

微电子封装用键合金丝替代产品的研究现状

康菲菲, 吴永瑾*, 孔建稳, 周文艳, 杨国祥, 裴洪营, 张昆华, 俞建树
(贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘要: 随着电子封装技术的发展, 传统键合金丝在性能和价格上已经不具备优势。采用复合和改性等方法可以开发出满足要求的键合金丝替代品。总结了金包银复合键合丝、钯包铜复合键合丝、金合金键合丝和银合金键合丝共4种键合金丝替代产品的性能特点、成分配比、生产技术难点和关键点, 介绍了部分典型产品, 并对替代产品的发展趋势进行了展望。

关键词: 金属材料; 微电子封装; 键合金丝; 替代品; 成分配比; 技术难点

中图分类号: TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)04-0081-06

Research Status of Substitute Products for Gold Bonding Wires Used in Microelectronics Packaging

KANG Feifei, WU Yongjin*, KONG Jianwen, ZHOU Wenyan,
YANG Guoxiang, PEI Hongying, ZHANG Kunhua, YU Jianshu

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Sino-platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: With the development of electronic packaging technology, the traditional bonding gold wire is losing the advantage, due to its low performance and high price. The substitute products have been developed by compounding and modifying the existing bonding gold wire, in order to meet new requirements. The present article summarized the performance feature, composition, key preparative technology of four substitute products. They are Au-coated Ag composite bonding wires, Pd-coated Cu composite bonding wire, Au alloy bonding wire and Ag alloy bonding wire. Some typical products were presented, and the future development was prospected.

Key words: metal materials; microelectronics packaging; bonding gold wire; substitute products; composition; key technology

键合丝是微电子封装的五大结构材料之一, 用于实现芯片和外部框架的电气连接, 确保芯片和外界之间电气的输入、输出畅通。金丝以其优异的机械强度、成球特性、接合性、作业性成为引线键合使用最多的导电丝材料, 但随着封装技术向着多引线化、高集成度、多功能和小型化方向发展, 金丝的电气性能已经趋于极限, 没有提高的空间, 无法满足发展需求。另外金焊接到铝电极上, 在界面层易于形成多种金属间化合物, 这些金属间化合物的

晶格常数不同, 力学性能和热性能也不同, 反应时会产生物质迁移, 从而在交界层形成可见的柯肯德尔空洞(Kirkendall Void), 使键合处产生空腔, 电阻急剧增大, 破坏集成电路的欧姆联结, 使器件焊点脱开而失效。金价持续上涨给封装厂的运转带来了巨大的经济负担。在高性能化和低成本的市场需求导向下, 金丝所占市场份额正逐步降低。银的导电和导热性能分别为金的1.30倍和1.35倍^[1], 铜的导电和导热性能分别为金的1.33倍和1.25倍^[2], 且与

收稿日期: 2016-11-03

基金项目: 云南省科技计划项目(2015DC016)、国家重点实验室开放基金(SKL-SPM-201515)。

第一作者: 康菲菲, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 贵金属功能材料。E-mail: kang85fei95@163.com

*通讯作者: 吴永瑾, 男, 工程师, 研究方向: 贵金属功能材料。E-mail: wyj@ipm.com.cn

电极形成的金属间化合物生长速度慢,成为替代金丝的最佳材料。但是,银和铜在冷热冲击、硫化实验中发现稳定性不及金,通过多元掺杂或表面处理可以改善其化学稳定性。多元掺杂是指在银或者金的基体中添加合金元素以调整产品性能。表面处理是指采用复合技术在银或者铜基体表面敷一层抗氧化、硫化性能好的金属层。

键合金丝替代产品于 2010 年进入封装市场,产品品种多达几十种。经过 6 年的产品验证和测试,可用于微电子封装的替代产品有 4 种:金包银复合键合丝、钎包铜复合键合丝、金合金键合丝和银合金键合丝。本文简要介绍了 4 种产品的性能特点、成分配比和技术难点,并对键合金丝替代产品未来发展进行了展望。

