

键合界面金属间化合物对可靠性影响的研究现状

杜文晶¹, 周文艳^{1,2*}, 裴洪营², 阳岸恒², 吴永瑾², 孔建稳², 康菲菲²

(1. 昆明贵金属研究所, 昆明 650106;

2. 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: 在微电子封装过程中, 键合丝被广泛应用, 而键合可靠性对于产品的应用性能有着极大的影响, 受到人们的广泛关注。键合丝与常用的铝焊盘之间是异质材料, 在应用和服役的过程中会在界面上产生金属间化合物(IMC), 对器件可靠性产生影响, 同时, 键合强度也与键合丝和焊盘之间的界面反应联系密切, 因此了解键合丝与铝焊盘之间金属间化合物的形成与演变对键合可靠性的影响是有必要的。本文综述了 Au/Al、Ag/Al 和 Cu/Al 三种键合界面上金属间化合物的形成与演变的研究现状, 并根据目前的应用状况, 展望了未来的应用发展前景。

关键词: 键合丝; 金属间化合物(IMC); 键合界面; 可靠性

中图分类号: TN306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)01-0092-10

Research status of the influence of bonding interface intermetallic compounds on reliability

DU Wenjing¹, ZHOU Wenyan^{1,2*}, PEI Hongying², YANG Anheng², WU Yongjin², KONG Jianwen², KANG Feifei²

(1. Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China; 2. State key Laboratory of Advanced Technology of Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: In the process of microelectronics packaging, bonding wires are widely used, and the bonding reliability has great impact on the application performance of final products. The bonding wires and the commonly used aluminium pads are heterogeneous with each other, and during application and service intermetallic compounds (IMC) can be generated at the interface, leading to negative effect on device reliability. Meanwhile the bonding strength is closely related to the interface reaction between the bonding wire and the pad. Therefore, it is necessary to understand how the formation and evolution of IMCs between bonding wires and aluminium pads affect the bonding reliability. This paper reviews the current state of research on the formation and evolution of intermetallic compounds at three bonding interfaces, Au/Al, Ag/Al and Cu/Al. Future developments in the light of current applications are also prospected.

Key words: bonding wire; intermetallic compound (IMC); bonding interface; reliability

随着电子信息技术的发展, 对于电子产品提出了更高的要求, 如: 具有更高的性能、更好的可靠性以及较低的成本等, 这就要求在微电子封装的过程中要更轻薄化、高密度化和多功能化^[1]。键合丝是微电子封装的主要结构材料之一, 在封装过程中扮演着重要的角色, 主要用于内部芯片与外部框架

的连接, 从而实现电信号的传输。引线键合工艺因其成本低、流程简单等特点, 在所有封装工艺中占比超过 90%。通常使用的有键合金丝、键合银丝、键合铜丝和铝硅丝^[2-3], 以及在这些丝材的基础上通过掺杂、合金化、复合或者通过表面处理形成的系列键合丝材料。

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 云南省重大科技专项 (202002AB080001-1); 昆明市科技计划项目(2019-1-G-25318000003398); 云南省重大科技计划(202102AB080008); 云南省科技人才与平台计划(202105AC160006); 昆明市高层次人才引进工程创新类技术先进项目; 云南贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050202)

第一作者: 杜文晶, 男, 硕士研究生; 研究方向: 贵金属键合材料; E-mail: 1187141095@qq.com

*通信作者: 周文艳, 女, 博士, 副研究员; 研究方向: 贵金属键合材料; E-mail: zwy@ipm.com.cn

键合可靠性是评价键合质量的重要依据，而键合界面对键合可靠性的影响至关重要，对电子元器件的服役性能和使用寿命都有着极大的影响^[4]。在服役或老化过程中，由于引线键合在元器件失效过程中的占比较大，故对元器件的高可靠性更是至关重要。尤其是在键合界面上，材料结构和性质会发生突变，且不同的界面对键合强度的影响各不相同，特别是关于界面上金属间化合物的形成与演变相关的问题，受到了大批学者的关注。根据键合丝的材质不同，引线在键合过程中与铝焊盘主要形成三种界面： Au/Al 、 Ag/Al 和 Cu/Al 界面。

本文根据相关文献，综述键合界面上金属间化合物的形成以及演变行为、使用环境对于键合可靠性的影响等方面的研究进展，并根据目前的研究现状，展望未来的应用发展前景。

1 键合丝性能概述

键合金丝是一种具备优异导电、导热、机械性能以及化学稳定性的引线键合材料，主要用作集成电路和半导体分立器件封装的内引线，其化学稳定性好、延展性能好、抗拉性强，易于加工成细丝，且在键合过程中不易氧化、成球性能好、焊接性能稳定^[5]。但随着金价日益上涨，成本增加，对于封装成本降低的需求逐渐变得迫切，且金丝与铝焊盘键合时会出现紫斑(AuAl_2)和白斑(Au_2Al)现象，同时因化合物扩散速率存在差异，容易在界面处形成空洞并增大电阻，影响电子元器件使用^[6]。同时，随着电子设备向小型化、多功能化发展，传统金丝由于电热性能趋于极限已无法满足高密度、高集成半导体封装的要求，人们也在积极寻找能够替代金丝的基础材料^[7]，而银丝和铜丝由于其成本较低，物理性能也较为突出，受到人们的广泛关注。

键合银丝的成本低于金丝，力学性能与金丝相差不大^[8]、键合窗口相近^[9]，且反光性能好，因此受到了越来越多 LED 封装厂家的青睐，在各类 LED 光源器件以及部分小型扁平式 IC 封装产品中的应用快速推进^[10]。近年来，随着技术的成熟和产品应用工艺的不断优化，键合银丝的市场应用越来越广泛，特别是在小功率 LED 光源器件产品上逐步占据了主导地位，据报道，2019 年，键合银丝在市场上的份额已达到了 10% 以上，且占比正逐步提高^[11]。然而银丝因其抗硫化性能差、且与铝焊盘键合时会产生 Ag^+ 的迁移，在键合界面上产生两种金属间化

