

添加泡沫 Cu 对 PbSnAg/Cu 接头热阻及强度的影响

刘桂源, 孙凤莲

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 功率电子元件的服役温度远高于常温, 器件产热与散热之间不匹配的现象日益突显。针对这一问题, 利用泡沫 Cu 良好的导热性, 采用 PbSnAg 合金进行填充制成焊材, 期望提高现有 PbSnAg 接头的导热性能。测试复合钎料/Cu 接头的热阻, 观察微观组织的变化, 测试相关力学性能, 探究复合钎料接头的断裂机理。研究表明, 添加泡沫铜可以提高接头的热导率, 有效地降低接头的热阻。PbSnAg 合金的组织分别为高铅组织和含有化合物的混合组织, 添加泡沫 Cu 之后组织发生了粗化。界面上生成的化合物是 Cu_3Sn , 并且发现在 Cu 和 Cu_3Sn 界面化合物之间的界面处存在 Pb。添加泡沫 Cu 使焊缝的剪切强度稍有降低, 在断口上可以发现裸露在表面处的化合物。

关键词: 泡沫 Cu; PbSnAg 钎料; 热阻; 显微组织; 剪切强度

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.03.019

中图分类号: TG425 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)03-0127-07

Effect of Cu Foam on the Thermal Resistance and Strength of As-soldered Pb5Sn2.5Ag/Cu Joints

LIU Gui-yuan, SUN Feng-lian

(School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: The service temperature of power electronic components is much higher than normal temperature, and the mismatch between heat generation and heat dissipation of devices is becoming increasingly prominent. The good thermal conductivity of foamed Cu is used to fill the welding material with PbSnAg alloy. It is expected to improve the thermal conductivity of existing PbSnAg joints. The study focused on thermal resistance, microstructure and shear strength of the copper foam enhanced Cu/Pb-Sn-Ag/Cu joint. The microstructure of PbSnAg alloy is consists of matrix high lead and the mixed structure of high lead and IMCs (intermetallic compounds). Experimental result shows that the grain of PbSnAg coarsened after the addition of Cu foam. The component of the IMCs at the copper foam and the Cu substrate are Cu_3Sn . A layer with high Pb content was found between Cu and Cu_3Sn . The shear strength of the solder joint decreases slightly due to the addition of the copper foam, and the Cu_3Sn IMCs can be found on the shear fracture.

Keywords: Cu foam; PbSnAg solder; thermal resistance; microstructure; shear strength

收稿日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(51174069).

作者简介: 刘桂源(1994—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 孙凤莲(1957—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, E-mail: sunflian@163.com.

0 引言

对于功率电子器件,服役温度通常远远高于环境温度,其产热与散热能力不匹配的现象逐渐的突显出来,这就对电子封装中使用的钎料提出了更高的要求。现有的 Sn 基无铅钎料熔点偏低(183 ~ 243℃),抗氧化性、抗热疲劳性等性能不能满足功率器件的要求^[1-3]。针对这一问题,功率电子器件的连接技术向着发高熔点合金钎料、纳米级颗粒烧结、反应钎焊、低温瞬时液相扩散连接等方向进行,这些技术方法都具有各自的优势和缺点,使其在电子封装领域中不能够大范围的推广使用^[4-8]。Pb-Sn 基合金因其可焊性优良、组织性能稳定、成本合理等优点,广泛地应用在电子封装领域,但是由于器件废弃后,其焊接接头中含有的 Pb 元素会污染环境。现根据 RoHS 法规,禁用了铅较低质量分数(<85%)的电子封装钎料,高铅钎料质量分数(>85%)具有较高的熔点,稳定的组织及物理化学性能,使其在抗热机械疲劳、抗高温老化等方面表现出色,暂时还没有合适的无铅钎料可以替代,因此高铅钎料获得了 RoHS 法规的豁免。仍然可以应用在电子元器件的一级封装、功率电子元件等相关领域^[9-12]。

泡沫 Cu 作为一种新型的结构,因为其本身多孔的结构特征,可以为复合的材料提供骨架支撑和振动缓冲,又因为其良好的导热导电性能,主要应用于电极材料、化学催化剂、导热导电材料、消音屏蔽材料、过滤材料等领域^[13-14]。但是在电子封装领域,将泡沫 Cu 结构用于复合钎料却鲜有研究。