1 金包银复合键合丝

金包银复合键合丝是一种以银或银合金为芯材,表面敷金的复合型键合丝。金包银复合键合丝具有较键合金丝更为优异的导电和导热性能,且在球焊时,球颈部丝的芯材外层与包覆材的内层相互扩散,形成合金扩散层,使球颈部的强度高于没有扩散层的母线。金包银复合键合丝球的硬度较低,可以防止芯片破裂,在温度循环寿命试验中,因温度变化产生的应力被整个母线分散吸收,使颈部断裂几率降低,键合可靠性提高。金层对电阻的影响很小^[3],金包银键合丝的电阻率($1.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)比键合金丝($2.3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)小,断裂负荷(198.4 MPa)高于纯银丝(185.3 MPa),说明金包银复合键合丝在提高强度的同时并不会降低其电学性能。另外,金包银复合键合丝的成本仅为键合金丝的 1/10~1/5,大幅降低了封装成本,进而降低了 LED 产品进入家居照明行业的门槛。根据复层结构设计不同,金包银复合键合丝可以分为单层和多层 2 种,单层是指在银合金芯材表面覆一层金,而多层是指在银芯材表面敷有两种或两种以上的异种金属材料,最外层是金层,如在银合金芯线表面预镀金、镀钎、然后再镀金。采用这种复合结构制备的键合丝在后续的超细拉伸过程中不必进行中间退火就具有较好的最终塑性变形能力。替代键合金丝封装后,器件可靠性稳定,与使用键合金丝相比,无明显差异^[4]。在复层结构设计相同的条件下,复层成分或者芯材中添加的合金元素不同形成了不同的金包银复合键合丝。如 Yanagawa 等发明了一种镀层含有 Tl 的镀金银丝来防止键合根部的金镀层破裂或剥离^[5]。日本专利

中提到的在芯材银丝中至少添加 Ca、Na、Si、Sb、Ni、Be、K、C、Al、Ti、Sn、Zn、In、Pd、Cd、Li、Rb、Cs、Mg、Sr、Ba、La、Y 和 Au 的一种的合金元素^[6-7]可以获得适合热压键合的稳定球型。

金包银复合键合丝的技术难点有:超薄型层状金属基复合材料的复合技术^[8]、芯材的铸造技术、复合超细丝材的拉拔技术和复合丝材的键合技术。由于复层和芯材两者的性能不同,复层在加工变形中极易出现脱落现象。复层脱落容易堵塞劈刀,键合过程中频繁断线报警,降低生产效率,而且裸露的芯材在大气中氧化,导致焊接能力下降,可靠性降低。因此复合材料的各区域协调变形能力是制备的技术难点。采用道次变形量设计和热处理工艺可缩小复层和芯材两者的变形速率差异,降低了复层脱落的风险。另外复合丝材的细丝加工能力比单金属丝的差,通过控制铸锭的组织可改善复合丝的细丝加工性能。采用定向凝固技术制备芯材的铸锭组织,可获得结晶方向和拉丝方向相同,横向晶界少,缩孔、气孔铸造缺陷少的优良坯锭。这种坯锭由于横向晶界越少,位错滑移的阻力就越小,变形冷作硬化回复快^[9],累积变形量大,加工过程中经一到两次中间热处理就可直接拉拔到 $\Phi 18 \mu m$ 。金包银复合键合丝在批量生产和应用还存在着以下问题: $\Phi 20 \mu m$ 以下的丝材加工难度大,丝材表面复层致密性差致使断丝率高,成球时容易形成“高尔夫”球,键合过程中易于在球和丝材结合处断线而影响作业性等。这些问题还有待于进一步研究。

2 钎包铜复合键合丝

钎包铜复合键合丝是以铜及铜合金为芯材,表面敷一层钎的复合键合丝材。与键合金丝相比,钎包铜复合键合丝具有更好的电学和机械特性,在很大程度上提高了芯片频率和可靠性,适应细间距、高引出端元器件封装的发展,同时与铝电极形成金属间化合物的速度更慢并且具备更好的机械稳定性,最主要的是钎包铜复合键合丝比金线的价格低,能够有效的降低封装厂的生产成本^[10]。钎包铜复合键合丝根据复合比设计及芯材合金化配方不同形成不同类型的产品。郑康定等在发明专利中公开了一种镀钎键合铜丝配方,其中芯材是纯度大于 99.9995% 的高纯铜丝,表面镀有纯钎导电层,表层钎的含量(质量分数)为 1.35%~8.19%^[11]。为了调整钎包铜复合键合丝的加工性和应用性能,也会在芯材中添加微量元素。如四川威纳尔特种电子材料有