合物： AgAl_2 和 Ag_2Al ，导致焊点可靠性降低，焊点脱开而导致键合质量的下降，故在一定程度上限制了其应用，只能在某些领域内作为金丝的替代产品。

由于封装成本的压力，在寻找金丝替代产品的过程中，铜是降低封装成本较理想的材料之一^[12]。铜丝价格仅为金丝的 3%~10%，但相对于金丝性能优越(如表 1 所列)：电阻率比金低约 37%，热导率高 25% 左右，所以在直径相同的情况下，铜丝可承载的电流更大；此外，铜丝的机械性能、抗变形能力好，不容易出现塌丝、歪丝等现象，更加适合高密度引线键合^[13]。而且 Cu/Al 金属间化合物的生长速率比 Au/Al 金属间化合物生长速率慢^[14]，在 150~300℃ 的条件下约慢近 10 倍，可减少由金属间化合物导致的器件失效等问题。但铜丝本身的一些特性，成为了其替代金丝的主要阻碍：1) 铜的硬度高，会导致键合时形成的焊球硬度偏大，损坏芯片或铝焊盘，同时，在拉丝过程中也会因硬度高而出现断丝现象；2) 铜在储存或键合时易氧化，进而影响键合性能，导致封装器件合格率低；3) Cu/Al 金属间化合物在高湿高温环境下易形成空隙等一系列问题，使得铜键合线在更大规模集成电路和 LED 领域受到限制^[15]。对于铜丝硬度高、易氧化等特点，目前主要通过添加保护气氛、在铜丝的表面形成镀层或者通过添加其他元素等手段来解决这些问题。

表 1 Au 、 Ag 、 Cu 和 Al 的物理性能对比^[2,16]

物理性能	Au	Ag	Cu	Al
电导率/(%IACS)	73.4	108.4	103.1	65
电阻率/($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	2.3	1.59	1.67	2.66
热导率/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	317.9	435	398	247
热膨胀系数/($\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	14.2	19.0	16.7	23.6
弹性模量/GPa	79	71	128	62
金属活性	$\text{Al} > \text{Cu} > \text{Ag} > \text{Au}$			

铜丝在使用过程中产生的可靠性故障，主要是由于金属间化合物在键合界面处的腐蚀导致^[17-20]。为了减轻 Cu 的氧化以及 IMC 在键合过程中的腐蚀，通常通过在铜丝表面涂覆钯(Pd)涂层来改善，因此开发了镀 Pd 铜丝(Palladium-coated copper, PCC)作为 Au 丝的另一种替代品，PCC 键合丝的可靠性高于铜丝、与金丝相差不大^[21]。 Pd 涂层在 Cu 丝上的附着能力强，使得 PCC 键合丝可键合性好、一致性较好、产量高、在纯 N_2 条件下能形成稳定的烧球

(Free air ball, FAB), 因此是较为理想的金丝替代产品之一, 吸引了大批学者的研究兴趣。

2 界面金属间化合物的形成与演变

2.1 键合金丝界面结构演变与失效机理

图 1 所示为 Au-Al 二元合金相图^[22]。由图 1 可

知, 在 400 °C 以下, 在 Au/Al 间可能存在 5 种金属间化合物: Au_4Al 、 Au_8Al_3 、 Au_2Al 、 AuAl 和 AuAl_2 。目前键合金丝的种类主要有: 微合金化高纯金丝、合金型金丝和复合型金丝^[23], 这些键合丝由于主要成分为金或表面为金, 均会在键合后发生 Au-Al 界面反应。

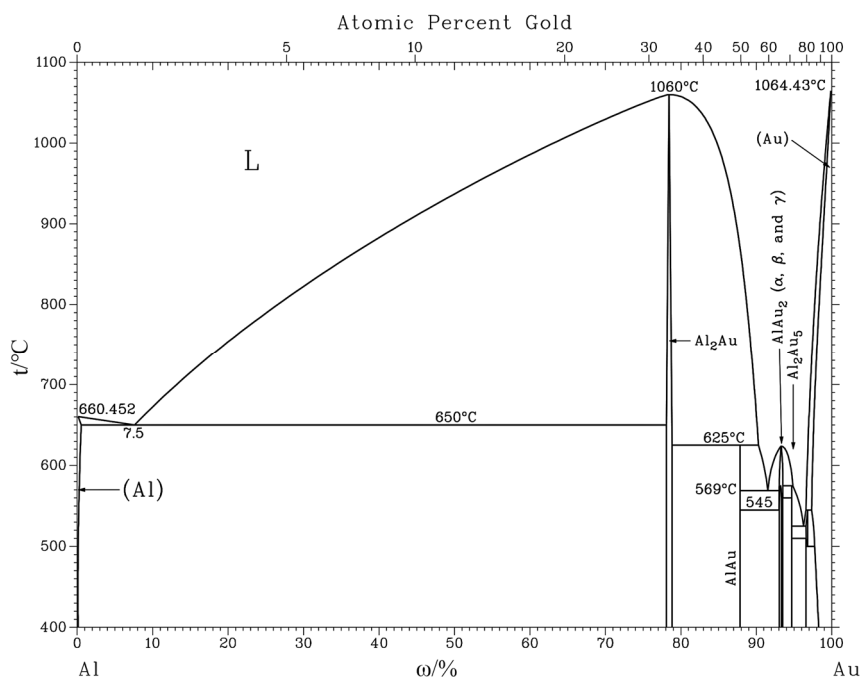


图 1 Au-Al 二元合金相图^[22]

Fig.1 Phase diagram of Au-Al binary alloy

Au/Al 界面上 IMC 的形成与演变受多种因素的影响, 因此虽然很多学者做了大量的研究, 但关于两者之间金属间化合物的组成并没有形成统一的意见。徐慧^[24]通过对金丝球键合点界面组织的演变行为进行研究, 发现在老化初期 150 °C 左右, 界面化合物主要由靠近 Au 球侧的 Au_4Al 和靠近 Al 侧的 Au_5Al_2 组成; 随着老化温度的升高, 金属间化合物层变厚, 键合点中心区域的金属间化合物演变为 Au_4Al , 周围区域主要为 Au_5Al_2 , 主要原因为 Au 的扩散, 将中心区域 Al 侧的 Au_5Al_2 转变为 Au_4Al ; 且由于界面边缘处金含量较少, Al 层向外延伸导致 Al 含量较多, 迫使含 Au 量较多的金属间化合物向金含量较少的金属间化合物转变, 导致边缘区域会有少量 Au_2Al 和 AuAl 出现。计红军等^[4]研究了 Au/Al 和 Al/Au 系统键合界面 IMC 的演化过程, 认为在 Au/Al 系统中, Au_5Al_2 为主要的控制相, 键合点周围为 Au_2Al , 随着老化时间的增加, Au_5Al_2 逐渐向 Au_2Al 转化, 且中间伴随着 Au_4Al 中间相, 最