综上所述,本文在 PbSnAg 接头中添加泡沫 Cu,制成复合焊片进行钎焊连接。利用 Cu 良好的导热性,降低接头的热阻^[15],期望焊接接头的热传导性能有所改善。通过测试接头的热阻,分析其导热性能发生变化的原因。进行接头连接可靠性的测试,判断焊接接头的连接强度是否能够满足使用。并利用 SEM、EDS 对钎焊接头的显微组织、元素分布、化合物组织成分进行探究分析。

1 试验与方法

1.1 试验材料

本试验采用的母材为纯 Cu 板,有良好的导电、导热和加工性能,并且所含杂质较少。钎料金属是 Pb-5Sn-2.5Ag 合金,具有力学性能好、热疲劳性能好、润湿性优良、可靠性高,高温性能稳定等特征,被广泛的应用在电子元器件的一级封装及电子功率器件的连接^[16]。其主要的物理性能如表 1 所示。

表 1 Pb-5Sn-2.5Ag 的主要物理性能

Tab. 1 Main physical properties of Pb-5Sn-2.5Ag

熔点 固相/液相(℃)	密度/ (g/cm ³)	电阻率/ (μΩ·m)	热导率/ (W/(m·K))	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ /℃)	抗拉强度/ MPa
287/296	11.02	0.2	26	26	29.03

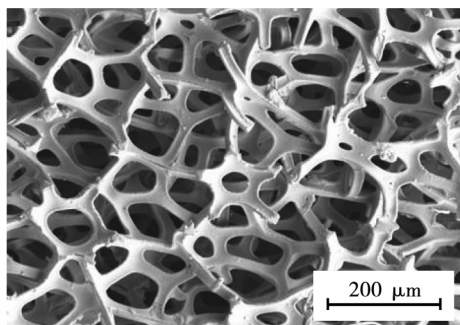


图 1 泡沫 Cu 形貌

Fig. 1 Morphology of Cu foam

本实验采用的泡沫 Cu,是通过电沉积法制成,拥有高孔隙率、均匀分布的三维网状孔结构^[17]。形貌

如图 1 所示。具有良好的导热导电性能,和一定的拉伸强度。实验所用的泡沫 Cu 相关参数如表 2 所示。

表 2 泡沫 Cu 的主要参数

Tab. 2 Main parameters of foamed Cu

PPI	孔径/ mm	通孔率/ %	孔隙率/ %	面密度/ (g/mm ²)
110	0.2	98	98	1.300

1.2 试验方法

将 Pb-Sn-Ag 钎料加热到 400℃,得到熔融的液态合金,通过无压渗浸的方式将液态钎料填充到不同孔隙密度的泡沫 Cu 中,制成复合焊片。将厚度为 0.5 mm 的纯 Cu 板分别切割成 20 × 20 mm 和 2 ×

2 mm。以上材料均用无水乙醇在超声波清洗 10 min, 在真空烘箱中烘干备用。

通过称量计算泡沫 Cu 无压渗浸前后的质量, 得出复合焊片中 Cu 的质量分数为 15%。按照尺寸 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 的标准切割复合焊片, 在 Cu 基板上涂刷 UV 光固化阻焊漆, 制成预留有 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 焊盘的下基板。焊接结构由上至下依次为上基板, 复合焊片, 下基板。在 330°C , 无压大气环境下使用回流焊机进行焊接, 焊接时间为 5 min, 焊接过程结束后随空气冷却至室温。

热阻实验的试样如图 2 所示, 按照 JEDEC 标准的封装热阻测试法进行测试。主体公式为

$$R = \frac{T_J - T_R}{P_H} = \frac{\Delta T}{P_H} \quad (1)$$

式中: T_J 为芯片的结温; T_R 为被结到节点的温度; P_H 为稳态下的功率。

其中 T_J 、 P_H 是通过计算得来, T_R 利用热电偶测量得到。因为实验中的唯一变量为焊缝, 为了研究焊缝的热阻, 所以本文采用结算到引脚上的温度作为考察点。这样既可以比较直观的放映焊缝的传热能力, 又可以减少其他因素导致的实验误差。

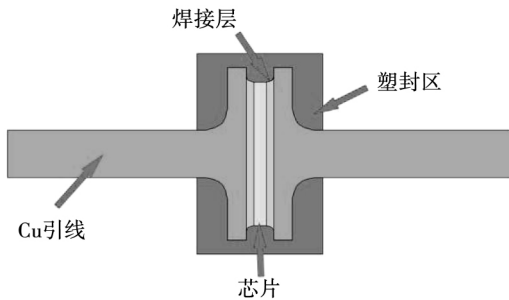


图2 热阻试验接头的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the thermal resistance test

