

贵金属键合丝材料的研究进展

陈永泰, 谢 明, 王 松, 张吉明, 杨有才, 刘满门, 王塞北, 胡洁琼, 李爱坤, 魏 宽
(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, 昆明贵金属研究所, 昆明 650106)

摘 要: 贵金属键合丝是半导体封装的关键材料之一, 详细综述了键合金丝、键合金银丝、键合银丝和镀钯键合铜丝的合金成分设计, 制备工艺和发展现状, 并展望了其未来发展前景。

关键词: 金属材料; 贵金属键合丝; 合金成分; 制备工艺; 发展现状

中图分类号: TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)03-0066-05

Research Progress on the Precious Metal Bonding Wire Materials

CHEN Yongtai, XIE Ming, WANG Song, ZHANG Jiming, YANG Youcai,
LIU Manmen, WANG Saibei, HU Jieqiong, LI Aikun, WEI Kuan

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

Abstract: Precious metal bonding wire are one of key materials in semiconductor packaging. The alloy composition, preparation technology and research situation of Au bonding wire, Au-Ag bonding wire, Ag bonding wire and Pd-plated bonding Cu wire were summarized. In the meantime, the research prospect of precious metal bonding wire was also forecasted.

Key words: metal materials; precious metal bonding wire; alloy composition; preparation technology; research state

键合丝作为一个产品族, 是半导体封装的关键材料之一^[1], 它的功能是实现半导体芯片与引脚的电连接, 起着芯片与外界的电流入和导出的作用。键合丝目前主要由金丝、铜丝、铝丝、银丝、贵/贱金属复合丝材组成, 其中铝丝、铜丝主要用于中低挡电路^[2-3], 贵金属丝材占有中高产品超过总的 80% 的份额。本文根据相关的专利文献, 从合金成分设计, 制备工艺, 物理性能比较等方面, 总结了贵金属键合丝材的研究现状并展望了贵金属键合丝材今后的发展前景。

1 键合金丝

键合金丝是一种具备优异电气、导热、机械性

能以及化学稳定性极好的内引线材料, 为适应不同的键合机型和键合工艺制备出不同品位和特性的产品, 主要应用于晶体管集成电路大规模集成电路等各种半导体器件中作为内引线用于各种电子元器件(如二极管, 三极管, 集成电路大规模集成电路 IC 卡等)的封装处理^[4]。近年来, 随着半导体行业的迅速发展, 集成电路的集成化程度越来越高, 电路板越来越小, 器件上的电极数越来越多, 电极间距越来越窄, 封装密度也相应变得越来越小, 客观要求作为引线的键合金丝具有高强度、低长弧度和非常高的弧线稳定性等性能^[5]。表 1 列出了常用键合金丝的力学性能。由表 1 可见, 键合金丝需要具有较好的室温和高温机械性能, 随着线材直径的增加, 线材需要具有高的拉断力和延伸率, 这样在键合和

充塑过程中可以得到优异的球颈强度和较高的弧线稳定性。

表 1 常用键合金丝的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of common Au bonding wire

型号	线材	室温机械性能		高温机械性能	
	直径	拉断力	延伸率	拉断力	延伸率
	/μm	/g	/%	/g	/%
FA-20	20	6~9	2~6	>4.0	>0.5
C-20	20	5~8	2~6	>4.0	>0.5
FA-25	25	9~13	2~7	>5.5	>1.0
C-25	25	8~12	2~6	>5.5	>1.0
FA-30	30	14~18	3~9	>8.0	>1.0
C-30	30	12~16	3~8	>8.0	>1.0
FA-38	38	20~30	4~12	>13.0	>1.0
C-38	38	18~28	3~10	>13.0	>1.0

