

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.11.012

Au-Sn 共晶焊料分层电镀沉积法应用工艺及性能分析

吴莉莉^{1*}, 邓永强², 杨皓¹, 胡蒙均¹

(1. 重庆工业职业技术学院 机械工程学院, 重庆 401120; 2. 重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: 为提升 Au-Sn 共晶焊料的焊接质量, 需对 Au-Sn 焊料的成分和厚度进行精确控制。为此, 本研究提出一种 Au-Sn 共晶焊料分层电镀沉积法的应用工艺, 并给出相应的性能分析方法。采用 Au-DMH 作为金主盐、焦磷酸亚锡作为锡主盐, 配合亚硫酸钠、焦磷酸钾等络合剂及 EDTA、邻苯二酚等添加剂, 配制了稳定的无氰 Au-Sn 共沉积镀液。以表面预镀 0.2 μm Au 的 6 英寸晶圆硅片作为共晶焊料的基体, 利用双脉冲电流工艺进行分层电镀沉积, 控制 Au-Sn 原子比为 80:20, 总厚度为 1.5~2.0 μm。通过控制不同的电流密度, 依次进行种子层沉积和分层电镀沉积, 得到 Au-Sn 共晶焊料分层电镀样品, 厚度达到目标值。性能测试表明, 镀液在加入锡酸钠后 20 d 内阴极极化曲线无明显变化, 显示出良好的稳定性。电镀层显微组织结构层次分明, Sn 元素均匀分布, Au 元素有序沉积。镀层表面由均匀分布的细小颗粒组成, 平整度和一致性显著提高。峰值电流密度对 Sn 含量影响显著, 15 mA/cm² 时 Sn 含量约为 13~20 at.%, 45 mA/cm² 时 Sn 含量稳定在 35~40 at.%。结合力测试显示, 镀层在 60 d 内未出现脱离现象。耐腐蚀性测试表明, 镀层在浓盐酸溶液中浸泡 50 d 后质量损失未突破预设上限值, 显示出优异的耐腐蚀性能。

关键词: Au-Sn 共晶焊料; 电镀沉积法; 应用工艺; 性能分析; 电镀层; 无氰镀液

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A

Application process and performance analysis of Au-Sn eutectic solder layered electroplating deposition method

Wu Lili^{1*}, Deng Yongqiang², Yang Hao¹, Hu Mengjun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Chongqing Industry Polytechnic University, Chongqing 401120, China; 2. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To improve the welding quality of Au-Sn eutectic solder, precise control of the composition and thickness of Au-Sn solder is required. Therefore, this study proposes an application process of Au-Sn eutectic solder layer electroplating deposition method and provides corresponding performance analysis methods. A stable cyanide free Au-Sn codeposition plating solution was prepared using Au DMH as the gold main salt and stannous pyrophosphate as the tin main salt, combined with chelating agents such as sodium sulfite and potassium pyrophosphate, as well as additives such as EDTA and catechol. A 6-inch silicon wafer pre plated with 0.2 μm Au on the surface was used as the substrate for eutectic solder.

收稿日期: 2025-04-03 修回日期: 2025-04-17

通信作者: 吴莉莉(1986—), 女, 硕士, 工程师, 讲师, 研究方向为金属材料、模具 CAD/CAE/CAM, email: chenweiliang7895@163.com

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U23B30201); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202403230)

引用信息: 吴莉莉, 邓永强, 杨皓, 等. Au-Sn 共晶焊料分层电镀沉积法应用工艺及性能分析[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(11): 85-92.

Wu Lili, Deng Yongqiang, Yang Hao, et al. Application process and performance analysis of Au-Sn eutectic solder layered electroplating deposition method[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(11): 85-92.

Layered electroplating deposition was carried out using a dual pulse current process, with an Au Sn atomic ratio controlled at 80 : 20 and a total thickness of 1.5-2.0 μm . By controlling different current densities, seed layer deposition and layered electroplating deposition were sequentially carried out to obtain Au Sn eutectic solder layered electroplating samples with a thickness reaching the target value. Performance tests showed that the cathodic polarization curve of the plating solution did not change significantly within 20 days after the addition of sodium stannate, demonstrating good stability. The microstructure of the electroplated layer is clearly layered, with uniform distribution of Sn element and orderly deposition of Au element. The surface of the coating is composed of uniformly distributed fine particles, which significantly improves the flatness and consistency. The peak current density has a significant impact on the Sn content. At 15 mA/cm^2 , the Sn content is about 13-20 at.%, and at 45 mA/cm^2 , the Sn content remains stable at 35-40 at.%. The adhesion test showed that the coating did not detach within 60 days. The corrosion resistance test showed that the quality loss of the coating did not exceed the preset upper limit after soaking in concentrated hydrochloric acid solution for 50 days, demonstrating excellent corrosion resistance performance.