用 E51 酚醛环氧和 4,4'-二氨基二苯甲烷镶嵌钎焊试样, 用碳化硅砂纸逐级打磨并用规格为 W0.25 的金刚石微粉进行抛光, 并用柠檬酸-钼酸铵-硝酸水溶液进行腐蚀^[18]。通过扫描电子显微镜 (SEM) 来表征钎焊接头的显微组织结构和断口特征, 并利用能谱分析仪 (EDS) 检测钎焊接头中各种元素的分布情况及焊缝中的物相组成。

将得到的试样装夹在剪切试验机上, 在室温下进行剪切试验, 示意结构如图 3 所示。将下基板用夹具固定, 以 0.1 mm/s 的恒定速度剪切焊接接头直至断裂, 剪切强度 τ 由下列公式求出:

$$\tau = \frac{F_Q}{A} \quad (1)$$

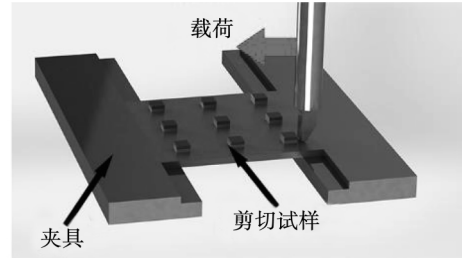


图3 钎焊接头装夹与剪切试验示意图

Fig. 3 Schematic of clamping and shear test of brazed joints

式中: F_Q 为断裂时的最大加载力, N; A 为试样的受力面积, mm^2 。每组实验的样本容量为 27, 剔除异常数据后, 取其平均值作为最终有效结果。

2 结果与讨论

2.1 接头的热传导性能

为测试出复合钎料/Cu 接头在服役过程中的热阻, 本节中模拟芯片的工作环境, 在 150°C 下对原始合金钎料/Cu 接头、15% 泡沫 Cu 复合钎料/Cu 接头进行热阻测试。根据公式 (1) 进行计算分别测量计算得出其中的 T_J 、 T_R 、 P_H 。

1) 为了计算测试器件中芯片的结温, 首先计算得到芯片在测试电流 ($I_M = 50 \text{ mA}$) 下, 电压随温度变化的曲线。通过外界热源, 将测试件逐级加温, 从 80°C 开始每隔 10°C 进行一次测试。具体做法是, 在每次加温后等待温度稳定, 然后给试件通测试电流 I_M ($I_M = 50 \text{ mA}$), 测试此时测试件两端的电压 V_F 。由此得到相同电流下, 电压随温度的变化关系如图 4 所示。

在 Origin 中对图中的曲线进行拟合, 可以分别得到每种钎料接头的电压-温度关系。如关系式 (3)、(4) 所示。

$$\text{原始钎料/Cu 接头: } V_F = -0.0016T + 0.285 \quad (3)$$

$$\text{泡沫 Cu 复合钎料/Cu 接头: } V_F = -0.0016T + 0.266 \quad (4)$$

2) 将两组试样通以固定电流, 使其温度上升至 150°C 左右, 并使其达到动态平衡, 经过调整, 确定加温电流 I_T 分别为 $I_{\text{原始}} = 12 \text{ A}$, $I_{\text{泡沫}} = 10.3 \text{ A}$, 测出此时试样件两端的电压 V_{FT} 分别为 $V_{\text{原始}} = 0.28 \text{ V}$, $V_{\text{泡沫}} = 0.26 \text{ V}$, 由此可以得到两个实验组的功率 P_H , 如表 3 所示。