限公司开发了一种由铜为主组分, 添加改善延伸性能的微量元素(Ca、Mg、Al、Sn), 经过单晶熔炼拉伸成铜合金芯材并在表面镀钯后再超细拉伸为表面镀钯键合铜丝。其开发的镀钯键合铜丝延伸率至少为11%, 表面镀层均匀, 致密完整, 球型完美, 焊接性能良好, 能满足现代封装的高端键合要求^[12]。日铁新材料股份有限公司发明的钯包铜复合键合丝的设计方案为: 钯层厚度为0.003~0.08 μm , 芯材中添加0.01%~2%(摩尔分数)的Pd、Ag、Pt其中的一种和0.0001%~0.05%(摩尔分数)的Al、Sn、Zn、B和P其中的一种^[13]。

钯包铜复合键合丝由于钯和铜的机械性能不同, 在丝材加工和退火工序中, 容易发生钯层剥离、脱落等缺陷。若出现此类缺陷, 钯层脱落使芯材在表面露出, 氧化, 造成接合性降低。由于钯层比芯材硬且脆, 在批量生产过程中, 拉丝辊和模具的磨损比裸铜线剧烈, 在线表面发生损伤造成品质问题。在键合过程中, 钯层和劈刀内壁摩擦, 使劈刀的更换频率增加、生产率降低。若钯包铜在制造工序中钯层内部、外层和铜芯材的边界处等附近存在残留杂质、气体成分等, 这会使钯包铜烧球时易形成偏离了圆球的扁平球、球表面凹凸不平、球内部存在气泡或球表面有微小孔等问题。若将这样的不正常的球部接合到电极上, 则产生从线中心偏离且球部变形的偏心变形, 引起接合部从电极面突出、接合强度降低、芯片损伤等问题继而降低长期可靠性。通过对钯包铜在制造工序中钯层、钯层和铜芯材的边界处附近等残留杂质、气体成分控制, 对外层或扩散层的膜厚、芯材的合金元素的添加等方面进行控制可改善以上情况。通过研究, 对钯包铜复合丝中的氢浓度进行分配和有效控制, 可改变第一焊球的偏心情况、界面结合力及环路稳定性。由于钯容易吸氢, 钯外层中含有的氢浓度最高, 在火花放电时钯层中的氢起到还原作用使球形稳定。钯层和芯材的边界附近的界面或扩散层中含有的氢对界面粘附性产生影响, 降低了线加工过程中的剥离、损伤等的不良发生。铜芯材中含有微量的氢直接影响到环路形成时的稳定性。通过对各个部位含有氢的控制达到使用性能综合提高的效果。在钯层和铜芯材之间形成一层扩散层, 扩散层通过使芯材均质化和外层与芯材的界面的粘附性提高, 来提高直线性、环路形状的稳定性。也可通过在钯层和铜芯材之间再增加一层异种金属来提高界面的粘附性和阻碍在电镀过程中铜溶解到镀液中使镀液劣化。这种

异种金属选择原则为: 具有较低电离倾向和趋于引起钝化、抗氧化性好且成本较低。通过选择, 金是满足条件的优选材料^[14-15]。钯包铜复合键合丝在应用过程中还存在第一焊球硬度较高的问题。钯铜球的硬度比金丝的硬度几乎高一倍。在现有圆片的基础上, 可以从两个方面进行改进, 一方面是键合设备, 另一方面是键合工艺参数。键合设备的更改比较困难, 购置新的设备需要大量的资金, 因此很多封装厂家在原有的键合设备上优化工艺参数。钯包铜复合键合丝常用的键合工艺参数采用两阶段, 第一阶段主要是通过较大的压力将铜球压扁, 而超声能量很小, 主要是降低镀钯铜球变形阶段对铝层底层的影响; 而第二阶段将超声能量增加, 压力减小, 目的主要是随着超声能量的增加而促进镀钯铜球与焊盘的焊接^[16]。