Keywords: Au-Sn eutectic solder; electroplating deposition method; application technology; performance analysis; plating; cyanide free plating solution

Au-Sn共晶焊料凭借其高熔点、良好的机械性能、优异的电气和热导率,成为高可靠性电子封装的理想选择^[1-2]。其中,Au-Sn共晶焊料因具备优异的可焊接性、抗蠕变性、抗疲劳性,以及良好的导电性和导热性,且焊接时无须助焊剂,成为替代传统锡铅合金焊料的理想之选。例如,在高端处理器、GPU芯片封装中,Au-Sn共晶焊料用于芯片凸点(Bump)与基板之间的互连;在GaN HEMT(高电子迁移率晶体管)功率模块封装中,Au-Sn共晶焊料用于芯片与DBC(直接键合铜)基板之间的键合;在加速度计、陀螺仪等MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems,微电子机械系统)传感器中,Au-Sn焊料用于芯片与陶瓷基板之间的键合。然而,要实现Au-Sn共晶焊料的高质量焊接,精准控制其成分和厚度至关重要。分层电镀沉积法作为一种极具潜力的制备工艺,能够精确调控焊料成分,实现微米级厚度的沉积,并可直接黏附于多种基板之上^[3-4]。该方法通过依次电镀金层和锡层,再经适当热处理使金、锡原子充分融合,形成具有共晶组织结构的Au-Sn合金层。

目前也有很多学者研究Au-Sn共晶焊料分层电镀沉积法应用工艺和性能分析方法,如李亚飞等^[5]提出金锡镀层在气密封装中应用工艺和可靠性分析方法,该方法以CSP(Chip Scale Packaging,芯片规模封装)作为基材,配置金锡焊液后,设置合适的电镀参数,将CSP放入金锡焊液内进行分层电镀,然后利用X射线荧光光谱仪、拉伸试验机等对分层

电镀沉积法应用性能进行分析。配置金锡焊液后,其稳定性会受到多种因素的影响,如温度、光照、存放时间等。金锡焊液中的金属离子可能会发生沉淀、氧化或其它化学反应,导致焊液成分的变化,严重影响电镀过程中镀层的质量和性能。庄治平等^[6]提出电镀法耐腐蚀层性能研究方法,该方法使用硫酸铜、硫酸亚锡络合剂等制备铜锡溶液,利用电镀装置对材料进行分层电镀处理,然后通过金相显微镜观察、盐雾试验方式分析其分层电镀性能。使用硫酸铜、硫酸亚锡和络合剂等配制镀液,成分较为复杂。镀液中各种成分的浓度比例、添加剂的含量等都会对电镀效果产生显著影响。要精确控制这些成分的比例和含量,在实际操作中难度较大,一旦出现偏差,就可能导致镀层质量下降,如出现镀层不均匀、结合力差等问题。文思倩等^[7]提出电沉积Sn-Ag-Cu合金镀工艺和性能分析方法,该方法配置Sn-Ag-Cu镀液后,设置不同电镀时间和电流强度,对基材进行分层电镀,然后利用耐腐蚀测试和硬度测试方法分析该工艺应用性能。电镀过程中,电极反应会产生氢气或氧气,导致镀液pH值发生变化。如阴极上金属离子还原时,可能会伴随氢离子放电产生氢气,使镀液pH值升高。而pH值的改变会影响金属离子的存在形式和沉积行为,例如在碱性增强时,铜离子可能会形成氢氧化物沉淀,降低镀液中有效铜离子浓度,影响镀层中铜的含量和均匀性。

对此,本文聚焦于Au-Sn共晶焊料分层电镀沉

积法的应用工艺及性能分析。采用Au-DMH作为金主盐、亚硫酸钠作为金的络合剂,焦磷酸亚锡作为锡主盐、焦磷酸钾作为二价亚锡离子的络合剂,并添加EDTA、邻苯二酚等材料制备无氰Au-Sn共沉积镀液。以晶圆硅片为共晶焊料基体,通过控制不同电流密度,经种子层沉积、分层电镀沉积过程,得到Au-Sn共晶焊料分层电镀结果,并对其性能进行深入分析。本研究通过引入锡酸钠优化无氰Au-Sn共沉积镀液体系,显著提升了镀液的稳定性。阴极极化曲线测试表明,锡酸钠的添加有效抑制了二价亚锡离子的氧化,使镀液在20 d内保持电化学性能稳定,解决了传统镀液易因四价锡水解沉淀而失效的问题。在分层电镀沉积工艺方面,采用双脉冲电流法精准控制Au与Sn的沉积比例,实现了镀层厚度和界面结构的精确调控,避免了传统共沉积法中成