1.1 键合金丝的成分设计与优化

超细金丝的直径最细只有 8 μm，对应的拉断力最小只有 1.5 g，金丝的生产是用拉丝机不断拉细，在拉细过程中细丝会出现加工硬化，使金属进一步变形的阻力增大，特别是直径 30 μm 以下的金丝，容易拉断，形成废品。为了提高材料的强度和加工性能，通常通过添加微量元素来细化晶粒和强化合金^[6-7]。文献[8]提供一种具有高强度、低长弧度、产品成材率高、收线轴的缠绕长度长的键合金丝，采用的材料配方(质量分数)为：Be 0.0005%~ 0.001%，Ce 0.001%~0.003%，Cu 或 Ge 0.0008%~ 0.002%，其余为 Au (含量≥99.996%)。文献[9]提供了一种具有高强度、低长弧度的优点，有效满足半导体行业对键合金丝的需要，采用的材料配方为：Ca 0.0003%~0.0008%，Cu 0.002%~0.004%，Ge 0.0005%~0.0015%，Au(含量≥99.996%)。文献[10]采用的材料配方为：Be 0.00008%~0.005%，Sm 0.00008%~0.005%。通过向合金中加入微量元素 Be、Sm，提高了键合金丝的抗拉强度和伸长率，特别适合于半导体行业对超细金丝的使用。此外，在键合金丝中添加微量的 W、Re、Pt、Y、Mg、Ir、La 等，可使丝材具有更佳强度与塑性^[11-19]。

为了达到键合金丝的合金化、加工细线化、低成本化以及提高键合强度和在高温振动环境下的使用性能。金丝中的添加元素趋向于多元化、微量化发展。微量添加元素对金丝的性能有重大影响，对键合性能和成品率起着决定性的作用，微量元素的

添加量要严格控制，不能超出添加范围，否则适得其反。

1.2 键合金丝的制备工艺

键合金丝的生产方法主要包括熔铸工艺、拉丝工艺、退火工艺、性能检测、绕线等。通过优选工艺、细化工艺、改进装置，可以提高材料的产品质量、提高产品成材率、实现产业化生产，降低生产成本等。如何获得均匀的铸态组织，一直是该领域研究的热点，包括中间合金的制备、熔铸工艺、拉丝工艺等。如昆明贵金属研究所采用漏浇-激冷法制备中间合金^[20]，该方法所制中间合金，添加到母体金属液中，合金化速度快，分散性好，组分烧损可控、强化元素分别均匀，铸锭组织均匀。

键合金丝合金锭的制备方法有真空熔炼浇铸法和连铸法。真空熔炼浇铸法制得的合金锭重量一般比较小，其缩孔比较深，铸锭去头去尾后，铸锭的成品率比较低，不适合规模化生产。现在大部分的企业都是采用连铸方法制备合金棒材，从而大大提高了铸锭的成品率。许多学者和企业对连铸法制备键合金丝合金棒进行了大量的研究。北京工业大学史耀武等^[21]对键合金丝产业化技术进行了研究，采用立式中频感应真空连铸炉进行连铸，确定了最佳的连铸工艺参数：1300℃精炼时间为 5~10 min，拉铸温度为 1240~1260℃，拉铸速度为 200~400 mm/min。北京达博有色金属焊料有限责任公司刘家强等^[22]采用间歇式拉铸抑制柱状晶的形成，有利于形成等轴晶，在满足铸锭延伸性的同时可以达到一定的强度，能更好地满足超微细丝的加工，超微细丝成材率高，批料间一致性好，满足批量化、规模化稳定生产。

在金丝的拉丝过程中，一般需将其加热到 300~600℃进行退火，退火后直接缠绕于收线轴进行分卷，这时键合金丝之间容易产生自扩散的粘结效应，导致下道工序使用放不出线，产生大量的断线，产品成材率不高。专利^[23]为防止键合金丝退火后产生粘连，在退火炉与收线轴之间设置了一种冷却循环装置，能够较好地解决键合金丝经连续在线退火后缠绕在同一收线轴上产生粘连现象、收线轴不能缠绕长线的问题，提高了产品成材率、时间效率。