3 金合金键合丝

金合金键合丝是一种通过多元掺杂形成的合金型键合丝。在纯金中添加合金元素, 可以减缓AuAl金属间化合物生长速度, 提高丝材的强度, 有效的避免由于树脂流动而使金丝产生变形, 适合高频和低温键合。金合金键合丝添加的合金元素有Ag、Ca、Mn、Cu、Ni、Pt、Pd、In、Y、La、Ce、In、Ca、Sr、Y、Eu、Be、Ge、Sn、Ni、In、Sn等, 形成Ag-Cu-Ca系、Ag-Au系、Ag-Ni系、Au-Pt系、Au-Pd系等^[17]一系列合金型键合丝。其中Mn、Cu、Ni元素可以抑制在Au/Al接合处生成化合物的效果。Cu元素可以有效的提高Au的强度。UNO等^[18]研究发现复合添加(质量分数, 下同)0.015%~1.0%的Cu和0.001%~0.02%的Ca可有效抑制树脂流动, 再添加0.01%~3.0%的Pt、Pd、In元素可细化晶粒, 增加键合球颈部强度; 添加0.003%~0.03%的Y、La、Ce可提高丝的高温强度和树脂封装时的耐流动性。同时添加Cu和Ca可有效提高金合金细丝的抗拉强度。Au与Ni或与Ni及碱土金属制成的金丝与由高纯金制成的金丝相比, 在同样的受力情况下具有较高的强度, 加入碱土金属明显地降低了由于灼热引起的强度损失。德国贺利氏公司开发了一种含Ni的键合金丝, 具备良好的强度/延伸关系^[19]。在高纯金中添加一定量的Sn或In, 可增加弧高, 并能降低热循环后的断线率和提高剥离强度及振动破断性能, Sn或In含量规定为1.0%~20.0%。在键合金丝中添加Pt、Pd, 可提高丝和电极的接合强度,

降低高温试验时的损失。Ag 在 Au 中无限固溶, 可提高键合金丝的强度。在金中添加 19%~59%Ag 和 0.10%~0.11%的 Pd、Pt、Rh、Ir、Os、Ru 并用的组成, 提高了高温下的机械强度, 特别是断裂强度。但是, 添加大量 Ag 会降低与半导体器件上电极的接合可靠性, 还需添加第三种合金元素以改善其接合可靠性。马晓霞等开发了一种键合金银合金丝成分为银 20%~30%, Pd、Ca、Be 和 Ce 均为 $(5\sim 1000)\times 10^{-6}$, 其余为 Au, 这种金合金丝具有良好的抗氧化性、流动性和铸造性, 塑性好, 易加工成线材和片材^[20]。Jong^[21]开发了一种 Au-(10~40)Ag-(5~15)Pd 和 Pt 的键合丝, 另外添加 $(10\sim 5000)\times 10^{-6}$ 的至少一种元素包括 Ni、Sn、Nb、Mo、Tc、Ru、Rh、V、Co。Liu 开发的 Au-15Ag-5Pd 丝经饱和蒸汽试验 240 h 依然有良好的电性能, 金属间化合物生长速率低于键合金丝一个数量级, 在 150°C/1500 h 的高温储存实验中无空洞, 说明其具有良好的热稳定性^[22]。

合金键合丝的技术难点在于合金元素的添加和控制, 使合金元素成分分布均匀、合金元素无氧化, 易添加。部分合金元素添加到母体金属液中, 出现分散性差、易挥发、易燃、易损诸多问题。传统的熔炼技术是在高频熔炼炉上熔炼并浇注成母合金棒, 再于定向凝固炉上进行试棒定向凝固结晶。这种方法不仅增加了合金元素烧损, 而且工艺周期长, 生产效率低。陈亚军等^[23]开发了一种具有较高的温度梯度、工艺控制方便、适用于多种合金材料的连续定向凝固方法, 将真空设备与定向凝固技术结合, 集熔炼、提纯、凝固为一体, 工艺简单, 生产效率高, 合金元素分布均匀可控的新型连铸技术。

4 银合金键合丝

银合金键合丝是在高纯银中添加合金元素以获得抗氧化能力强、可靠性好, 适合半导体分立器件的键合丝材。纯银在大气中容易氧化, 经电火花熔化成球时, 易形成尖嘴球, 球的表面也不光滑。尖嘴球导致焊点拉力低, 焊接后压点面积大于电极面积, 封装后灯具使用寿命短。纯银丝的延展性较差, 很难加工成微米级细丝。为了解决纯银丝在加工和应用过程中的技术难题, 需添加适合的合金元素。