终在靠近芯片的一侧形成 Au_2Al 。二者都认为键合点中心的 IMC 形成与键合点周围不同, 键合点边缘都存在 Au_2Al 相, 为 Au/Al 界面上 IMC 的研究提供了相关参考。

与上述研究结果有所不同的是, Breach^[25]通过研究 3N 和 4N 键合金丝的键合界面发现: 界面存在两个连续的金属间化合物层, 并将其命名为 I 区和 II 区, I 区的特征是金丝与铝合金焊盘之间的反应扩散, Au-Al 金属间化合物形成过程中, Al 被完全消耗; 在 II 区内, 由于没有自由供应的 Al 来维持金属间化合物的生长, 产生了 Au_8Al_3 到 Au_4Al 的相变, 导致了金属间化合物的增厚, 这表明界面上 IMC 形成后并不是一成不变的, 与所处的环境有关并会发生相应的转变。Goh 等^[26]研究了工作环境对于界面键合质量的影响发现: Au/Al 键合过程中产生的 Au_4Al 会在 Cl⁻环境中发生腐蚀, 但由于金属间化合物在界面上的覆盖率好, 使得 Cl⁻不易渗入, 能够降低其腐蚀速率, 增加键合可靠性。

以上研究结果表明, 在 Au/Al 系统中, IMC 在界面上的形成与分布对可靠性有一定的影响, 控制 IMC 的生长十分重要, 且在封装过程中, 良好的工作环境有利于提高丝材的键合质量。而对于金铝键合过程中所产生的金属间化合物种类及其产生的可

靠性问题也一直在被研究。

2.2 键合银丝界面结构演变与失效机理

图 2 所示为 Ag-Al 二元合金相图^[27], 从室温到低于 603°C 的温度范围内, 可能会产生两种不同的金属间化合物: $\text{Ag}_3\text{Al}(\mu)$ 和 $\text{Ag}_2\text{Al}(\delta)$ 。

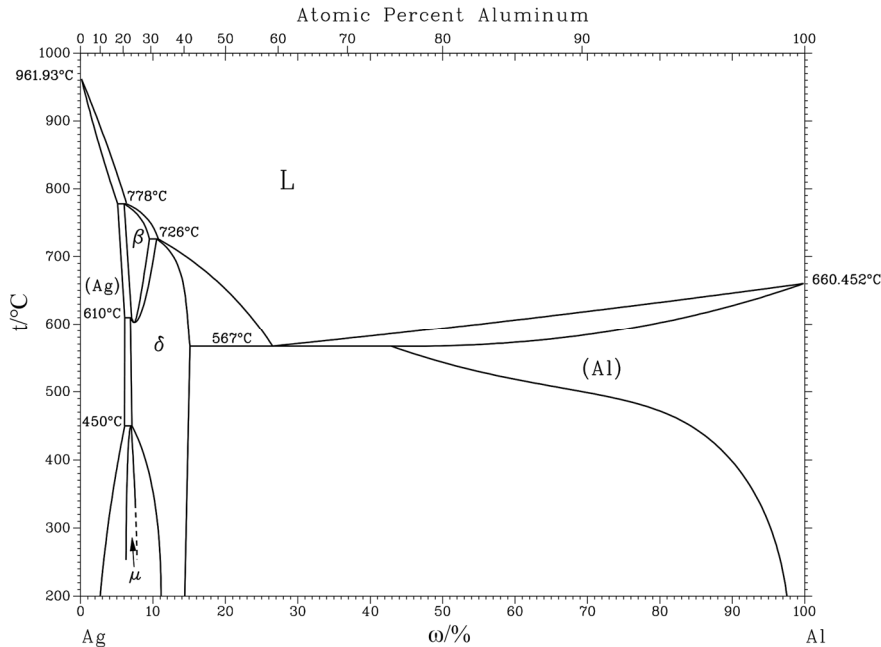


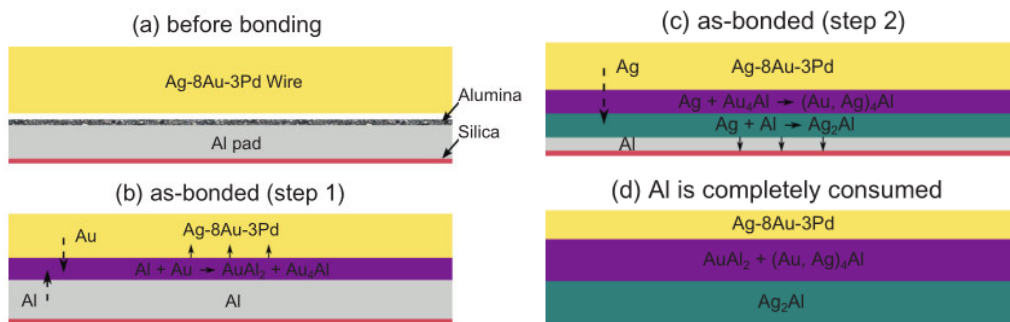
图 2 Ag-Al 二元合金相图^[27]

Fig.2 Phase diagram of Ag-Al binary alloy

银丝在与铝焊盘键合处, 由于 Ag 和 Al 的扩散会产生两种 IMC, 进而导致焊点脱开而造成失效, 因此, 在界面上, 键合强度与键合丝和焊盘之间的反应密切相关, 研究键合银丝和铝焊盘之间金属间化合物的形成和演变, 对于元器件的高可靠性极其重要。