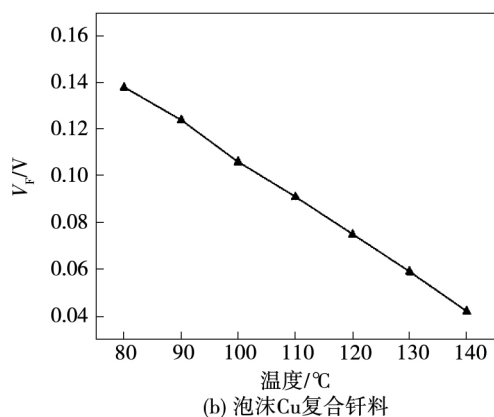
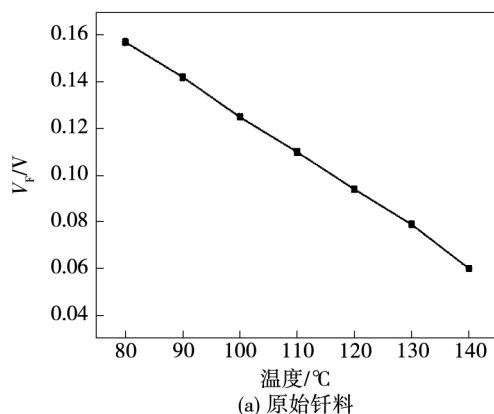


图4 各组的电压随温度变化曲线

Fig. 4 The curve of voltage-temperature

表3 各实验组的功率

Tab. 3 Power of each experimental group

组别	加温电流 I_M / A	测试电压 V_{FT} / V	试验功率 P_H / W
原始钎料	12	0.28	3.36
复合钎料	10.3	0.26	2.681

3) 计算芯片的结温。当器件的产热与散热到达一个动态平衡时,切换至测试电流 I_M ($I_M = 50$ mA),此时测得器件两端的电压,利用式(3)、(4),即可计算出芯片的结温 T_J ,如表4所示。

表4 各实验组的芯片结温

Tab. 4 The chip temperature of each experimental group

组别	测试电流 I_M / mA	测试电压 V_{F2} / V	芯片结温 T_J / °C
原始钎料	50	0.043	151.3
复合钎料	50	0.017	155.54

4) 使用热电偶测试器件两端引脚的温度 T_R ,结合上述计算得到的数据,代入式(1)中,可得到各实验组的热阻数据。

通过测试和计算,试验结果如表5所示,

得到原始钎料的热阻 $R_{原始} = 4.78$ °C/W,含有泡沫铜的接头热阻为 $R_{泡沫} = 3.56$ °C/W。其中含有15%泡沫Cu的接头降低了25.52%,说明添加泡沫Cu后提高了连接材料的导热性能,有利于及时传导芯片上的产热。

表5 各实验组接头的热阻

Tab. 5 The thermal resistance of each experimental group

组别	芯片结温 T_J / °C	引脚结温 T_R / °C	测试功率 P_H / W	热阻 R / (°C/W)
原始钎料	151.3	135.2	3.363	4.78
复合钎料	155.54	147.2	2.681	3.11

热量在传导过程中,倾向于优先沿着热阻较小的区域进行传导。芯片产生的热量在含有泡沫Cu的焊接接头传导时,因为Cu良好的导热性,泡沫结构在三维空间连通的特性,形成优于基体的高效导热通道,建立区域内的导热优势,这些区域组合在一起使整个接头的导热性能得到改善,能够高效率地传导芯片在服役过程中产生的热量^[9]。

2.2 接头的微观形貌及界面化合物

如图5(a)所示,可以观察到泡沫Cu分布在焊缝中,在泡沫Cu与钎料的界面上生长有一层化合物,且化合物的形貌并不是均匀平整的。通过扫描电子显微镜观察了焊缝显微组织中的元素分布,发现钎料中含有较高含量的Pb元素;Cu元素集中分布在泡沫Cu中和界面处;Sn元素分布于在钎料中,并且在界面上聚集;Ag元素集中于少量的块状组织中。由各元素的分布情况可说明钎料中的块状组织的主要成分是Ag、Sn,界面处的化合物由Cu、Sn组成。

如图6所示,为腐蚀后的PbSnAg合金的显微组织,由形貌和EDS结果可知,可以将显微组织分成两种组织。其一是形貌均一的高铅区,Pb含量高达95%,且只含有Pb和Sn两种元素。这是因为在相图上此成分点在共晶成分之外,液态钎料在冷却过程中并不会反生共晶反应,而是会形成Sn在Pb晶格中的置换固溶体。另一种是由两相组成的混合组织,从EDS结果上来看,含有Ag、Sn、Pb三种元素,结合相图和形貌上判断这种混合组织由 Ag_3Sn 和PbSn固溶体两相的混合组织。通过比较添加泡沫Cu前后的显微组织,含有泡沫Cu的显微组织更加粗大。这是因为液态钎料在冷却过程中可以依附泡沫Cu结构生长,减少了因为过冷在液态中的形核。

