化和可靠性, Brincker M 等^[37]对 Cu/Cu₃Sn/Cu 结构的接头进行了-40~150 °C下的热循环试验, 发现在 250 个热循环周期后, 接头组织仍有较好的均匀性, 与银烧结接头相比, 接头具有更好的可靠性。Li Junhui 等^[38]对接头进行了温度为-40~120 °C下的热循环试验, 接头的失效模式主要为脆性断裂, 裂纹主要发生在基板侧的 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 之间的界面处, 主要失效模式是在基板侧的 Cu₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 界面处发生分层, 然后两侧的 Cu₆Sn₅ 晶粒破碎。Bettahi Y 等^[39]将 Cu₃Sn/Cu₆Sn₅/Cu₃Sn 接头在温度为-65~250 °C下循环, 发现: 65 次热循环后接头只剩下 Cu₃Sn 组织, 并且形成了柱状生长的 CuO 新相; 经过 260 次热循环后, Cu₃Sn 层厚度继续增长, 平均厚度达到了 5.94 μm; 剪切测试后发现, 随着热循环次数增加, 剪切强度也在增加, 这可能是由于新生成的 CuO 相增强了接头的可靠性。

2.3 电迁移下 Cu-Sn 全 IMC 接头的可靠性

当前功率器件所需电流密度大幅度上升, 高密度电子流动下阴极端的 Sn 原子向阳极端迁移, 使得接头容易产生相分离和粗化, 界面易产生空洞等缺陷^[40]。国内外对于 Cu-Sn 全 IMC 接头电迁移行为的研究主要包括空洞形成与长大机制、微观组织变化及接头可靠性等。徐刘峰等^[41]在温度为 120 °C 时对比了电流密度为 1×10^4 A/cm² 和 1.6×10^4 A/cm² 时接头的微观形貌演变过程, 发现随着通电时间的增加, 电迁移作用下 Cu 原子扩散占主导地位, 空洞不断在 Cu₃Sn 层中间产生并聚集长大, 最终在 Cu₃Sn 层中间形成 1 条裂纹状缺陷, 如图 7 所示。Chu Yicheng 等^[42]制备了 Cu₆Sn₅/Cu₃Sn/Cu₆Sn₅ 接头, 在温度为 150 °C 下施加密度为 2.2×10^5 A/cm² 的电流, 发现: 随着电迁移的进行, 阴极端形成了部分多孔 Cu₃Sn 层, 并且接头电阻增加; 在电阻的增加量由 10% 变为 50% 时, 多孔 Cu₃Sn 组织不断变大, 使 Cu₆Sn₅ 层变成更小的梯形甚至变成了三角形, 同时接头的可靠性降低。An Rong 等^[43]用厚度为 4 mm 的 Cu 基板和厚度为 30 μm 的 Sn 箔制备了含 Sn 接头和全 IMC (Cu₆Sn₅/Cu₃Sn/Cu₆Sn₅) 接头, 施加电流密度为 1.0×10^4 A/cm², 发现在含 Sn 的接头中,

Cu₆Sn₅ 层沿阳极快速增长, 经过 192 h 后变为全 IMC 接头, 组织变化过程中 Cu₃Sn 层的生长几乎不受极性影响, 并且在 Cu₆Sn₅ 层中出现了许多细小的孔洞, 影响了接头的可靠性。

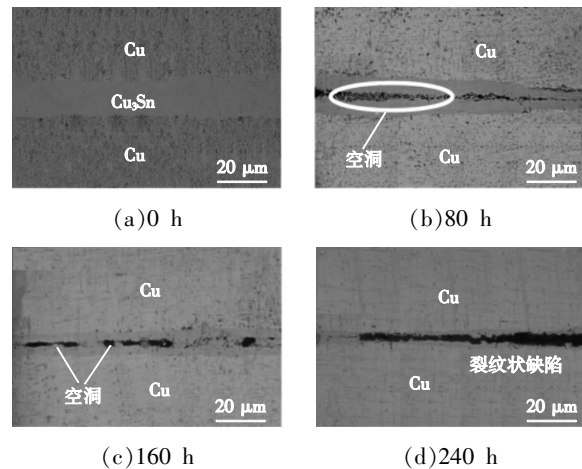


图 7 电流密度为 1×10^4 A/cm² 时接头微观形貌演变^[41]

Fig. 7 Micro-morphology evolution of joint when current density is 1×10^4 A/cm²^[41]