随着大量学者的深入研究, 关于 Ag-Al 系统金属间化合物的相, 已有报道形成了 Ag_5Al 、 Ag_3Al 、 Ag_2Al 、 AgAl 和 AgAl_3 ^[28-30], 这其中也包括了一些通过第一性原理方法计算得到的相。Cheng 等^[31]研究表明, 在银丝键合的过程中, 会在银丝和铝焊盘之间形成两个金属间化合物界面层, 分别为靠近 Ag 丝一侧的 Ag_2Al 层和靠近铝焊盘一侧的 Ag_3Al 层。Choi 等^[32]研究表明, Ag-Al 之间的金属间化合物也是由 Ag_2Al 和 Ag_3Al 组成的, 与文献^[31]的结论一致。Cho 等^[33]研究了 Au-Ag-Pd 合金丝的键合界面, 发现在界面处会分别形成两层 IMC: Ag_2Al 和 $(\text{Au}, \text{Pd})\text{Al}_2$, 说明在 IMC 形成的过程中, Au 和 Pd 也参与了扩散。在此基础上, Guo 等^[34]对界面上 IMC 的形成和演变给出了更详细的说明, 并提出了相关理

论模型, 通过研究热退火过程中 Ag-8Au-3Pd/Al 界面的 IMC 形成和演变发现: Ag-8Au-3Pd 合金键合丝和铝焊盘之间的两个不同的金属间化合物区域在晶体学上分别被鉴定为 $\text{AuAl}_2 + (\text{Au}, \text{Ag})_4\text{Al}$ 和 Ag_2Al , 并给出了退火过程中 IMC 形成和生长机理示意图, 如图 3 所示。丝材被键合到铝焊盘上时, 氧化铝层被清除, Al 首先与 Au 反应形成 AuAl_2 和 Au_4Al , 随着时间的延长, Ag 扩散到 Al 中形成 $(\text{Au}, \text{Ag})_4\text{Al}$ 和 Ag_2Al , 界面上形成的 $\text{AuAl}_2 + (\text{Au}, \text{Ag})_4\text{Al}$ 和 Ag_2Al 共存并同时生长, 直至铝焊盘完全消耗, 形成键合界面上的金属间化合物层。同时在键合过程中, 由于粘接区域中心的严重摩擦, 在界面处形成空洞, 这些空洞在退火过程中开始收缩并最终消失, 并将界面上大空穴的填充机制归因于 Ag 的纵向扩散, 从而与残余的铝发生反应, IMC 在键合界面的中心不断生长并在退火过程中填充空隙, 并且当铝焊盘完全耗尽时, 空隙被均匀的 IMC 层填充, 上述研究为界面上 IMC 的演变和空隙的填充机理提供了相关的实验参考。



(a). 键合前(Before bonding); (b). Au 与 Al 反应(Aluminum reacts with gold); (c). Ag 扩散(Silver diffusion); (d). IMC 生长(The growth of IMC)

图 3 退火过程中 IMC 形成和生长机理说明^[34]

Fig.3 Description of IMC formation and growth mechanism during annealing

界面上产生的金属间化合物容易发生氧化还原反应导致 IMC 的腐蚀与裂纹的产生,使焊点可靠性降低。解决的措施主要有元素掺杂和表面镀层两种。

在元素掺杂方面,通过添加 Au 和 Pd 元素而形成的 Ag-Au-Pd 合金丝,能够有效抑制氧化和界面腐蚀,提高键合可靠性^[34]; Au 在 Ag-4Pd 丝材中的合金化会对 IMC 层的生长起到促进作用,从而在一定程度上提高界面的力学性能,而 IMC 的过度生长则会导致焊接微裂纹的形成,降低材料可靠性^[35]。所以在 Ag 合金丝中,其他元素的添加对界面上 IMC 的形成与结构会产生影响,影响键合器件应用过程的可靠性。

在表面镀层方面,银丝通过表面的镀层能够减少键合界面上氧化和裂纹的产生,从而提高键合可

靠性,目前比较常见的为金包银复合丝,即以银或银合金为芯材,表面镀金的复合型键合丝,不仅可以提高丝材的抗氧化性,同时还可以配合添加其他微量元素,提高丝材的性能,增强稳定性。

2.3 键合铜丝界面结构演变与失效机理

图 4 所示为 Cu-Al 二元合金相图^[36],由图 4 可知低于 300 °C 下存在 5 种金属间化合物: $\text{CuAl}_2(\theta)$ 、 $\text{CuAl}(\eta_2)$ 、 $\text{Cu}_4\text{Al}_3(\xi_2)$ 、 $\text{Cu}_3\text{Al}_2(\delta)$ 、 $\text{Cu}_9\text{Al}_4(\gamma_2)$ 。

IMC 生长会导致界面层的脆性和接触电阻增加,从而在使用中产生更多的热量,这反过来又加速了 IMC 的增长,最终导致此类键合的失败^[4]。相比于 Au-Al 间键合, Cu-Al 键合的 IMC 生长较慢,因此对于键合铜丝尤其是镀 Pd 铜丝界面结构的研究,引起了广大学者的兴趣。

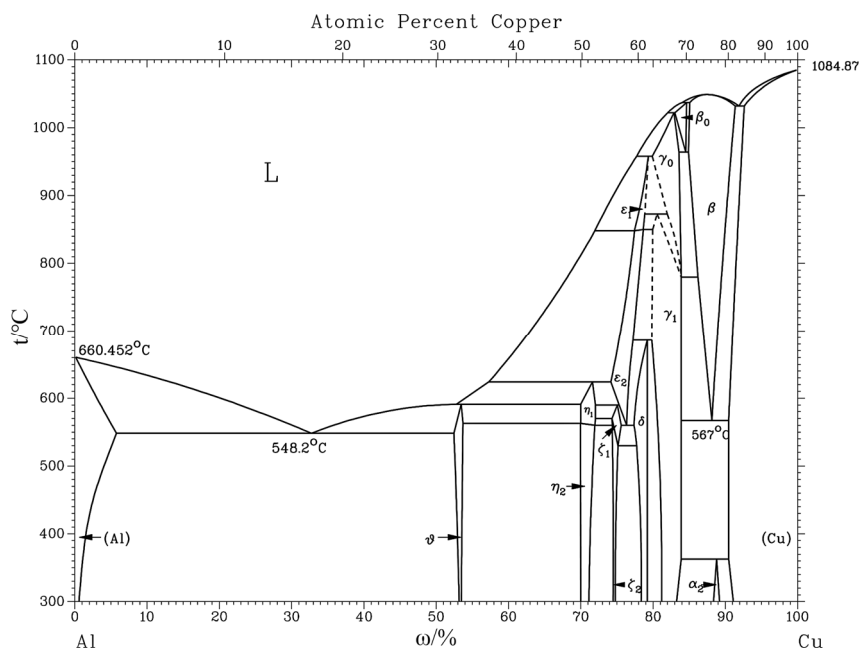


图 4 Cu-Al 二元合金相图^[36]