2 键合金银丝

针对键合金丝细线化、连接性和降低成本问题，日本田中电子、住友金属矿山和德国贺利氏等公司

相继开发出高性能的 Au-Ag、Au-Ni、Au-Sn、Au-Cu 等新型微细合金丝, 现在已开始进入推广应用阶段, 其中 Au-Ag 键合丝材的应用比较成熟。Au-Ag 键合丝分为 2 种, 一种是 Au-Ag 合金丝, 另一种是镀金银丝。对这 2 种丝材的制备工艺优化、组织结构调制、微合金化改性等, 均有相关学者在持续研究。

2.1 键合金银合金丝

Ag 与 Au 在液态和固态都能无限固溶, 形成置换型固溶体。由于 Ag、Au 原子之间的相互置换, 使合金基体晶格发生畸变, 产生强化作用。该合金丝与传统的键合金丝相比, 强度高, 抗振动断裂性能优良, 可靠性高。文献[24]公布了一种键合金丝, 其中加入 10%~25% 的 Ag, 还加入 Ca、Pd、Cu、In、Sn、Ni、La、Sc、Ce 中的一种或几种, 该键合金丝成本低, 材料的强度、延伸率高, 更好的抵抗封装冲击力及封装材料热膨胀力。文献[25]公开一种键合金银丝, 其中包括 5%~40% 的 Ag(质量分数, 下同), $(50\sim1000)\times10^{-6}$ 的 Pd(Rh, Pt, Ir), $(1\sim50)\times10^{-6}$ 的 B(Be, Ca), $(1\sim50)\times10^{-6}$ 的 P(Sb, Bi), $(5\sim50)\times10^{-6}$ 的 Mg(Ti, Zn, Sn), 该键合丝材具有较高的室温和高温抗拉强度、良好的粘结性和芯片不开裂等特点。文献[26]公开了一种表面化学性质稳定、在氮气焊接气氛中不形成炭黑, 不会软化、成球性好的键合银基丝材, 其中含有 1%~5.5% 的 Au 和 $(1\sim100)\times10^{-4}$ 的 Bi。

2.2 镀金银基键合丝

镀金银基键合丝采用常规技术的生产设备制备, 材料成本只有键合金丝的 1/4, 而且具有与键合金丝相同的焊接性能, 成球性好, 可靠性高。用做 LED 发光管封装内引线, LED 发光管亮度、衰减特性及电性能优于键合金丝。文献[27]公开了一种能在热压粘合的尖端部位形成稳定焊球的镀金键合银丝, 金膜中至少含有 Na、Se、Ca、Si、Ni、Be、K、C、Al、Ti、Cs、Mg、Sr、Ba、La、Y 和 Ce 中的一种元素。文献[28]公开了一种银基键合丝的制备方法, 包括预制银线、银线表面镀金、超细拉丝和退火, 其特征在于: ① 银棒胚料为纯度至少为 99.9990% 的银块, 并以连续铸造方式预制成直径为 8~10 mm 的圆银棒胚料; ② 圆银棒胚料熔炼成单晶银棒, 熔炼温度为 930~990℃, 拉伸速度为 4.5~11 mm/min, 单晶拉伸后银棒直径为 3~5 mm; ③ 将单晶银棒预拉伸至直径为 100~300 μm 的银线; ④ 在氮气保护气氛中将预拉伸后的银线进行退火处理, 退火温度为 450~500℃, 退火时间为 20~30

min; ⑤ 在电镀液为软金电镀液, 电流密度为 0.25~5.5 A/dm² 的条件下进行银线材表面镀金。

3 键合银丝

键合银丝是近年来 LED、IC 行业内出现的替代传统键合金丝的产品。据权威机构统计, 至 2013 年 6 月, 约有 40% 左右的 LED 封装厂家已经由金丝制程转为银丝制程。

表 2 所示为键合银丝的室温机械性能。由表 2 可见, 键合银丝的室温机械性能与键合金丝相当, 在使用温度不是太高的领域(如 LED 封装、IC 封装等)可以部分或全部取代键合金丝, 降低生产成本。