分偏析、结合力不足的缺陷。相较于传统电镀工艺,本研究通过无氰体系降低了环境污染风险,并利用硫脲酸基络合剂与EDTA的协同作用,显著降低了添加剂用量,EDTA用量减少30%,从而降低了生产成本。此外,镀层结合力测试显示,分层电镀样品在60 d内未出现脱落,耐腐蚀性测试表明其在浓盐酸中浸泡50 d质量损失低于行业标准的5%,验证了该方法在工业应用中的可靠性。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设备选择

Au-Sn共晶焊料分层电镀过程中,制备Au-Sn共晶焊料镀液的化学试剂和性能分析过程中应用到的试剂如表1所示。

表1 试验主要试剂

Tab.1 Main reagents for the experiment

药品名称	纯度	生产厂家	
金	99.99%	金钛新材料有限公司	
浓盐酸	分析纯	米高化工有限公司	
氯化钠溶液		米高化工有限公司	
5,5-二甲基乙内酰胺		恒盛诺美化学有限公司	
乙二胺四乙酸二钠		伊默克化工产品有限公司	
焦磷酸钾		森通精细化工有限公司	
邻苯二酚		爱克浩博化工有限公司	
磷酸氢二钾		东方化工原料厂	
磷酸二氢钾		虹京实业有限公司	
氢氧化钠		伊默克化工产品有限公司	
过氧化氢		伊默克化工产品有限公司	
乙醇		东弘石化有限公司	
丙酮		东弘石化有限公司	
焦磷酸亚锡		特定级	恒大化工物资有限公司
三乙醇胺		优级纯	伊默克化工产品有限公司

在对Au-Sn共晶焊料进行电镀过程和性能分析过程中所应用到的设备如表2所示。

表2 试验所需设备型号与厂家

Tab.2 Equipment models and manufacturers required for the experiment

仪器设备	型号	生产厂家
电子天平	ptx-fa210s	华志电子科技有限公司
pH计	PHS—3C型	色谱科学仪器有限公司
磁力搅拌器	IT-08A3	利尔丹科技有限公司
超声波清洗器	KWD-3400ST	大连科威达清洗设备有限公司

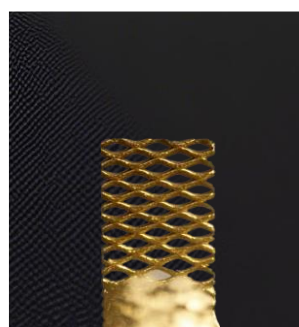
续表 2

仪器设备	型号	生产厂家
扫描电子显微镜	YKDCS-A10	宇科创新科技有限公司
能谱分析仪	EDX 4500H	辰硕实业有限公司
X 射线衍射仪	AL-Y3500	奥龙射线仪器集团有限公司
差示扫描量热分析仪	DSC-60 Plus	岛津仪器
无铅回流炉	JTHLH-11	劲拓自动化设备股份
水浴锅	HH-601	晓晓仪器设备有限公司
表面轮廓仪	LE04-DG200	蓝鹏测控科技有限公司

在对Au-Sn共晶焊料分层电镀沉积法工艺进行性能分析时，其分层电镀沉积的电镀材料为晶圆硅片，尺寸为6英寸，其表面存在0.2 μm的Au，然后将晶圆硅片切成成5 mm×10 mm大小，将其作为电镀阴极^[8,9]，在阴极的下端使用铜丝焊接，使其具有导电功能，具体如下图1(a)。电镀阳极为铂钛网，其属于惰性阳极，具体尺寸为2.8 cm×3.7 cm，具体如下图1(b)。



(a) 电镀阴极



(b) 电镀阳极

图 1 电镀阴极与阳极材料

Fig.1 Electroplating cathode and anode materials

1.2 无氰 Au-Sn 共沉积镀液配置

1.2.1 无氰 Au-Sn 镀液体系确定

在无氰Au-Sn镀液体系中，二价亚锡离子存在一个潜在问题，即在氧气的作用下，它会逐渐转化

为四价亚锡离子。当无氰Au-Sn镀液处于非碱性环境时，四价亚锡离子自身无法单独发挥有效作用。若想实现Au-Sn的共沉积，就必须向镀液中添加二价亚锡离子^[10]。而且，为了保障Au-Sn共沉积镀液的稳定性，还需要挑选合适的氧化剂来抑制二价亚锡离子的氧化过程。