Fig.4 Phase diagram of Cu-Al binary alloy

徐慧^[24]研究了铜丝球键合点 250 °C 老化 100 h 后的键合界面, 指出 Cu/Al 界面上金属间化合物层分为 3 层, 且中间一层很薄, 并通过 EDX 分析和 Micro-XRD 分析证明了靠近 Al 侧的金属间化合物为 CuAl_2 、靠近 Cu 侧的为 Cu_9Al_4 。Du 等^[37]通过对 Cu/Al 界面的研究发现, 在 Cu/Al 界面上也存在 3 层 IMC, 其厚度随着退火温度的增加而增加, 靠近 Al 侧的 IMC 为 CuAl_2 、中间层为 CuAl 、靠近 Cu 侧的为 Cu_9Al_4 。上述二者的研究结论一致, 为 Cu/Al 引线界面研究提供了实验参考。

Cu/Al 键在服役过程中, 随着温度的升高以及周围环境的变化, 所产生的金属间化合物会产生腐蚀裂纹, 或者由于 IMC 体积的变化产生空洞, 导致电气性能、力学性能等受到影响, 降低键合可靠性。因为 Pd 具有良好的结合能力及可靠性, 目前解决该问题的主要手段为掺杂 Pd 元素, 或者形成镀 Pd 铜丝, 从而提升其可靠性。

键合丝中的 Pd 在长时间退火后会形成 Pd 富集区, 改变键合界面的结构^[38-39], 从而提高键合界面的可靠性。Qin 等^[40]通过 384 h 的无偏高加速压力实验 (Un-biased Highly Accelerated Stress Test, UHAST), 对 Cu 丝和镀 Pd 铜丝的键合界面进行了 TEM 分析, 从热力学和动力学的角度解释了钯层提高铜丝球焊可靠性的机理, 实验数据表明, 与铜丝键合处的 Cu_3Al_2 是最富 Cu 的 IMC, 而在镀 Pd 铜

丝的键合界面, 最富 Cu 的 IMC 转变成了 $(\text{CuPd}_x)\text{Al}$, 覆盖了键合界面长度的 80%, 沿界面的其余部分, 最富 Cu 的 IMC 被确定为 $(\text{CuPd}_x)_3\text{Al}_2$ 。表明 Pd 涂层抑制了 $(\text{CuPd}_x)_3\text{Al}_2$ 的形成, 进而提高了键合可靠性。因此, 在 Cu/Al 体系中, 适量 Pd 元素的添加对于提高键合可靠性有着积极作用。

同时, Pd 元素的存在, 使得铜丝在封装环境中的使用性能更加稳定。Kaimori 等^[41]的实验数据指出, 镀 Pd 铜丝的可靠性源于 Pd 的防腐特性。且通过模拟仿真显示, Pd 抑制了 Cu_3Al_2 的形成, 这是在高加速压力测试 (HAST) 期间最有可能被 Cl 腐蚀的 IMC, 并且 Pd 层可以充当 Cl 渗透的阻挡层, Cu 和 Al 之间的 Pd 层也可以减缓 IMC 的产生^[42]。Uno 等人^[18]通过对比裸铜和镀 Pd 铜丝在两种不同树脂封装条件下的高压加速老化寿命试验 (PCT) 和 HAST 实验发现: 裸铜丝在绿色树脂封装、PCT 实验 400 h 后, 界面会发生腐蚀; 而在传统树脂 (含 Br 作为阻燃剂) 封装的条件下, 没有发现裸铜线键合界面腐蚀产物的特征, 并认为 Cu_9Al_4 或者是 CuAl_2 是腐蚀性的候选项, 同时提出了图 5 所示的两种树脂封装条件下的失效键合界面结构, 并与镀 Pd 铜丝进行了对比, 认为 Pd 富集层可以控制 Cu 原子和 Al 原子的相互扩散, 改变 IMC 相的生长, 同时保护键合界面不受腐蚀性离子 (如 Cl 和 Br) 的影响, 提高键合可靠性。

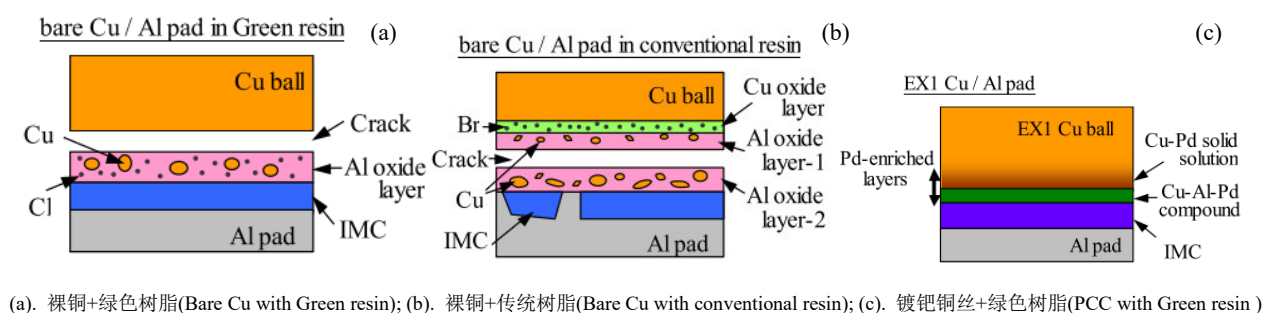


图 5 不同封装条件下 IMC 示意图^[18]