表 2 键合银丝的室温机械性能

Tab.2 Mechanical properties of Ag bonding wires at room temperature

线材直径/ μm	拉断力/g	延伸率/%
18	>6	5~10
20	>7	5~10
23	>8	6~15
25	>9	6~15
30	>13	10~18
38	>20	10~20

键合银丝一般采取多元掺杂合金, 加入微量元素, 减少金属化合物的形成, 同时阻止了界面氧化物和裂纹的产生, 降低了结合性能的退化, 使结合性能和金丝一样稳定。与金线比较, 新型银基合金键合丝有以下特点: ① 价格便宜, 是同等线径的金丝的 20% 左右, 成本下降 80% 左右; ② 导电性和散热性都好; ③ 反光性好, 不吸光, 亮度与使用金线的比较可提高 10% 左右; ④ 在与镀银支架焊接时, 可焊性比较好; ⑤ 不需要加氮气保护, 只要简单调整相关参数即可。通过控制熔铸、添加合金元素、精细加工、热处理, 还可以进一步优化键合银丝的组织结构, 使其得到合适的机械性能, 以满足不同的需要。专利^[29]公开了一种键合银丝及其制备方法。键合银丝由以下组分组成: Cu 0.30%~0.80%, Ce 0.20%~0.50%, Pd 0.05%~0.09%, 余量为 Ag。该专利在高纯银材料的基础上, 采取多元掺杂合金以阻止界面氧化物和裂纹的产生, 使其结合性能和金丝一样稳定; 并通过控制熔铸、加工、热处理条件, 进一步优化组织结构, 保证其机械性能, 以满

足不同的需要。

4 镀钯键合铜丝

随着集成电路及半导体器件封装技术向多引线化、高集成度和小型化发展, 封装材料要求采用线径更细、电学性能更好的键合丝进行窄间距、长距离的键合。传统的金丝和银丝已经在导电和导热性能上逐步趋近于极限。

铜丝作为内引线, 具有比金丝高的导电和导热性能, 可以用于制造对电流负载要求更高的功率器件, 而且可以使高密度封装时的散热更为容易^[30]。铜丝较强的抗拉强度可以使丝线直径变得更细, 焊盘尺寸和焊盘艰巨也能相应减小, 价格比贵金属键合丝材便宜很多。但 Cu 的易氧化、高硬度及应变强度是人们最为关注的缺点^[31]。尤其在键合 Cu 烧球工艺的加热环境下, Cu 表面极易氧化, 形成的氧化膜降低了铜线的键合性能。为了防止铜线氧化, 镀钯键合铜丝逐渐受到封装界的关注^[32]。

目前国内生产镀钯键合铜丝的代表性厂家主要为山东贺利氏招远贵金属材料有限公司、贵研铂业股份有限公司和宁波康强电子股份有限公司。上述公司都拥有高纯度金属精密加工方面的成熟技术, 产品规格齐全, 性能稳定。另外, 四川维纳尔特种电子有限公司也报道了其具有明显价格竞争优势的钯铜键合丝产品, 该丝材直径为 25 μm , 拉断力大于 0.088 N, 延伸率为 12%~18%, 比单晶键合铜丝的断裂负荷提高了 0.029 N。

镀钯键合铜丝机械强度高、硬度适中、焊接成球性好、非常适用于高密度、多引脚集成电路封装。镀钯键合铜丝的钯的含量一般为 1%~10%, 产品的镀层厚度一般在 2~7 μm 。其制备方法主要有 2 种, 一种是电镀, 另一种是动态连续磁控溅射真空镀膜。文献[33]公开了一种以 Cu 基体、表面覆有纯钯保护层的键合铜丝产品: 按照重量百分比, 钯为 1.35%~8.19%, 其余为铜, 其制造方法为先制成线径小于 1 mm 的铜丝, 再电镀纯钯层, 最后精密拉拔成镀钯键合铜丝成品, 成品外观保持银白色金属光泽, 大大延长键合铜丝产品拆封后的保质期, 机械强度高, 抗氧化性能提升。文献[34]采用经单晶 Cu 棒拉伸成铜合金芯线, 在真空镀膜设备中进行动态连续磁控溅射真空镀膜, 阴极靶材为纯钯, 溅射率达到 0.1~1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$, 其镀钯层附着力远大于电镀的镀层, 在后续拉伸变形时变形一致, 表面均匀, 致密完整。