综上所述, 接头在服役过程中受到的环境应力主要包括高温、温度循环和电压电流负载等。其中, 高温下的热老化会加剧连接层内部、连接层与界面间的热扩散; 温度循环则会由于接头中不同材料热膨胀系数失配而导致应力集中、热疲劳等问题, 过大的电压电流负载会引起电迁移、热迁移等行为, 从而造成界面失效等问题。器件在实际服役时可能会遇到多种应力叠加, 甚至更复杂的情况 (如高湿、震动环境), 从而诱发新的失效模式, 导致封装结构的服役寿命缩短。在热老化及电迁移过程中, Cu-Sn 全 IMC 接头主要失效形式表现为原子迁移形成的 Kirkendall 空洞甚至微裂纹, 严重影响了互连体系的可靠性; 而在温度循环下, 由于与 Cu 有较为接近的热膨胀系数, Cu-Sn 全 IMC 接头的可靠性表现较为优异。

3 结语与展望

目前, 全 IMC 接头在第三代半导体芯片封装上尚无成熟的商业产品推出, 但随着近年来该领域的研究进展和突破, 基于 TLPS 技术研发的

Cu@Sn@X 焊片材料已通过部分应用验证及同行评价,并在新能源汽车、通讯和电机等领域初步应用。Cu-Sn 全 IMC 接头满足低温制备、高温服役的封装特性,且具有成本低、导电性好的优点,是 SiC 功率器件较为理想的连接层材料之一,但在接头的制备方法和可靠性上仍有诸多需要解决的问题。

(1) TLP 及 SLID 工艺虽无须助焊剂,但制备 Cu-Sn 全 IMC 接头效率较慢。在快速制备全 IMC 接头方法中,外加能量场能够有效提升制备效率,但需要额外设置外加能量机构,生产时需要对其可靠性及成本进行考虑。目前 IMC 颗粒烧结技术颗粒制备流程较为复杂,迫切需要开发新的 IMC 颗粒制备技术。

(2) 减少 Cu-Sn 原子间的扩散距离实现了制备速度与焊料层厚度解耦,是目前较为可行的封装方案之一。以核壳颗粒及焊膏填充泡沫 Cu 为连接层的方式容易产生孔洞,在接头连接时施加一定压力是减少空洞的有效方式。

(3) Cu-Sn 全 IMC 接头在热老化和电迁移时存在原子迁移后的孔隙问题,可使用基板镀层来缓解 Cu 和 Sn 原子迁移问题,也可采用特殊结构使 Cu 作为接头骨架起到机械增强的作用。对于热循环可靠性,Cu-Sn 全 IMC 接头表现较为良好,可在 Cu-Sn 二元体系基础上添加其他元素使连接层热膨胀系数与基板更加匹配。

参考文献:

- [1] Chen Cai, Luo Fang, Kang Yong. A review of SiC power module packaging: Layout, material system and integration [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(3): 170-186.
- [2] 李乐洲, 兰欣, 何志伟, 等. SiC 功率模块引线键合参数优化与可靠性分析[J/OL]. 电源学报, 2024: 1-14. (2024-02-27) [2024-03-01] https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=nouGVBS_tgdq4gpVNsOqFMdII MdYGpUngYmbg3vqZbPZjFJipqJ0ga4XTO2F1sOs_obsVz5l_mWHjPgK6hfTjk5zUyFQc3SI8KFDLS8dKxpmM7hhYcQHfw==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- [3] 康庆, 李峰, 邢杰, 等. SiC 器件在卫星电源系统中的应用与分析[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 154-160. Kang Qing, Li Feng, Xing Jie, et al. Applications and challenges of SiC devices in satellite electrical power systems [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 154-160 (in Chinese).
- [4] Zhang Bowen, Chen Shi, Lu Guoquan, et al. Reliability behavior of a resin-free nanosilver paste at ultra-low temperature of 180 °C [J]. Power Electronic Devices and Components, 2022, 3: 100014.
- [5] Yin Changhao, Wumaeraili K, Zhang Yu, et al. Novel Ag-Cu foam sheet with multi-layer composite structure for high performance joining of SiC power chips [J]. Materials Characterization, 2024, 209: 113696.
- [6] Zhang Hongqiang, He Siliang, Qu Guanda, et al. Improved thermal conductivity and reliability through graphene reinforced nanopaste for power devices in new energy vehicles [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(1): 52-60.
- [7] Nishikawa H, Piao Jinyu, Takemoto T. Interfacial reaction between Sn-0.7Cu(-Ni) solder and Cu substrate [J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(5): 1127-1132.
- [8] Tian Yanhong, Hang Chunjin, Zhao Xin, et al. Phase transformation and fracture behavior of Cu/In/Cu joints formed by solid-liquid interdiffusion bonding [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(9): 4170-4178.
- [9] Tian Ruyun, Hang Chunjin, Tian Yanhong, et al. Brittle fracture induced by phase transformation of Ni-Cu-Sn intermetallic compounds in Sn-3Ag-0.5Cu/Ni solder joints under extreme temperature environment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 777: 463-471.
- [10] Wang Fengjiang, Chen Hong, Huang Ying, et al. Recent progress on the development of Sn-Bi based low-temperature Pb-free solders [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(4): 3222-3243.
- [11] Liu Wei, Tian Yanhong, Wang Chunqing, et al. Morphology