Fig.5 Schematic diagram of IMC under different packaging conditions

Cao 等^[43]研究了镀 Pd 铜丝中不同 Pd 厚度对键合界面的影响发现: 在 PCT 测试的潮湿环境中, Br 元素的存在会造成弱酸性条件, 由于 Pd 厚度较小, 界面上未能形成 Pd 保护层, Br 可以扩散到键合界面处发生腐蚀; PCT 测试后, 键合界面出现空洞现象, 键合强度也显著降低, Cu_9Al_4 由于被 Br 腐蚀而检测不到, 这与文献^[42]的假设相符。

所以, 在同样的测试条件下, Pd 厚度较大的镀

Pd 铜丝可以形成有效的保护层, 提高结合强度。因此, 在镀 Pd 铜丝中一定厚度的 Pd 可以防止 IMC 腐蚀、提高键合质量, 但对于 Pd 层的厚度暂无法给出相对统一的标准。上述研究均表明, Pd 的添加能够极大提高键合丝的使用性能, 为 Cu/Al 引线键合产品开发与研究提供了相关实验参考, 但对于 Pd 在 Cu 键合界面上的作用机理, 还需进一步深入研究。

3 键合界面 IMC 及 kirkendall 空洞的讨论

对于 IMC 对界面可靠性的研究,一般认为进行元素掺杂或者在表面形成镀层能够提高其可靠性, Pd 元素因其良好的特性,被广泛应用于键合丝的研究和生产过程。如前述,原子的扩散导致了 IMC 在界面上生长,从而提高了界面强度,但已有学者提出:在 Cu-Al 体系中,当 Pd 含量添加过多时,界面上几乎没有 IMC 的生成,原因是焊球底部形成的 Pd 覆盖层阻碍了原子的扩散,阻碍了 IMC 形成,导致键合强度变弱,可靠性下降,通过优化 Pd 含量,认为界面上 75%的 Pd 覆盖率不仅能有效形成金属间化合物,还能提高其对 Cl 的抗腐蚀性能^[44],为铜丝的开发提供了实验依据。对于 Au-Al 体系 IMC 的形成也有类似的结论:过量的 Pd 含量添加会在 Au₄Al 晶粒之间形成分离的富 Pd 岛晶粒,导致对 Au₄Al 的氧化保护减少,从而显示出低键合可靠性,0.3%添加量的 Pd 能够使 Au-Al 键合界面体现出较好的键合可靠性与抗氧化能力^[45]。同时,在 Ag-Al 体系中也有类似的发现,较厚的 IMC 会导致裂纹的产生使可靠性下降,通过 Pd 元素或者 Au 元素的添加,能在一定程度上抑制 IMC 的过度生长,增强键合可靠

性^[33],为 Pd 元素在引线键合产品中的应用提供了指导。

在 kirkendall 空洞的研究方面,与纯 Cu 体系相比,添加少量的 Pd 能够促进空洞的出现与界面上 IMC 的产生和生长,但少量空隙对可靠性影响不大,过多的 Pd 才会导致大量的空隙和裂缝,降低界面可靠性^[37,46]。而键合界面内空洞的产生,不仅与 kirkendall 效应相关,还与 IMC 生长过程中的氧化以及体积收缩有关^[47],但对于键合界面上空洞问题的分析,由于其微观特性,且影响因素众多,暂无法定量进行分析。

通过综述不同学者对于界面上 IMC 的研究结果发现,由于实验条件和工艺上的部分差别,对于 IMC 的演变过程所得到的分析结果略有不同,同时键合界面上 IMC 的形成机理比较复杂,与键合材料、工艺参数、存储条件以及芯片焊盘工艺都有着密切的联系。由于界面层研究的尺度比较微观,使得 IMC 的研究难度加大,对 IMC 层厚度、kirkendall 空洞尺寸等的定量分析难以统一,许多学者针对该问题,也进行了大量的研究工作,为实验和生产提供了指导作用,下面就不同键合丝在界面研究过程中所遇到的主要问题和应对措施等进行汇总,如表 2 所示。

表 2 不同键合丝在界面上的反应、导致的问题和应对措施

Tab.2 Reaction of different bonding wires on the interface, existing problems and solutions

丝材类型	IMC	主要反应式	导致的问题	应对措施	文献
Au	Au ₄ Al	Au+2Al=>AuAl ₂	长时间的高温存储容易产生	通过元素掺杂,减缓在键合状态下	[48-49]
		Au+Al=>AuAl	微小的 kirkendall 孔洞	Au 原子向铝焊盘的扩散	
		2Au+Al=>Au ₂ Al			
	Au ₂ Al	8Au+3Al=>Au ₈ Al ₃	金属间化合物 AuAl 在未封装	键合后及时进行封装,或在键合之前	[50]
		4Au+Al=>Au ₄ Al	条件下或在高温存储时发生	使用等离子进行清洗	
		3AuAl ₂ +13Au=>2Au ₈ Al ₃	氧化反应		
Ag	Au ₈ Al ₃ +4Au=>3Au ₄ Al				
	Ag ₃ Al	2Ag+Al=>Ag ₂ Al	在使用裸 Ag 丝时,高压加速老化寿命试验(PTC)可靠性低	在合金中添加 Pd,丝材 PTC 寿命随着 Pd 含量的增加而增加:Ag-3%Pd>Ag-1%Pd>Ag	[51]
	Ag ₂ Al	Ag ₂ Al+Ag=>Ag ₃ Al		封装过程中使用含卤素元素较低的封装材料和阻燃剂	[52]
Cu	CuAl ₂		IMC 的腐蚀引发微裂纹		
	CuAl	Cu+2Al=>CuAl ₂			
	Cu ₄ Al ₃	9Cu+4Al=>Cu ₉ Al ₄	封装材料中的 pH 值较低, Cu ₉ Al ₄ 被酸性环境腐蚀,在界面上产生微裂纹	选择恰当的封装材料和阻燃剂	[53]
	Cu ₃ Al ₂	2CuAl ₂ +7Cu=>Cu ₉ Al ₄	IMC 和 AlCl ₃ (中间产物)在潮湿环境中水解,产生腐蚀	使用低卤素封装材料和阻燃剂	[54]