将镀钯铜丝成功地应用于芯片和引线框架的连接导线需要注意以下实际问题。① 钯层的致密度: 键合过程是一个高速自动化的生产过程, 要求一轴丝表面光滑, 性能稳定。由于钯层和铜的物理性能差异很大, 在拉拔过程中可能会有漏铜的现象产生; ② 最终产品尺寸: 为了得到完美的表面形貌, 拉拔到最终产品尺寸后再电镀是最有效的办法, 但在生产中却难以保证严格的产品尺寸; ③ 钯层对键合性能的影响: 涂覆钯层后防止了铜的氧化, 但在键合过程中, 若 Pd 元素参与 Cu-Al 金属间化合物的形成过程中, 就很可能改变金属间化合物的冶金和力学性质, 进而影响第一键合处的剪切应力强度。

5 展望

(1) 键合金丝的发展趋势是微量添加元素复合化、组成合金化、加工细线化和低成本化, 通过最佳的合金化元素设计提高金丝强度, 使丝更加细线化, 增加或降低弧高, 降低破断率, 提高可靠性及键合强度。但由于价格昂贵, 有逐渐被贱金属键合丝材或贵/贱金属键合丝材所替代的趋势。

(2) 键合金丝的配方、生产技术在国内外已经成熟, 发展性能好、价格低廉的键合丝材成为键合丝材生产厂家抢占市场的资本, 如镀金键合丝、键合银丝、镀钯键合铜丝, 逐渐得到市场的认可和推广, 已经成为了国内外科研究所、企业的研究热点。

参考文献:

- [1] 田春霞. 电子封装用导电丝材料及发展[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 782-787.
Tian C. Materials of conducting silks and their development using in electronics packaging[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 782-787.
- [2] 张玉奎. 半导体器件键合铝丝的发展趋势[J]. 轻合金加工技术, 1994(5): 5-9.
Zhang Y. The development trend of Al bonding wire in semiconductor device[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1994(5): 5-9.
- [3] 吴建得, 罗宏伟. 铜键合线的发展与面临的挑战[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2008, 26(6): 39-42.
Wu J, Luo H. The developments and challenges of Cu bonding wire[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2008, 26(6): 39-42.
- [4] 张臣. 芯片封装用电子结构材料的现状与发展[J]. 集成电路, 2003(5): 57-62.