在这种环境下有利于晶粒的生长,因此在添加泡沫铜后存在粗大晶粒。

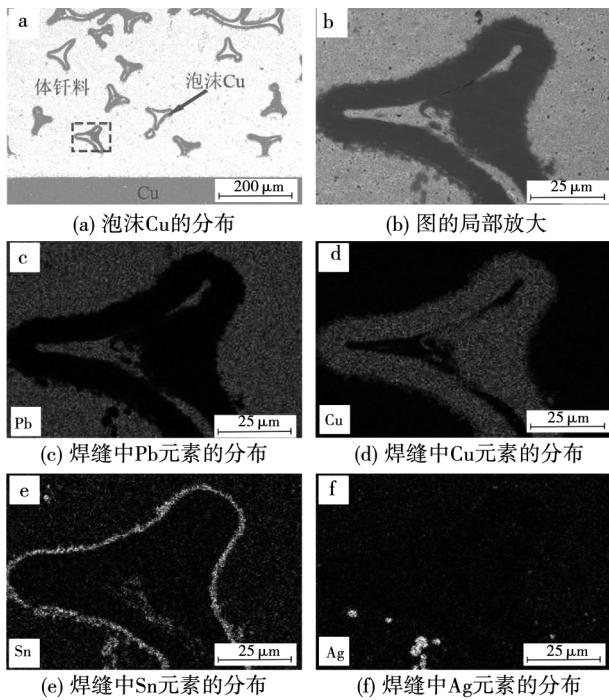


图5 焊缝的显微结构和各元素的分布

Fig. 5 Microstructure of the weld and distribution of each element

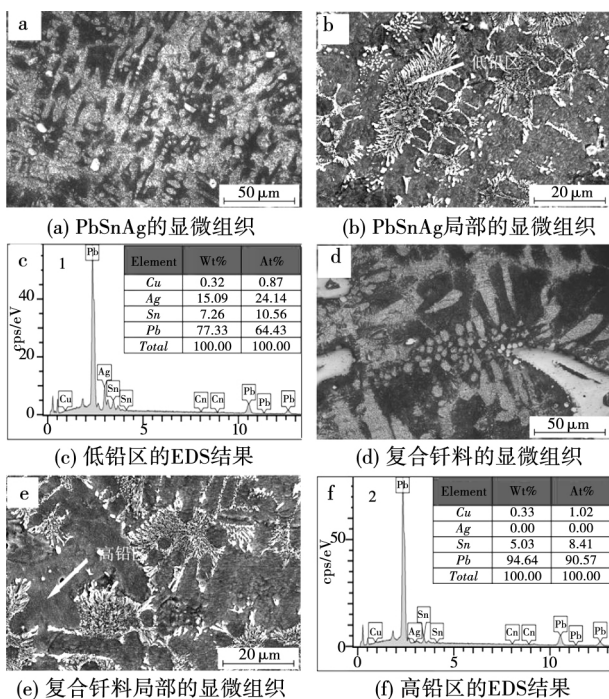


图6 腐蚀后体钎料的显微组织和 EDS 结果

Fig. 6 Microstructure and EDS results of corroded body solder

如图7所示,为了确定焊缝中各相的成分,选取焊缝中两个区域借助 EDS 对各相元素原子百分比进行测量。可以看出界面处的层状化合物为 Cu_3Sn ,而不是 CuSn 之间容易反应生成的 Cu_6Sn_5 。分析其原因为 PbSnAg 钎料中 Sn 元素只含有 5wt%,在界面处 Cu 的化学浓度是远大于 Sn ,近界面处 Cu 相较于 Sn 是过量的。又由于焊接时液态停留温度相对中低温无铅钎料的焊接温度较高,能为反应提供更多的能量,这都促使形成的界面化合物为 Cu_3Sn 。另外由图6(a)、图6(b)、图7可知,存在于体钎料中块状的化合物 Ag_3Sn 原子比为 3:1,且该化合物从外观上均一,判断其为金属原子之间存在固定原子比的金属间化合物,又根据其 Ag 、 Sn 原子比值为 3,确定其为 Ag_3Sn 金属间化合物。