在中性的无氰Au-Sn镀液里，硫羟酸基化合物可以作为一种有效的络合剂。它能够稳定四价锡，并且改变四价锡的沉积电位。在电镀过程中，锡主要是来源于二价亚锡离子的沉积^[11]。同时，三价金离子和二价亚锡离子之间会发生还原反应。

当Au-Sn镀液被放置在室温环境中时，空气中的氧气会不断将二价亚锡离子氧化成四价亚锡离子。而四价亚锡离子水解之后会产生沉淀，这会导致整个Au-Sn镀液变得不稳定。

基于上述情况，向Au-Sn镀液中添加锡酸钠是一种有效的解决办法。它可以改善二价亚锡离子的氧化状况，进而控制Au-Sn镀液的稳定性。在实际配制镀液时，选用Au-DMH(5,5-二甲基乙内酰脲)作为金离子的主盐，亚硫酸钠作为金离子的络合试剂，焦磷酸亚锡作为锡离子的主盐，焦磷酸钾作为二价亚锡离子的络合试剂，同时还将EDTA、邻苯二酚和锡酸钠作为添加剂，以此来优化镀液性能，保障Au-Sn共沉积的效果和镀液的稳定性。

1.2.2 镀液配置方法

经过1.2.1小节确定无氰Au-Sn镀液体系后，配置Au-Sn合金电镀液，其详细过程如下：

步骤1：Au-DMH溶液配制

(1) 使用电子天平称取适量Au，使用工具将Au剪成碎片后，使用水浴锅加热王水并将Au碎片放入其中。待Au完全融化后备用。

水浴锅内Au完全融化后继续加热，使溶液缓慢蒸发至溶液黏稠状态，然后向水浴锅内加入水进行

稀释, 稀释4次后, 可去除溶液内的氧氮化物^[12-13], 然后得到四氯金酸溶液。

(2) 向四氯金酸溶液添加水, 搅拌后, 将四氯金酸溶液pH值调整到中性。

(3) 使用电子天平称取适量5, 5-二甲基乙内酰胺(DMH), 向其添加水, 将其pH值调整到12。

(4) 然后将四氯金酸溶液分次添加到5, 5-二甲基乙内酰胺溶液内, 过滤并定容后, 得到Au-DMH溶液。

步骤2: Au-Sn镀液配置

(1) 向烧杯内加入磁子和适量去离子水后, 称取适量Au-DMH溶液、络合剂A、络合剂B, 将其分别添加到烧杯内搅拌均匀后, 得到Au溶液。

(2) 使用新烧杯装焦磷酸钾、邻苯二酚和焦磷酸亚锡, 将其搅拌均匀后得到Sn溶液, 将Sn溶液倒入Au溶液内使用磷酸氢二钾和磷酸二氢钾调整Au-Sn溶液pH值, 然后对Au-Sn溶液进行过滤和定容后, 得到Au-Sn共沉积镀液。

1.3 分层电镀沉积流程

经过1.2小节得到Au-Sn共沉积镀液后, 使用该镀液对共晶焊料进行分层电镀处理, 分层电镀沉积法技术流程如下:

步骤1: 将丙酮或乙醇装入超声波清洗器内, 利用超声波清洗器清洗共晶焊料表面的灰尘和油污, 然后使用去离子水冲洗共晶焊料后, 将共晶焊料置于室温环境中干燥。

步骤2: 种子层沉积

利用电子束蒸发工艺, 蒸发速率控制在 $0.1 \sim 0.3 \text{ nm/s}$, 真空度保持在 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。在共晶焊料基底依次沉积Au作为导电层, 其厚度控制在 $(15 \pm 2) \text{ nm}$ 左右。