综上, 在键合界面上一定数量或一定厚度的 IMC 层对于键合强度和键合可靠性的提升均是有利的, 且一定含量的 Pd 有助于 IMC 的形成, 并提高其抗腐蚀能力。同时, 对于界面上空洞的产生, 对键合质量的影响并非都是负面的, 一定数量的空洞对于界面强度的提高是有好处的。但对于 IMC 的厚度以及界面上空洞对键合性能的影响问题, 暂无法对其定量分析, 需要更深入的研究。

4 结语

键合丝作为芯片和外部电路之间的电连接引线, 是半导体集成电路、分立器件、传感器、光电子等传统封装工艺制程中必不可少的核心基础原材料, 而键合可靠性在整个过程中对产品使用性能的影响最大, 一直是人们重点关注的问题, 尤其是界面上金属间化合物的形成与演变机理, 由于影响因素较多, 暂未形成较为统一的结论, 且还受到键合参数、服役环境、存储环境等方面的影响, 使得这方面的研究难度加大, 因此关于键合丝界面的研究, 对推动微电子封装技术的发展、提高电子元器件的使用性能和寿命方面起着重要作用, 也是大批学者研究的重点之一。

目前关于键合界面的研究, 虽然很多学者做了大量的工作, 但由于技术的局限性, 还暂未形成系统性的研究, 同时对于界面上金属间化合物的动态演变过程, 暂无法直观的进行观察。随着信息技术的快速发展, 可以采用计算机进行模拟仿真, 对实验结果进行预测, 指导实验方向, 从而在一定程度上减少工作量, 缩短实验时间; 未来或将有希望通过第一性原理的方法, 从原子尺度揭露键合界面上金属间化合物的形成及演变机理。

参考文献

- [1] 杨国祥, 孔建稳, 郭迎春, 等. 一种半导体封装用键合金丝的研制[J]. 贵金属, 2010, 31(1):13-16.
YANG G X, KONG J W, GUO Y C, et al. Study on gold bonding wires applied on semiconductor package [J]. Precious Metals, 2010, 31(1): 13-16.
- [2] 谢爽. 大规模集成电路异质键合失效机理及可靠性研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2021.
XIE S. Study on the failure mechanism and reliability of heterogeneous bonding in LSI[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2021.
- [3] 田春霞. 电子封装用导电丝材料及发展[J]. 稀有金属, 2003(06): 782-787.
- [4] 计红军, 李明雨, 王春青. 超声楔键合 Au/Al 和 Al/Au 界面 IMC 演化[J]. 电子工艺技术, 2007(03): 125-129.
JI H J, LI M Y, WANG Q C. Intermetallic compound evolution of ultrasonic Au/Al and Al/Au wedge bond[J]. Electronics Process Technology, 2007(03): 125-129.
- [5] 康菲菲, 周文艳, 吴永瑾, 等. 微电子封装金包银复合键合丝的微结构和性能[J]. 半导体技术, 2018, 43(09): 702-707.
KANG F F, ZHOU W Y, WU Y J, et al. Microstructure and properties of gold-coated silver composite bonding wire for microelectronic package[J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(09): 702-707.
- [6] 康菲菲, 吴永瑾, 孔建稳, 等. 微电子封装用键合金丝替代产品的研究现状[J]. 贵金属, 2017, 38(4): 81-86.
KANG F F, WU Y J, KONG J W, et al. Research status of substitute products for gold bonding wires used in microelectronics packaging[J]. Precious Metals, 2017, 38(4): 81-86.
- [7] LIM A B Y, BOOTHROYD C B, YAU W O, et al. Interfacial evolution and bond reliability in thermosonic Pd coated Cu wire bonding on aluminum metallization: Effect of palladium distribution[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 63: 214-223.
- [8] HSUEH H W, HUNG F Y, LUI T S, et al. Effect of the direct current on microstructure, tensile property and bonding strength of pure silver wires[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(8): 1159-1163.
- [9] BREACH C D. What is the future of bonding wire? Will copper entirely replace gold?[J]. Gold Bulletin, 2010, 43(3): 150-168.
- [10] 周文艳, 吴永瑾, 陈家林, 等. 银丝键合烧球参数对键合质量的影响[J]. 贵金属, 2017, 38(3): 34-39.
ZHOU W Y, WU Y J, CHEN J L, et al. Effect of electronic flame off parameters on the bonding using silver wire[J]. Precious Metals, 2017, 38(3): 34-39.
- [11] 中国半导体行业协会封装分会, 中国半导体封装测试产业调研报告(2020 年版), 2020 年 8 月. <https://mp.weixin.qq.com/s/xkJWjM7eh-25zdz2VJXusQ>
- [12] QIN W, ANDERSON T, CHANG G. Mechanism to improve the reliability of copper wire bonding with palladium-coating of the wire[J]. Microelectronics