- Zhang C. The current situation and development of electronic structure materials using in chip packaging[J]. Applications of IC, 2003(5): 57-62.
- [5] 杨国祥, 郭迎春, 孔建稳, 等. 稀土元素对键合金丝组织与性能的影响[J]. 贵金属, 2011, 32(1): 16-19.
- Yang G, Guo Y, Kong J, et al. Effects of rare earth elements on structure and properties of gold bonding wire[J]. Precious Metals, 2011, 32(1): 16-19.
- [6] 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, Yang G, Kong J, et al. Development and application of gold bonding wires[J]. Precious Metals, 2009, 30(3): 68-71.
- [7] 朱建国. 键合金丝的合金化研究动向[J]. 贵金属, 2002, 23(2): 57-61.
- Zhu J. Trend of alloying investigation for gold bonding wires[J]. Precious Metals, 2002, 23(2): 57-61.
- [8] 郑康定, 郑芳, 李彩莲, 等. 键合金丝及其制备方法: 中国, CN102127663A[P]. 2011-07-20.
- [9] 郑康定, 郑芳, 李彩莲, 等. 键合金丝及其制备方法: 中国, CN102121077A[P]. 2011-01-21.
- [10] 汪云林, 凌强. 一种键合金丝及其制备方法: 中国, CN1885531[P]. 2006-12-27.
- [11] Sukehito I, Ichiro N. Au bonding wire for semiconductor element: JP, 05160184[P]. 1993-06-25.
- [12] Mikami M. Au bonding wire for semiconductor element: JP, 2008016550[P]. 2008-01-24.
- [13] Chiba J, Amada F, Takada M. Gold (Au) alloy bonding wire: JP, 2011142163[P]. 2011-07-21.
- [14] Nno T, Terajima S. Gold bonding wire for semiconductor: JP, 2004128184[P]. 2004-04-22.
- [15] Togashi A. Gold bonding wire: JP, 10172998[P]. 1998-06-26.
- [16] Bruchkobel K B. Bonding wire: US, 20090022621A1[P]. 2009-01-22.
- [17] Bischoff A, Schraepfer L, Holger Z. Bonding wire: DE, 200610006728[P]. 2007-08-23.
- [18] Hong S J, Park Y J, Cho J S. Gold alloy bonding wire for semiconductor device: KR, 20030023344[P]. 2003-04-14.
- [19] Maki K, Nakada Y. Gold alloy wire for bonding wire having high junction reliability, high circularity of compression bonding ball, high linearity and high resin flow resistance: JP, 2006351699[P]. 2006-12-28.
- [20] 杨国祥, 孔建稳, 郭迎春, 等. 一种用于键合金丝的中合金制备新方法: 中国, CN101508016[P]. 2009-08-19.
- [21] 张昆. 半导体器件集成电路用键合金丝产业化技术的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- Zhang K. A study on industrialized technology of golden bonding wires for semi-conductor integrated circuit components[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [22] 刘家强, 杨顺兴, 苏宏福, 等. 超微细键合金丝规模化生产方法: 中国, CN101607360[P]. 2009-12-23.
- [23] 杨顺兴, 向翠华. 防止键合金丝退火后产生粘连现象的冷却循环装置: 中国, CN201225782[P]. 2009-04-22.
- [24] 周钢, 薛子夜, 赵碎孟, 等. 一种键合金丝及其制备方法: 中国, CN102418001A[P]. 2012-04-18.
- [25] Joung D H, Cho J S, Moon J T. Gold-silver bonding wire for semiconductor device: KR, 20020024997[P]. 2002-05-07.
- [26] Togashi A, Yamagata T. Silver bonding wire: JP, 2012049198[P]. 2012-03-08.
- [27] Onodera H, Yamada T, Koizumi T. Gold-plated silver bonding wire: JP, 2001196411[P]. 2001-07-19.
- [28] 林滔. 一种银基键合丝及其制备方法: 中国, CN 101630664A[P]. 2010-01-20.
- [29] 林良. 键合银丝及制备方法: 中国, CN101626005A[P]. 2010-01-13.
- [30] 王彩媛, 孙荣禄. 芯片封装中铜丝键合技术的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(S1): 206-209.
- Wang C, Sun R. Research progress in copper wire bonding technology for chip packaging[J]. Materials Review, 2009, 23(S1): 206-209.
- [31] 黄华, 都东, 常保华, 等. 铜丝引线键合技术的发展[J]. 焊接, 2008(12): 15-20.
- Huang H, Du D, Chang B, et al. Development of copper wire bonding technology[J]. Welding, 2008(12): 15-20.
- [32] 康菲菲, 杨国祥, 孔建稳, 等. 镀钯键合铜丝的发展趋势[J]. 材料导报, 2011, 25(11): 104-107.
- Kang F, Yang G, Kong J, et al. The development trend of palladium-plated bonding copper wire[J]. Materials Review, 2011, 25(11): 104-107.
- [33] 郑康定, 冯小龙, 李彩莲, 等. 一种镀钯键合铜丝及其制备方法: 中国, CN101707194[P]. 2010-05-21.
- [34] 房跃波. 一种表面镀钯键合铜丝: 中国, CN102127663A[P]. 2011-07-20.