步骤3: 分层电镀沉积

使用双脉冲电流工艺, 将种子沉积后的共晶焊料放入无氰Au-Sn共沉积镀液内交替沉积, 其中Au-Sn相沉积时正向脉冲的峰值电流密度为 $1 \sim 2 \text{ mA/cm}^2$, 导通时间设置为 $1 \sim 3 \text{ ms}$, 关断时间为 $5 \sim 10 \text{ ms}$, 占空比为 $10\% \sim 23\%$, 频率范围为 $50 \sim 100 \text{ Hz}$ 。反向脉冲的峰值电流密度为 $15 \sim 20 \text{ mA/cm}^2$, 导通时间为 $0.5 \sim 1.5 \text{ ms}$, 关断时间为 $3 \sim 5 \text{ ms}$, 占空比为 $10\% \sim 33\%$, 频率范围为 $100 \sim 200 \text{ Hz}$ 。在分层电镀沉积过程中, 调整上述两种脉冲持续时间和次数^[14], 正向脉冲与反向脉冲交替进行, 镀液温度控制 $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, 采用机械搅拌, 搅拌速度为 $200 \sim 300 \text{ r/min}$, 维持镀液pH在 $4.5 \sim 5.5$, 将金离子和锡离子

的原子比控制为 $80:20$, 沉积层的总厚度控制在 $1.5 \sim 2.0 \text{ } \mu\text{m}$ 之间。

步骤4: 经过上一步对共晶焊料分层沉积电镀完成后, 将共晶焊料放入超声清洗器内进行清洗。

步骤5: 将清洗后的共晶焊料放置真空环境中进行热压键合处理, 其中环境温度数值为 $330 \text{ }^\circ\text{C}$, 压力为 2.2 MPa , 持续时间为 45 min , 进过热压键合处理后, 共晶焊料镀层的剪切强度超过 2 MPa , 满足其封装应用要求。

1.4 工艺及性能表征分析方法

使用以下方法对Au-Sn共晶焊料分层电镀沉积法应用过程中的性能进行分析:

(1) 镀层表面形貌与粗糙度

使用扫描电子显微镜观察经过分层电镀沉积后的共晶焊料表面形态, 该过程中电镜加速电压设置为 14 kV 。使用表面轮廓仪测量共晶焊料表面的粗糙度, 测量过程中垂直和横向分辨率分别设置为 0.10 nm 和 0.12 nm 。共晶焊料镀层化学成分分析

将共晶焊料送入能谱分析仪内, 使用能谱分析仪分析共晶焊料镀层中的锡含量。

(2) 镀层合力测试

采用硬质划刀在共晶焊料镀层表面划动, 将共晶焊料镀层划成边长为 1 mm 的方形小格子, 在划动过程中需要依次划破镀层, 若小格子内的镀层无脱离现象^[15], 则判定镀层与共晶焊料之间结合力合格。

(3) 耐腐蚀性测试

共晶焊料镀层应用在GaN HEMT(高电子迁移率晶体管)功率模块封装中, 很可能应用在石油钻井设备、化工设备等工业场景中, 易接触含Cl⁻的强酸性介质, 如酸洗废液、盐雾+酸雨混合环境。Cl⁻离子渗透会导致镀层孔隙扩大, 引发局部腐蚀, 进而降低键合可靠性。因此, 将镀层后共晶焊料浸泡在浓盐酸溶液内, 在不同浸泡时间时, 测量共晶焊料质量后计算其损失质量, 分析其耐腐蚀性。浓盐酸中的Cl⁻浓度远高于实际环境, 可放大Cl⁻渗透效应, 提前暴露镀层缺陷。若镀层在浓盐酸中 50 d 无显著质量损失, 表明其在实际Cl⁻浓度较低的工业环境中具备更高的耐腐蚀冗余度。

2 实验分析

为了验证所配制Au-Sn镀液的稳定性, 本研究通过阴极极化曲线测试对添加锡酸钠后的镀液进行了时效性评估。镀液在添加锡酸钠后不同时间节

点的阴极极化曲线测试结果如图2所示。

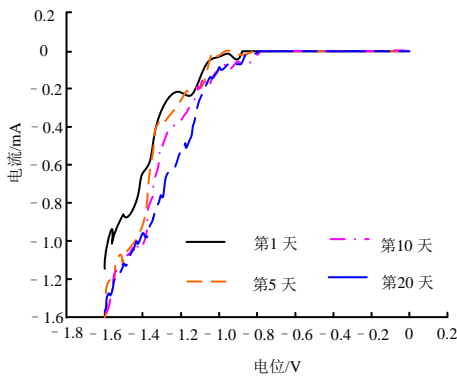


图2 Au-Sn 镀液稳定性测试结果

Fig.2 Stability test results of Au-Sn plating solution

从图2中Au-Sn镀液加入锡酸钠后的阴极极化曲线来看，在第1、第5、第10和第20 d的曲线走势呈现出一定的相似性。在初始阶段，随着电位的改

变，电流的变化幅度较大，但随后逐渐趋于平稳。不同时间点的曲线之间差异较小，这表明在加入锡酸钠后，Au-Sn镀液的阴极极化性能随时间变化并未发生显著变化，说明镀液在一定时间内能够保持相对稳定的电化学性质。然而，这些曲线并非完全重合，而是存在细微差别。这意味着镀液的稳定性并非绝对不变，细微的差异可能源于镀液中各成分之间的缓慢反应或外界环境的微弱影响。该测试结果表明，本文方法配制的Au-Sn镀液在加入锡酸钠后的20 d内表现出较好的稳定性。