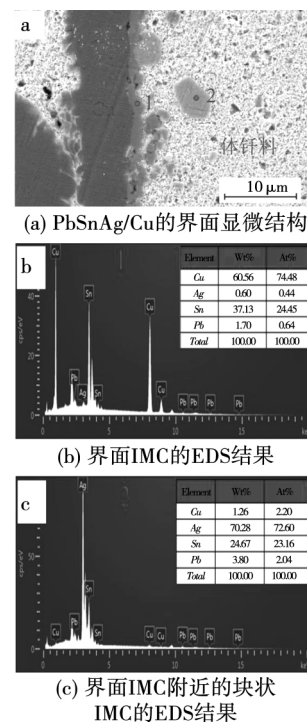


图7 界面显微结构和 EDS 结果

Fig. 7 Interface microstructure and EDS results

界面化合物如图8所示。发现界面 IMC 的生长不依附于 Cu 的结构, Cu 和 Cu_3Sn 之间的 Pb 相分布。原因是焊料中的 Sn 浓度低,并且 Cu 和 Sn 之间形成 Cu_3Sn 的反应受到限制。贫锡层出现在近界面处,从而抑制了 Cu_3Sn 的继续形成。由于 Cu 、 Sn 浓度比不同, Sn 原子的扩散速率远小于 Cu 的扩散速率。铜原子通过扩散进入焊料,但是原始位置没有锡原子补充。此外, Cu 和 Cu_3Sn 之间没有强烈的反应,两者在界面处失去化学粘附力^[20-21],这导致 IMC 脱落, Pb 相在浓度梯度的作用下扩散到 Cu 和

Cu_3Sn 中。

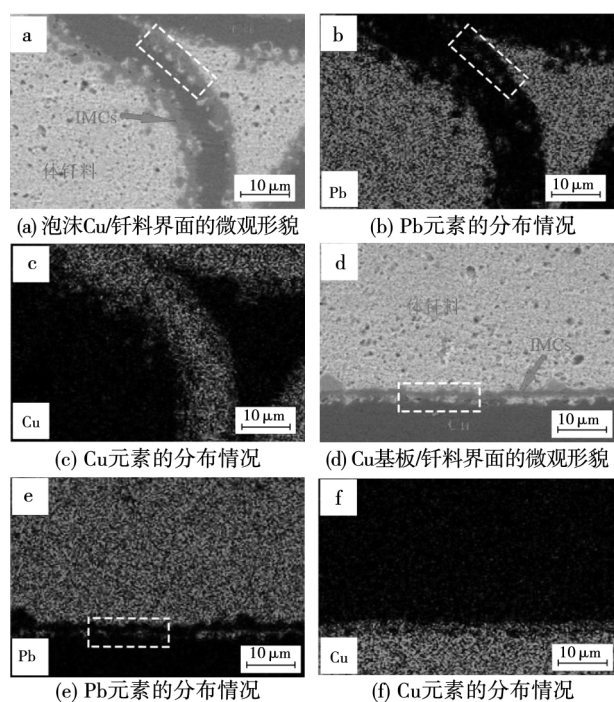


图8 界面 IMC 的显微结构和部分元素分布

Fig. 8 Microstructure and partial element distribution of interface IMC

2.3 焊点的剪切强度和断裂形态

位移与剪切强度之间的关系如图9所示,复合钎料的剪切强度略低于 PbSnAg 合金。含有泡沫铜的接头在剪切试验中有较小的塑性滑动位移。如图10所示,通过比较两种钎料的剪切断裂,可以看出在 PbSnAg 钎料的剪切断裂中,塑性变形位移更长。复合钎料的断口中有明显的断裂平台,发现有 Cu_3Sn 分布在该平面上,如图10(c)所示。断裂平台上的颗粒状化合物是在泡沫 Cu 的表面上生长的 Cu_3Sn ,并且发现含铅的残留焊料在颗粒状 IMC 之间。

根据强度变化和断口形貌,含有泡沫 Cu 的接头断裂位置集中在泡沫 Cu 上的化合物与基体钎料之间。分析其原因是界面上的 Cu_3Sn 与体钎料的弹性模量不同,在受到载荷时,微区内发生的形变不同,由此在界面处出现应力集中,随着载荷的继续施加,界面上的应力集中促使在 Cu_3Sn 化合物与体钎料出现裂纹源,进而失稳扩展。此外,添加泡沫 Cu 促进了冷却过程中液态合金的形核和长大,使体钎料的显微组织粗化,含有 Ag_3Sn 的混合组织聚集粗大,降低了合金的塑性。在这两种因素的作用下,含有泡沫 Cu 的接头剪切强度稍有降低,塑性变形位移缩短。