在纯银中添加的合金元素有 4 种。第一种为在银中添加 Au、Pt、Pd 等贵金属元素, 与银形成连续固溶体, 降低银的晶界电压, 减慢银丝的电化学腐蚀, 增强了抗腐蚀性; 第二种在银中添加 Rh、

Cu、In、Ce 等稀土元素的掺杂, 细化了银丝晶粒, 增强了机械性能, 提高了银丝的高温断裂强度和抗拉强度, 同时可延缓与铝焊接时 Ag-Al 金属间化合物的扩散速度, 提高了其可靠性。第三种加入铝和钛, 通过合金析出过程在银丝表面形成致密的氧化层, 钝化银丝表面, 减少硫化、氧化等腐蚀; 第四种是加入 Si、Zn、Sn、Be, 降低银丝含氧量, 提高合金的润湿性和铸造、拉丝性能^[24]。由于添加元素种类繁多且性质各异, 选配添加到银基体会相互之间协同或是冲突知之甚少。目前研究最多的合金元素为钯, 认为钯可在银丝和铝基体之间形成一层保护层, 延缓了金属间化合物的增长速率^[25-27], 且在高低温循环和高温储存性能实验中具有良好的热稳定性^[28-29], 改善了银合金丝在高温高湿环境下的界面腐蚀现象^[30], 继而提高产品的可靠性。在纯银中添加稀土元素镧^[31]可在提高抗氧化性的同时不降低丝材的电学性能, Ag-La 合金的熔断电流可以达到 0.45 A, 可见镧是纯银丝良好的改性合金添加元素。其他元素对银键合丝的应用及可靠性并未深入研究。

银合金键合丝的技术难点在于合金元素的有效均匀添加和铸锭组织的控制。由于银和金、钯等合金元素的密度相差较大, 在熔炼过程中需进行多次熔炼, 才能保证其成分的均匀性, 继而保证其力学性能的稳定性。合金元素添加后可明显细化晶粒, 增加强度。Chuang 等^[32]研究发现通过特殊的退火和拉伸工艺使 Ag-Au-Pd 三元合金丝产生大量的退火孪晶。退火孪晶的出现有利于保持丝材的热稳定性和力学性能。调整 Au、Pd 的合金含量, 可以得到可靠性好低电阻的键合丝材。

5 发展趋势

随着集成电路(IC)向高集成度、高性能、微型化发展, 键合引线无论是市场发展、产业规模、技术水平、产品结构、可研开发, 还是产业链建设、产业发展政策环境, 都得到很大的提升。键合引线的产品结构从单一到多元化发展。传统键合金丝的市场份额从 2010 年的 98%锐减到 2015 年的 50%, 替代产品的研发、生产和应用进程不断加快。经五年市场洗牌淘汰了不良产品、增加新产品, 单一产品企业改变为多产品企业。在键合丝市场不断细化、封装技术对键合丝要求越来越高的情况下, 4 种键合金丝替代产品将长期并存, 所占市场份额根据市场需求不断调整。键合金丝替代产品进入市场时间

较短, 还存在成分配比种类多, 加工成品率低、品质不稳定、键合断线率高、可靠性差等问题。在极大市场需求推动下, 经过工艺技术的改进和优化, 键合金丝替代产品的发展将保持增长态势。

参考文献:

- [1] 郑康定, 冯小龙, 李彩莲. 一种银基覆金的键合丝线及其制造方法: ZL200910152916.8[P]. 2010-03-10.
ZHENG K D, FENG X L, LI C L. A bonding wire of Au-coated Ag and manufacturing method: ZL200910152916.8[P]. 2010-03-10.
- [2] 鲁凯, 任春岭, 高娜燕, 等. 铜丝球键合工艺及可靠性机理[J]. 电子与封装, 2010, 10(2): 1-3.
LU K, REN C L, GAO N Y, et al. The process and reliability researches of copper wire bonding[J]. Electronics & packaging, 2010, 10(2): 1-3.
- [3] TSENG Y W, HUNG F Y, LUI T S. Microstructure, tensile and electrical properties of gold-coated silver bonding wire[J]. Microelectronics reliability, 2015, 55(3/4): 608-612.
- [4] 房跃波. 一种表面有复合镀层的合金型键合丝: ZL201110003321.3[P]. 2011-01-07.
FANG Y B. A alloyed bonding wire with a composite coating: ZL201110003321.3[P]. 2011-01-07
- [5] YANAGAWA M, YANAGAWA M, KONO S, et al. Gold-plated bonding wire and manufacture thereof: JP2011243111[P]. 1999-10-01.
- [6] YONO S, ONODERA H, MATSUMOTO K. Silver wire bonding wire filmed with gold: JP2001176912[P]. 2001-10-05.
- [7] ONODERA H, YAMADA T, KOIZUMI T. Gold-plated silver bonding wire: JP2001196411[P]. 2001-06-15.
- [8] 康菲菲, 吴永瑾, 杨国祥, 等. 超薄型层状金属基复合丝材的制备技术[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 62-67.
KANG F F, WU Y J, YANG G X, et al. Preparation technology of ultrathin layered metal matrix composite wires[J]. Precious metals, 2015, 36(1): 62-67.
- [9] 曹军, 丁雨田, 曹文辉. 单晶铜键合丝制备过程中的断线研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 84-89.
CAO J, DING Y T, CAO W H. Research of break line in single crystal copper bonding wire drawing[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(22): 84-89.
- [10] 陈鑫. IC 封装中镀钯铜线与裸铜线键合比较研究[J]. 硅谷, 2014, 7(14): 152-153.
CHEN X. Study on bonding of palladium plated copper wire and bare copper wire in IC packaging[J]. Silicon valley, 2014, 7(14): 152-153.
- [11] 郑康定, 冯小龙, 李彩莲. 一种镀钯键合铜丝及制造方法: ZL101707194A[P]. 2010-05-12.
ZHENG K D, FENG X L, LI C L. A kind of palladium-plated copper wire and preparation technology: ZL 10170719 A[P]. 2010-05-12.
- [12] 房跃波. 一种表面镀钯键合铜丝: ZL201010620716.3 [P]. 2011-07-20.
FANG Y B. A bonding copper wire with a composite coating: ZL201010620716.3[P]. 2011-07-20.
- [13] TOMOHIRO U, SHINICHI T, TAKASHI Y, et al. Bonding wire for semiconductor: US0120594A1[P]. 2011-10-07.
- [14] TAKADA M, YAMASHITA T, SHIGYOU H. Pd-coated copper ball bonding wire: WO2012JP82137[P]. 2012-12-12.
- [15] MESATO F, SHINGO K, TSUYOSHI N. Bonding wire: US20040245320A1[P]. 2004-12-09.
- [16] 吴建忠, 李金刚, 周巍. 镀钯铜丝芯片键合工艺控制和可靠性研究[J]. 半导体技术, 2013, 38(5): 391-398.
WU J Z, LI J G, ZHOU W. Process control and reliability research of Pd-plated Cu wire bonding[J]. Semiconductor technology, 2013, 38(5): 391-398.
- [17] 朱建国. 键合金丝的合金化研究动向[J]. 贵金属, 2002, 23(3): 57-61.
ZHU J G. Trend of alloying investigation for gold bonding wires[J]. Precious metals, 2002, 23(3): 57-61.
- [18] UNO T, TATSUMI K, OHNO Y. Gold alloy thin wire for semiconductor device: JP94190184[P]. 1998-05-20.
- [19] 罗茨, 罗伊尔, 普勒. 金合金细导线及制造方法和应用: ZL99106482.8[P]. 1999-10-01.
ROOTS H, ROYLE J, POOLER S. Manufacturing method and application of gold alloy thin wire: ZL99106482.8[P]. 1999-10-01.
- [20] 马晓霞, 李玉芹, 范红, 等. 一种键合金银合金丝的制备方法: ZL201210259179.3[P]. 2013-11-20.
MA X X, LI Y Q, FAN H, et al. A kind of preparation method of gold-silver alloy bonding wire: ZL201210259179.3[P]. 2013-11-20.
- [21] JONG S C, YONG J P, JEONG T M, et al. Au-Ag based alloy wire for semiconductor package: US 20070278634A1[P]. 2007-12-06.
- [22] LIU H, CHEN Q, ZHAO Z, et al. Reliability of Au-Ag alloy wire bonding[C]//Proceedings, Electronic