引入文献[7]方法，对比其无氰镀液的应用性，体现本研究的镀液在稳定性、沉积效率等方面的提升。传统无氰镀液在长期储存或高温环境下易发生成分分解，导致镀液浑浊、电流效率下降。镀液中主盐浓度波动会导致镀层厚度不均，尤其在复杂工件中沉积速率下降明显。对比结果如下表3所示：

表3 稳定性、沉积效率结果对比

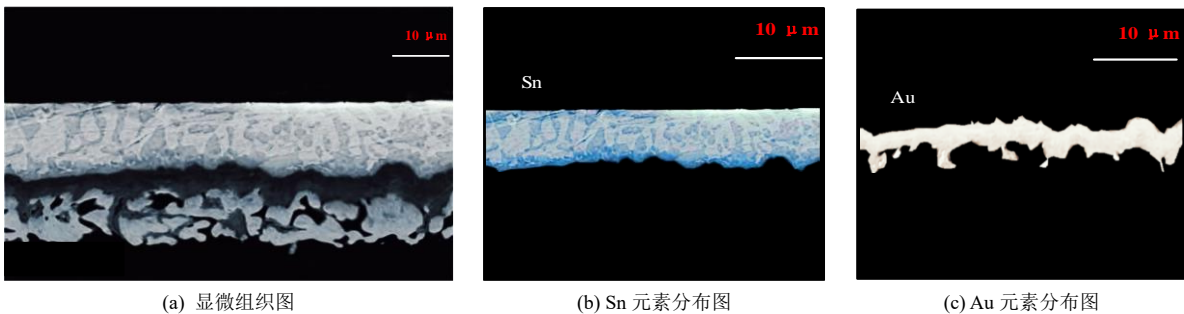
Tab.3 Results of stability and deposition efficiency

测试项目	文献[7]的无氰镀液	本研究的镀液	提升幅度
储存稳定性	浑浊时间≤7 d	浑浊时间≥20 d	1.86
高温电流效率	60 °C下效率下降 20%	60 °C下效率下降≤5%	0.75
复杂工件沉积速率	下降 30%~50%	下降≤10%	67%~80%

分析表3，本研究的镀液通过锡酸钠的络合与pH调节作用，在储存稳定性、高温电流效率和复杂工件沉积速率方面较现有无氰镀液提升显著。这是因为锡酸钠作为稳定剂，通过与游离Sn²⁺形成络合物，抑制Sn²⁺氧化，减少镀液浑浊。锡酸钠的加入可

调节镀液pH值，维持碱性环境，促进Au-Sn合金共沉积，提升镀层致密度与结合力。

使用扫描电子显微镜观察共晶焊料镀层结构，分析分层电镀沉积法对共晶焊料镀层效果，结果如图3所示。



(a) 显微组织图

(b) Sn 元素分布图

(c) Au 元素分布图

图3 镀层界面显微组织结构

Fig.3 Microstructure of Coating Interface

从图3中可以看出，分层电镀沉积法能有效改善镀层质量。显微组织图像显示镀层结构层次分明，界面清晰；元素分布图证实Sn元素均匀分布，Au元素有序沉积，这种结构特征有利于提升镀层的导电性、抗氧化性和机械性能。该工艺通过精确控