- gies and grain orientations of Cu-Sn intermetallic compounds in Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu/Cu solder joints [J]. *Materials Letters*, 2012, 86: 157-160.
- [12] 邵华凯, 吴爱萍, 邹贵生. Cu-Sn 体系 LTTLTLP 连接接头强度与断口分析[J]. *焊接学报*, 2017, 38(3): 13-16, 129. Shao Huakai, Wu Aiping, Zou Guisheng. Study on shear strength and fracture behavior of Cu-Sn system low-temperature TLP bonded joint [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(3): 13-16, 129 (in Chinese).
- [13] Yao Peng, Li Xiaoyan, Han Xu, et al. Shear strength and fracture mechanism for full Cu-Sn IMCs solder joints with different Cu₃Sn proportion and joints with conventional interfacial structure in electronic packaging [J]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2019, 31(1): 6-19.
- [14] Lee B S, Yoon J W. Cu-Sn intermetallic compound joints for high-temperature power electronics applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(1): 430-435.
- [15] Hang Chunjin, Tian Yanhong, Zhang Rui, et al. Phase transformation and grain orientation of Cu-Sn intermetallic compounds during low temperature bonding process [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, 24(10): 3905-3913.
- [16] 金凤阳, 李晓延, 姚鹏. 微小互连 Cu-Sn 界面钎焊及接头剪切行为[J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 58-63, 163. Jin Fengyang, Li Xiaoyan, Yao Peng. A study on Cu-Sn soldering and shear behavior of solder joints with micro interconnection [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(2): 58-63, 163 (in Chinese).
- [17] 陈达龙, 李晓延, 韩旭. 超声-TLP 制备 Cu-Sn 焊点的组织演变及力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(1): 25-28, 33. Chen Dalong, Li Xiaoyan, Han Xu. Microstructure evolution and mechanical properties of Cu-Sn solder joints soldered by ultrasound-TLP [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(1): 25-28, 33 (in Chinese).
- [18] Liu J H, Zhao H Y, Li Z L, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of Cu-Sn intermetallic joints rapidly formed by ultrasonic-assisted transient liquid phase soldering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 692: 552-557.
- [19] Tu K N. Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(9): 5451-5473.
- [20] Feng Jiayun, Hang Chunjin, Tian Yanhong, 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.
- [21] Peng Xianwen, Wang Yue, Ye Zheng, et al. Microstructural evolution and performance of high-tin-content Cu₄₀Sn₆₀ (wt.%) core/shell powder TLPS bonding joints [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 853-862.
- [22] Tang Y, Li G Y, Chen D Q, et al. Influence of TiO₂ nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO₂ solder joints during isothermal aging process [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, 25(2): 981-991.
- [23] Liu Jiaxin, Lei Zhenyu, Wang Qing, et al. Fabrication of Sn-plated Cu foam for high-efficiency transient-liquid-phase bonding [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103058.
- [24] 江琛. Cu/Sn 多层薄膜制备单 IMC 结构焊点研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. Jiang Chen. Investigation of single IMC joints made by multiple Cu/Sn films [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [25] Zhong Ying, An Rong, Wang Chunqing, et al. Low temperature sintering Cu₆Sn₅ nanoparticles for superplastic and super-uniform high temperature circuit interconnections [J]. *Small*, 2015, 11(33): 4097-4103.
- [26] Guo Longjun, Liu Wei, Ji Xiaoliang, et al. Facile synthesis of Cu₁₀Sn₃ nanoparticles and their sintering behavior for power device packaging [J]. *Results in Materials*, 2021, 10: 100187.
- [27] Guo Longjun, Liu Wei, Wang Chunqing. Preparation and sintering properties of Cu₁₀Sn₃ IMCs nanopaste as die attach material for high temperature power electronics [J]. *Materials Letters*, 2021, 282: 128845.
- [28] 钟毅. 温度梯度对微焊点界面反应及晶粒取向的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. Zhong Yi. Effects of temperature gradient on the liquid-solid interfacial reaction and grain orientation of micro interconnects [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [29] Yang T L, Aoki T, Matsumoto K, et al. Full intermetallic joints for chip stacking by using thermal gradient bonding [J]. *Acta Materialia*, 2016, 113: 90-97.