- Reliability, 2019, 99: 239-244.
- [13] 钟明君, 黄福祥, 阮海光, 等. 铜及银键合丝材料的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(S2): 99-102.
- ZHONG M J, HUANG F X, RUAN H G, et al. Research progress on the copper and silver bonding wire materials[J]. Materials Review, 2017, 31(S2): 99-102.
- [14] XU H, LIU C, SILBERSCHMIDT V V, et al. Growth of intermetallic compounds in thermosonic copper wire bonding on aluminum metallization[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(1): 124-131.
- [15] 梁爽, 黄福祥, 彭成, 等. 电子封装用铜及银键合丝研究进展[J]. 功能材料, 2019, 50(05): 5048-5053.
- LIANG S, HUANG F X, PENG C, et al. Research progress on copper and silver bonding wires for microelectronic packaging technology[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(05): 5048-5053.
- [16] 胡昌义, 刘时杰. 贵金属新材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015.
- [17] BOETTCHER T, ROTHER M, LIEDTKE S, et al. On the intermetallic corrosion of Cu-Al wire bonds[C]//2010 12th Electronics Packaging Technology Conference. IEEE, 2010: 585-590.
- [18] UNO T, YAMADA T. Improving humidity bond reliability of copper bonding wires[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2010: 1725-1732.
- [19] OSENBACH J, WANG B Q, EMERICH S, et al. Corrosion of the Cu/Al interface in Cu-wire-bonded integrated circuits[C]//2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2013: 1574-1586.
- [20] QIN W, ANDERSON H, ANDERSON T, et al. Corrosion mechanisms of Cu wire bonding on Al pads[C]//2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2018: 1446-1454.
- [21] KAIMORI S, NONAKA T, MIZOGUCHI A. The development of Cu bonding wire with oxidation-resistant metal coating[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(2): 227-231.
- [22] LI M, LI C, WANG F, et al. Thermodynamic assessment of the Al-Au system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 385(1/2): 199-206.
- [23] 郭迎春, 杨国祥, 孔建稳, 等. 键合金丝的研究进展及应用[J]. 贵金属, 2009, 30(3): 68-71.
- GUO Y C, YANG G X, KONG J W, et al. Development and application of gold bonding wires[J]. Precious Metals, 2009, 30(3): 68-71.
- [24] 徐慧. 铜及金丝与铝合金焊盘键合的金属间化合物生长和可靠性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- XU H. Intermetallic compounds formation and reliability on bonding joints of copper wire and gold wire with aluminum alloy pad[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [25] BREACH C. Intermetallic growth kinetics in gold ball bonds on Al-1% Si-0.5% Cu bond pads at 175°C[J]. Microelectronics International, 2020.
- [26] GOH C S, CHONG W L E, LEE T K, et al. Corrosion study and intermetallics formation in gold and copper wire bonding in microelectronics packaging[J]. Crystals, 2013, 3(3): 391-404.
- [27] MASSALSKI T B. Binary alloy phase diagrams[M]. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1986.
- [28] OKAMOTO H, OKAMOTO H. Phase diagrams for binary alloys[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- [29] ASTA M, HOYT J J. Thermodynamic properties of coherent interfaces in fcc-based Ag-Al alloys: A first-principles study[J]. Acta Materialia, 2000, 48(5): 1089-1096.
- [30] BOZZOLO G, GARCÉS J E, SMITH R J. Atomistic modeling of Ag deposition on the low-index faces of Al and Al deposition on Ag[J]. Surface Science, 2005, 583(2-3): 229-252.
- [31] CHENG C H, HSIAO H L, CHU S I, et al. Low cost silver alloy wire bonding with excellent reliability performance [C]//2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2013: 1569-1573.
- [32] CHOI M R, KIM H G, LEE T W, et al. Microstructural evaluation and failure analysis of Ag wire bonded to Al pads[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(11): 2306-2315.
- [33] CHO J S, JEONG H S, MOON J T, et al. Thermal reliability & IMC behavior of low cost alternative Au-Ag-Pd wire bonds to Al metallization[C]//2009 59th Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2009: 1569-1573.
- [34] GUO R, HANG T, MAO D, et al. Behavior of intermetallics formation and evolution in Ag-8Au-3Pd alloy wire bonds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 588: 622-627.
- [35] KUO B H, TSAI D C, HUANG Y L, et al. Effect of Au addition on the microstructure and properties of Ag-4Pd

- bonding wires[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(11): 5411-5422.
- [36] KAH P, VIMALRAJ C, MARTIKAINEN J, et al. Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2015, 10(1): 1-13.
- [37] DU Y, WEN M, JI H, et al. Effects of Pd addition on the interfacial reactions between Cu and Al during ultrasonic welding[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(14): 12840-12850.
- [38] CHANG H S, HSIEH K C, MARTENS T, et al. The effect of Pd and Cu in the intermetallic growth of alloy Au wire[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(11): 1182-1187.
- [39] GRUSHKO B. Again regarding the Al-Pd phase diagram[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 557: 102-111.
- [40] QIN W, ANDERSON T, CHANG G. Mechanism to improve the reliability of copper wire bonding with palladium-coating of the wire[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 99: 239-244.
- [41] KAIMORI S, NONAKA T, MIZOGUCHI A. The development of Cu bonding wire with oxidation-resistant metal coating[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(2): 227-231.
- [42] ABE H, KANG D C, YAMAMOTO T, et al. Cu wire and Pd-Cu wire package reliability and molding compounds[C]//2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2012: 1117-1123.
- [43] CAO J, FAN J L, LIU Z Q, et al. Effect of Pd thickness on bonding reliability of Pd coated copper wire[C]//2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). IEEE, 2014: 623-629.
- [44] LOIS L J, WEIKOK T, MINGLANG Y, et al. BHAST, PCT, TCT reliability performance comparison of Cu-Al, PdCu-Al, Ag-Al[C]//2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). IEEE, 2020: 63-67.
- [45] SHIN J W, SONG M S, PARK Y S, et al. Effect of Pd addition on ultra-fine pitch Au wire/Al pad interface[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 2010: 329-335.
- [46] DU Y, LIU Z Q, JI H, et al. The mechanism of Pd distribution in the process of FAB formation during Pd-coated Cu wire bonding[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(16): 13774-13781.
- [47] XU H, ACOFF V L, LIU C, et al. Void growth in thermosonic copper/gold wire bonding on aluminum pads[C]//2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2011: 1729-1735.
- [48] BREACH C D, LEE T K. Shear strength and failure modes of As-bonded gold and copper ball bonds on aluminum metallization[J]. Journal of electronic materials, 2012, 41: 2018-2028.
- [49] XU H, ACOFF V L, LIU C, et al. Void growth in thermosonic copper/gold wire bonding on aluminum pads[C]//2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2011: 1729-1735.
- [50] MURALI S, SRIKANTH N, VATH III C J. An evaluation of gold and copper wire bonds on shear and pull testing[J]. Journal of Electronic Packaging, 2006, 128(3): 192-201.
- [51] CHO J S, YOO K A, HONG S J, et al. Pd effects on the reliability in the low cost Ag bonding wire[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2010: 1541-1546.
- [52] XU H, LIU C, SILBERSCHMIDT V V, et al. Effect of bonding duration and substrate temperature in copper ball bonding on aluminium pads: A TEM study of interfacial evolution[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(1): 113-118.
- [53] LEE T K, BREACH C D, CHONG W L. Comparison of Au/Al and Cu/Al in wirebonding assembly and reliability[C]//2011 6th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). IEEE, 2011: 234-237.
- [54] GAN C L, FRANCIS C, CHAN B L, et al. Extended reliability of gold and copper ball bonds in microelectronic packaging[J]. Gold Bulletin, 2013, 46: 103-115.