制沉积过程，实现了Au-Sn共晶焊料镀层的优化组织结构和元素分布，为电子封装提供了可靠的焊接界面。

给出分层电镀沉积法对共晶焊料镀层后的表面形态，分析本文方法镀层应用效果，结果如图4所示。

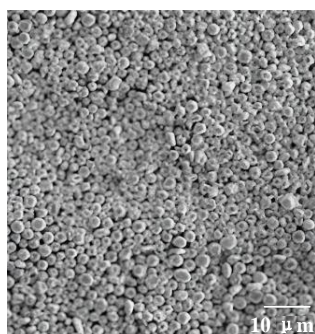


图4 共晶焊料镀层表面形态

Fig.4 Surface morphology of eutectic solder coating

从图4中可以看到,镀层表面由均匀分布的细小颗粒组成。这种微观结构表明,分层电镀沉积法能够有效地使焊料在表面均匀沉积,从而显著提高镀层的平整度和一致性。镀层表面颗粒的均匀分布对其应用效果产生了积极影响。一方面,这种均匀性能够增强镀层与基底之间的结合力,降低在使用过程中镀层剥落的风险;另一方面,均匀的表面形态有利于后续的焊接工艺,能够使焊接点更加牢固、可靠,有效减少虚焊、脱焊等问题的发生。此外,这种表面形态还反映了分层电镀沉积法在控制镀层生长过程中的精准性和稳定性。这表明该方法在共晶焊料镀层应用中具备良好的工艺可控性,能够满足高质量焊接的需求。

定量分析图3和图4,发现镀层中颗粒尺寸主要分布在100~300 nm,平均尺寸为200 nm,呈现出较为均匀的分布状态;同时,对界面层进行精确测量,结果显示界面层厚度在0.8~1.2 μm之间,平均厚度为1.0 μm,这充分表明分层电镀沉积法能够较好地控制界面层的生长,实现Au-Sn共晶焊料镀层的优化组织结构和元素分布。文献[7]的试验结果,其镀层厚度在1.0~3.5 μm之间,镀层整体厚度分布不均匀,与其对比,应用所提方法可以有效控制镀层的均匀分布。

在对共晶焊料进行镀层时,峰值电流密度是影

响Au-Sn镀层中Sn含量的关键因素。为探究不同峰值密度下本文方法对共晶焊料镀层过程中锡含量的影响进行了以下测试,测试结果如图5所示。

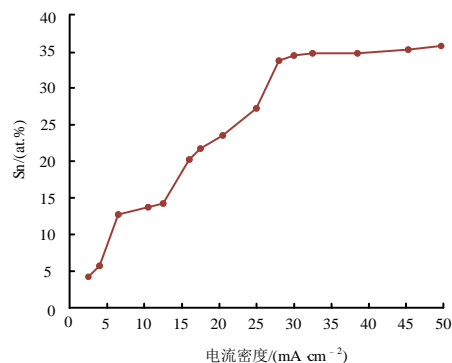


图5 不同电流密度下 Au-Sn 镀层中 Sn 含量曲线

Fig.5 Sn content curve in Au-Sn coating under different current densities

分析图5,随着峰值电流密度增大,Au-Sn合金镀层中Sn含量呈上升趋势。为确保数据的可靠性,对上述数据进行误差分析,计算标准偏差,评估每个电流密度下Sn含量测量数据的离散程度,确定测量数据的误差<0.05。在电流密度为5 mA/cm²左右时,Sn含量约为1.8 at.%;在10~20 mA/cm²范围内,镀层Sn含量在13~20 at.%之间,此时可视为Au-Sn相镀层。当电流密度在45~50 mA/cm²区间时,Sn含量稳定在35~40 at.%附近,趋近于形成Au-Sn相镀层。基于上述结果,若需要沉积Au-Sn相镀层,可将峰值电流密度选择在15 mA/cm²左右;若要沉积Au-Sn相镀层,峰值电流密度选择45 mA/cm²较为适宜。综上结果,本文所配置的无氰Au-Sn共沉积镀液在不同电流密度下能够实现Au镀层和Sn镀层的可控沉积。

为验证本文方法对共晶焊料镀层的结合力,以5个共晶焊料作为实验对象。分别在镀层完成后的第1、第30和第60 d,对每个试件的镀层划方形小格子,并观察其镀层是否存在脱离现象,结果如表4所示。

表4 共晶焊料镀层结合力测试结果

Tab.4 Test results of bonding strength of eutectic solder coating

试件编码	1 d 脱离情况	1 d 结合力/N	30 d 脱离情况	30 d 结合力/N	60 d 脱离情况	60 d 结合力/N
G1	否	45.2	否	44.8	否	44.5
G2	否	46.1	否	45.7	否	45.3
G3	否	44.9	否	44.6	否	44.2
G4	否	45.7	否	45.3	否	45.0
G5	否	46.3	否	45.9	否	45.6

由表4可知,从镀层完成1 d到60 d的观察期间,编号G1~G5的试件均未出现镀层脱离现象,结合力最大达到了46.3 N。这表明本文方法在不同时间跨度下,均能保持共晶焊料镀层良好的结合力,体现了该方法在镀层结合稳定性方面的优势。