- [30] 刘昊宇. 基于三种焊接方法 Cu₃Sn-Cu 复合微焊点的组织及力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
Liu Haoyu. Microstructure and mechanical properties of Cu₃Sn-Cu composite micro-joints based on three bonding methods [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021 (in Chinese).
- [31] Vianco P T, Hlava P F, Kilgo A C. Intermetallic compound layer formation between copper and hot-dipped 100In, 50In-50Sn, 100Sn, and 63Sn-37Pb coatings [J]. Journal of Electronic Materials, 1994, 23(7): 583-594.
- [32] Deng X, Piotrowski G, Williams J J, et al. Influence of initial morphology and thickness of Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn intermetallics on growth and evolution during thermal aging of Sn-Ag solder/Cu joints [J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(12): 1403-1413.
- [33] Takenaka T, Kano S, Kajihara M, et al. Growth behavior of compound layers in Sn/Cu/Sn diffusion couples during annealing at 433-473K [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 396(1-2): 115-123.
- [34] Sun Lei, Chen Minghe, Zhang Liang. Microstructure evolution and grain orientation of IMC in Cu-Sn TLP bonding solder joints [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 786: 677-687.
- [35] 何溪, 李晓延, 张伟栋, 等. 微电子封装中全 Cu₃Sn 焊点高温服役下的微观组织演变[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(3): 284-291.
He Xi, Li Xiaoyan, Zhang Weidong, et al. Microstructure evolution of full-Cu₃Sn solder joints in microelectronic packaging under high-temperature service [J]. Micronanoelectronic Technology, 2022, 59(3): 284-291 (in Chinese).
- [36] 朱阳阳, 李晓延, 张伟栋, 等. 全 Cu₃Sn 焊点在高温时效下的组织及力学性能[J]. 材料工程, 2022, 50(9): 169-176.
Zhu Yangyang, Li Xiaoyan, Zhang Weidong, et al. Microstructure and mechanical property of full Cu₃Sn solder joints during high-temperature aging [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(9): 169-176 (in Chinese).
- [37] Brincker M, Söhl S, Eisele R, et al. Strength and reliability of low temperature transient liquid phase bonded CuSnCu interconnects [J]. Microelectronics Reliability, 2017, 76: 378-382.
- [38] Li Junhui, Zhang Yuexin, Zhang Haoliang, et al. The thermal cycling reliability of copper pillar solder bump in flip chip via thermal compression bonding [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 104: 113543.
- [39] Bettahi Y, Richard C. Evolution of microstructure of lead free Cu/Sn solders and copper oxide phase precipitation in Cu₃Sn intermetallic during thermal cycling [J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 20-26.
- [40] 姚健. 电迁移作用下无铅微电子封装焊点可靠性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Yao Jian. Reliability investigation of lead-free micro-electronic packaging polder point under plectromigration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [41] 徐刘峰, 李晓延, 姚鹏, 等. 电迁移对全 Cu₃Sn 焊点形貌及剪切性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(23): 8-11, 15.
Xu Liufeng, Li Xiaoyan, Yao Peng, et al. Effect of electromigration on morphology and shear property of full Cu₃Sn solder joints [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(23): 8-11, 15 (in Chinese).
- [42] Chu Yicheng, Zhan C J, Lin Hanwen, et al. Electromigration in microbumps with Cu-Sn intermetallic compounds [C]// 2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Hokkaido, Japan, 2016: 252-255.
- [43] An Rong, Tian Yanhong, Zhang Rui, et al. Electromigration-induced intermetallic growth and voids formation in symmetrical Cu/Sn/Cu and Cu/intermetallic compounds (IMCs)/Cu joints [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(5): 2674-2681.



胡虎安

作者简介:

胡虎安(1995-),男,硕士。研究方向:先进电子封装材料。E-mail: huhuan@emails.bjtu.edu.cn。

贾强(1991-),男,通信作者,博士,副教授。研究方向:功率器件封装。E-mail: jiaqiang@bjtu.edu.cn。

王乙舒(1985-),男,博士,副教授。研究方向:先进电子封装材料。E-mail: yishu.wang@bjtu.edu.cn。

籍晓亮(1994-),男,博士,讲师。研究方向:先进电子封装材料。E-mail: jixiaoliang@bjtu.edu.cn。

邹贵生(1966-),男,博士,教授。研究方向:微纳连接与成形制造。E-mail: zougsh@tsinghua.edu.cn。

郭福(1971-),男,博士,教授。研究方向:先进电子封装材料。E-mail: guofu@bjtu.edu.cn。