- Components and Technology Conference, IEEE, Las Vegas, 2010: 234-239.
- [23] 陈亚军, 田军花, 陈琦, 等. 真空熔炼、氩气保护连续定向凝固技术[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(5): 482-484.
- CHEN Y J, TIAN J H, CHEN Q, et al. Vacuum melting and argon protecting continuous unidirectional solidification technology[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(5): 482-484.
- [24] 林良, 臧晓丹. 封装用抗腐蚀高可靠性银合金丝[J]. 电子与封装, 2014, 14(3): 9-13.
- LIN L, ZANG X D. Introduction of a corrosion-resistant high reliability silver alloy bonding wire in package[J]. Electronics & packaging, 2014, 14(3): 9-13.
- [25] GUO R, HANG T, MAO D. Behavior of intermetallic formation and evolution in Ag-8Au-3Pd alloy wire bonds[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 588: 622-627.
- [26] TSENG Y W, HUNG F Y, LUI T S H. Effect of annealing on the microstructure and bonding interface properties of Ag-2Pd alloy wire[J]. Microelectronics reliability, 2015, 55(8): 1256-1261.
- [27] HSUEH H W, HUNG F Y, LUI T S. Effect of the direct current on microstructure, tensile property and bonding strength of pure silver wires [J]. Microelectronics reliability, 2013, 53(8): 1159-1163.
- [28] CHUANG T H, LIN H J, CHUANG CH H. Thermal stability of grain structure and material properties in an annealing twinned Ag-4Pd alloy wire[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 615: 891-898.
- [29] CHUANG T H, CHANG C C, CHUANG C H. Formation and growth of intermetallics in an annealing-twinned Ag-8Au-3Pd wire bonding package during reliability tests [J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, 3(1): 3-9.
- [30] CHO J S, YOO K A, HONG S J, et al. Pd effects on the reliability in the low cost Ag bonding wire[C]// Electronic components and technology conference. IEEE, 2010: 1541-1546.
- [31] HSUEH H W, HUNG F Y, LUI T S. Microstructure, electric flame-off(EFO) characteristics and tensile properties of silver-lanthanum alloy wire[J]. Microelectronics reliability, 2014, 54(11): 2564-2569.
- [32] CHUANG T H, CHANG C C, CHUANG C H. Formation and growth of intermetallics in an annealing-twinned Ag-8Au-3Pd wire bonding package during reliability tests[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, 3(1): 3-9.

《贵金属》(Precious Metals) 期刊简介

《贵金属》创刊于 1980 年, 为中国有色金属学会和昆明贵金属研究所共同主办的、国内外公开发行的学术季刊。其学风严谨, 视野远阔, 是中国乃至全球唯一的全面报道贵金属 8 个元素科技研究成果的学术刊物。

《贵金属》期刊主要报道内容包括贵金属 (Pt、Pd、Rh、Ir、Os、Ru、Au、Ag) 在冶金、材料、化学、分析测试等科技领域的研究论文、综合评述。

《贵金属》期刊被中国知网、万方、维普等主要检索数据库全文收录, 是美国化学文摘 (CA)、英美金属学会金属文摘 (MA)、美国剑桥科技文摘 (CSA) 等的文献源期刊。

《贵金属》为中文核心期刊 (PKU)、中国科技核心期刊 (ISTIC)、中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊。

《贵金属》影响因子一直位于国内同类期刊前列 (见附表), 是国内外贵金属科技人员的重要参考资料来源。

附表: 2011-2016 《贵金属》期刊主要评价指标

评价年份	总被引频次	影响因子	影响因子排名	他引率	基金论文比
2016	344	0.659	8/23	0.71	0.69
2015	313	0.608	10/23	0.66	0.73
2014	352	0.872	3/23	0.69	0.59
2013	360	0.508	8/21	0.71	0.65
2012	315	0.420	10/20	0.59	0.61
2011	317	0.762	3/35	0.75	0.57

[数据来源: 中国科学技术信息研究所 《中国科技期刊引证报告(核心版)》2012~2017 年版]

[影响因子排名: 在材料科学类/金属材料类期刊中的排名]