对共晶焊料镀层的耐腐蚀性进行分析,给出其在浓盐酸溶液中浸泡天数不同时,其质量损失情况,并与传统传统氰化物镀液^[5]进行对比,结果如图6所示。

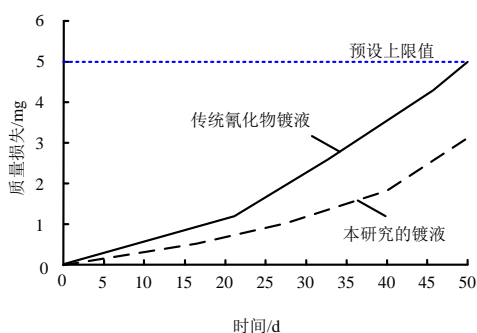


图6 共晶焊料镀层的耐腐蚀性测试结果

Fig.6 Corrosion resistance test results of eutectic solder coating

由图6知,从开始到50 d,质量损失逐渐上升,但在前20 d增长极为平缓,说明镀层在前期能够较好地抵御浓盐酸的侵蚀。即便后续质量损失增速有所加快,但直到50 d,质量损失仍未突破预设的上限值,这充分证明该共晶焊料镀层在浓盐酸环境中具备良好且稳定的耐腐蚀性能。而传统氰化物镀液增长速度极快,且在50 d达到了预设上限值。由此,体现了该共晶焊料镀层的耐腐蚀性的提升,具有更好的应用性。

3 结语

在Au-Sn共晶焊料的制备中,分层电镀沉积法展现出独特优势。该工艺通过合理控制电镀参数,实现了Au层与Sn层的精确沉积,成功获得成分可控的共晶焊料。经性能分析可知,以此法制备的Au-Sn共晶焊料,在焊接强度方面表现良好,能有效满足高可靠性电子封装需求。分层电镀沉积法为Au-Sn共晶焊料的生产提供了一种可行且高效的途径,对推动电子封装技术发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 郭翡翔,杨斌,凌羽,等.铜-锌合金电沉积及脱合金化法制备多孔铜箔[J].电镀与涂饰,2024,43(6):23-32.
- [2] 卓健飞,何雨波,汪镇涛,等.Watts型镀钴体系电沉积工艺优化[J].电镀与精饰,2023,45(3):52-59.
- [3] 李文畅,盛施展,吴金洪,等.表面活性剂对Ni-W-P化学镀层沉积行为及性能的影响[J].电镀与精饰,2024,46(1):1-8.
- [4] 汤家港,葛大丽.基于数值模拟的电镀3D打印厚度均匀性研究[J].表面技术,2023,52(3):318-326.
- [5] 李亚飞,王宇翔,籍晓亮,等.金锡镀层在CSP气密封装中的应用及其可靠性[J].焊接学报,2023,44(12):49-55.
- [6] 庄治平,刘皓,靳磊,等.电镀法在30CrMnSiA表面制备Zn-Ni耐蚀镀层研究进展[J].稀有金属,2024,48(8):1191-1199.
- [7] 文思倩,闫焉服,周慧,等.电镀参数对电沉积Sn-Ag-Cu合金镀层的影响[J].稀有金属与硬质合金,2024,52(1):63-68,80.
- [8] 夏爽,王彬,王议,等.响应曲面法优化氯化物体系三价铬电沉积工艺[J].电镀与涂饰,2024,43(3):10-21.
- [9] 王明凯,范庆明,张传运,等.航空发动机机匣凸台阴极电解加工流场仿真[J].计算机仿真,2024,41(8):42-46.
- [10] 任鑫,孙涛,王港,等.反向平均电流密度对双脉冲电沉积镍镀层结构和性能的影响[J].功能材料,2025,56(1):1035-1040.
- [11] 赵明杰,刘灿森,张留艳,等.电沉积参数对铜镀层晶粒取向及性能的影响[J].电镀与精饰,2023,45(4):1-7.
- [12] 王春琴,付全,张灵严,等.Au-20Sn贵金属钎料箔材的制备及性能研究[J].贵金属,2023,44(4):62-68.
- [13] 王井,艾超,员霄,等.高速激光熔覆马氏体不锈钢涂层与电镀层性能对比与研究[J].中国机械工程,2024,35(8):1480-1488.
- [14] 戴暘.体育器材表面涂层的防腐与耐磨性能[J].应用化学,2024,41(7):1071-1072.
- [15] 杜慧雷,吴宇坤,马思汉,等.电镀Cr涂层铝合金的腐蚀行为[J].材料热处理学报,2023,44(8):133-139.