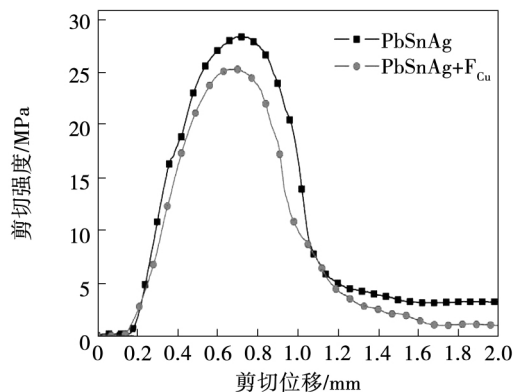


图9 位移-剪切强度关系

Fig. 9 Displacement-shear strength relationship

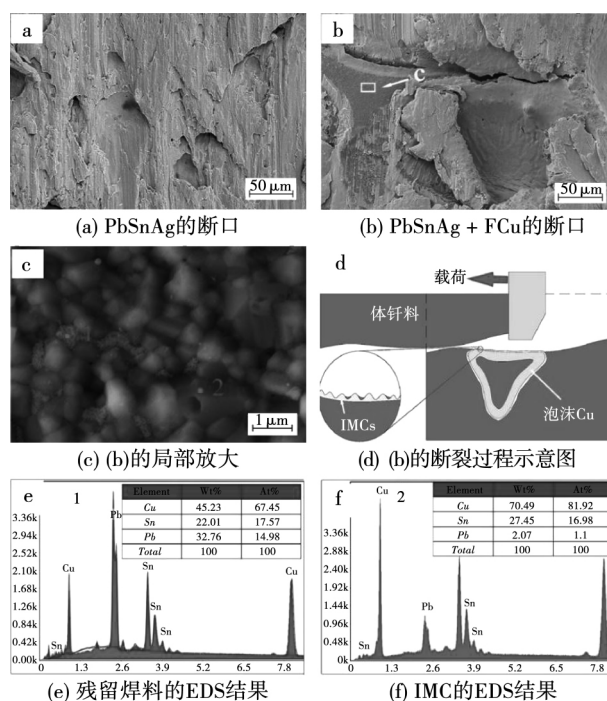


图10 断裂形态和 EDS 结果

Fig. 10 Fracture morphology and EDS results

3 结 论

1) 添加泡沫 Cu 后改善了连接材料的导热性能,且含有 15% 泡沫 Cu 的接头热阻降低了 25.52%。热量借助泡沫 Cu 三维连通的结构和 Cu 良好的导热性,可以在接头中更有效地传导。

2) PbSnAg 合金的显微组织可以分为高铅区和低铅区,其中高铅区为单一的 PbSn 固溶体相,低铅区为 Pb 相和 Ag_3Sn 的混合组织。添加泡沫 Cu 结构后,PbSnAg 钎料的显微组织出现了粗化。PbSnAg 钎料与 Cu 之间形成的界面化合物为 Cu_3Sn ,而不是

常见的 Cu_6Sn_5 。其中 Cu_3Sn 并不是依附着 Cu 生长,发现铅渗入 Cu 与 Cu_3Sn 之间。

3) 复合钎料焊接而成的焊缝强度稍低于 Pb-SnAg 钎料,其塑性变形区也小于 PbSnAg 合金,但仍能满足使用。在复合钎料的断口中可以发现 Cu_3Sn 裸露在表面,说明裂纹沿着体钎料与泡沫 Cu 上化合物的界面处扩展。

参考文献:

- [1] 王宏斌, 吴希绣, 耿楠. Pb-Sn 基钎料显微组织对耐磨性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2001, 25(3): 39.
WANG H B, WU X X, GENG N. Effect of Microstructure on Wear Resistance of Pb-Sn Based Solder [J]. Mechanical Engineering Materials, 2001, 25(3): 39.
- [2] 陈晓宇. 混合集成电路用 Pb-Sn-Sb-Ag 钎料成分设计优化及钎焊可靠性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [3] 刘晓波, 王国勇. Ag 对 Sn-Pb 电子钎料合金性能的影响 [J]. 电子工艺技术, 2002, 23(4): 152.
LIU X B, WANG G Y. Effect of Ag on Properties of Sn-Pb Electronic Solder Alloy [J]. Electronic Technology, 2002, 23(4): 152.
- [4] 刘洋, 张洪林, 夏鹏. SAC/Cu 及 SAC-Bi-Ni/Cu 回流焊界面金属间化合物演变 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(5): 65.
LIU Y, ZHANG H L, XIA P. Evolution of Intermetallic Compounds at Interface of SAC/Cu and SAC-Bi-Ni/Cu Reflow Soldering [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2015, 20(5): 65.
- [5] 付海丰, 刘洋, 孙凤莲. SnBi-SACBN 复合锡膏焊后微观组织及力学性能 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(1): 51.
FU H F, LIU Y, SUN F L. Microstructure and Mechanical Properties of SnBi-SACBN Composite Solder Paste after Soldering [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2018, 23(1): 51.
- [6] 胥超, 徐永青, 杨拥军. Au/Sn 共晶键合技术在 MEMS 封装中的应用 [J]. 微纳电子技术, 2014, 51(2): 131.
XU C, XU Y Q, YANG Y J. Application of Au/Sn Eutectic Bonding Technology in MEMS Packaging [J]. Micro Nano Electronic Technology, 2014, 51(2): 131.
- [7] 殷祚炆. 微焊点 Cu-Sn 化合物演变规律及其原位力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [8] 郭孟蛟. 形成 Cu/SAC105/Cu 全化合物微焊点热压钎焊工艺及机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [9] 郭福, 刘素婷, 左勇. 混合集成电路用 Pb-Sn-Sb-Ag 钎料的热疲劳 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(7): 1114.
GUO F, LIU S T, ZUO Y. Thermal Fatigue of Pb-Sn-Sb-Ag Solder for Hybrid Integrated Circuits [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(7): 1114.
- [10] BETZWARKOTAS A, KHATIBI G. Isothermal Bending Fatigue Response of Solder Joints in High Power Semiconductor Test Structures [J]. Microelectronics Reliability, 2017, 76: 357.
- [11] MCCLUSKEY F P, DASH M, WANG Z, et al. Reliability of High Temperature Solder Alternatives [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(9-11): 1910.
- [12] MENON S, GEORGE E, OSTERMAN M, et al. High Lead Solder (Over 85wt%) Solder in the Electronics Industry: RoHS Exemptions and Alternatives [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(6): 4021.
- [13] WANG C, LIN T, LI N, et al. Heat Transfer Enhancement of Phase Change Composite Material: Copper Foam/paraffin [J]. Renewable Energy, 2016, 96: 960.
- [14] El-Hadek M A, KAYTBAY S. Mechanical and Physical Characterization of Copper Foam [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2008, 4(1): 63.
- [15] CHEN Hongtao. Cu@Sn Core-Shell Structure Powder Preform for High-Temperature Applications Based on Transient Liquid Phase Bonding [C]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2107, 32(1): 441.
- [16] KHATIBI G, BETZWAR Kotas A, LEDERER M. 时效对高温含铅焊点力学性能的影响 [J]. 微电子可靠性, 2018, 85: 1.
KHATIBI G, BETZWAR Kotas A, LEDERER M. Effect of Aging on Mechanical Properties of High Temperature Pb-rich Solder Joints [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 85: 1.
- [17] KIM J H, KIM R H, KWON H S. Preparation of Copper Foam with 3-dimensionally Interconnected Spherical pore Network by Electrodeposition [J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(8): 1148.
- [18] SCHOELLER H, BANSAL S, KNOBLOCH A, et al. Effect of Alloying Elements on the Creep Behavior of High Pb-based Solders [J]. Materials Science and Engineering, 2011, 528(3): 1063.
- [19] 王昆, 刘晓剑, 王玲, 等. 电子行业中复合材料导热模型及机理研究进展 [J]. 电子工艺技术, 2014(1): 11.
WANG Kun, LIU Xiaojian, WANG Ling, et al. Research Progress of Thermal Model and Mechanism of Composite Materials in Electronics Industry [J]. Electronics Process Technology, 2014(1): 11.
- [20] TSAI M H, CHEN W M, TSAI M Y, et al. Sn Concentration Effect on the Formation of Intermetallic Compounds in High-Pb/Ni Reactions [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(2): 0.
- [21] JANG, Jin-Wook. Spalling of Cu_3Sn Intermetallics in High-lead 95Pb5Sn Solder Bumps on Cu under Bump Metallization During Solid-state Annealing [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(12): 8286.

(编辑: 王 萍)