

Ag-4Pd 键合合金线性能和组织对键合强度的影响

曹 军¹, 范俊玲², 高文斌¹

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

(2. 焦作大学, 河南 焦作 454000)

摘 要: 利用扫描电镜、强度测试仪、热导率测试仪分析了 Ag-4Pd 和 Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线的性能及组织差异, 研究了微量 Ru 元素对 Ag-4Pd 键合合金线球焊点尺寸、焊点形貌及键合强度的影响。结果表明: Ru 元素的加入使 Ag-4Pd 键合合金线热导率由 403 W/m·K 降低到 385 W/m·K, Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线无空气焊球 (free air ball) 形状较 Ag-4Pd 键合合金线规则, 提高了键合合金线焊点连接强度; Ag-4Pd 键合合金线中的 Ru 元素使其热影响区长度由 50 μm 减小至 35 μm, 消除了由于热影响区长度过大导致的颈部微裂纹缺陷; Ag-4Pd 键合合金线中的 Ru 元素细化了晶粒, 增加了相同体积内不同取向的金属晶粒数目, 改善了变形时的协同作用, 降低了形变的不均匀性程度, 获得了较规则的 Ag-4Pd 键合合金线球焊点形貌。

关键词: Ag-4Pd 键合合金线; Ru 元素; 形貌; 组织结构; 强度

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1836-06

键合 Ag 线由于其优秀的电学性能、良好的稳定性及适当的成本因素, 在 LED 封装、IC 封装、功率器件封装等方面已经开始应用^[1-5]。但对于纯 Ag 线而言, 由于导热率高、高温强度低等原因, 其键合过程中参数窗口范围较小, 且高温条件下球焊点失效几率较高, 进而降低生产效率及大功率 LED 器件的使用寿命^[6-10]。通过合金化获得高性能键合银基合金线是改善键合 Ag 线性能的有效途径, Pd 元素与 Ag 具有类似的特性且无限互溶, Pd 元素的加入能够提高银的高温稳定性及强度^[11-13]。因此, 对 Ag-Pd 合金线的研究越来越被重视, 近年来各国学者对 Ag-Pd 合金线进行了不少研究。T. H. Chuang^[14]等人研究了 Ag-8Au-3Pd 键合合金线组织结构的热稳定性, 得出了 Ag-8Au-3Pd 键合合金线热处理后组织为退火孪晶结构, 该组织结构能够提高 Ag-8Au-3Pd 键合合金线高温稳定性的结论; R. Guo^[15]等人研究了 Ag-8Au-3Pd 键合合金线键合界面金属间化合物类型, 得出了 Ag-8Au-3Pd/Al 界面生成 AuAl₂+(Au, Ag)₄Al 和 Ag₂Al 金属间化合物, 且 Ag₂Al

金属间化合物层可以有效阻止 Au 原子向 Al 界面扩散的结论; Y. W. Tseng^[16]等人研究了 Ag-2Pd 合金线键合界面特性, 得出了合金线键合界面存在 Ag₃(Pd)Al 和 Ag₂(Pd)Al 金属间化合物, 以及 Pd 元素可以降低键合界面金属间化合物生长速度的结论。但其中多涉及对 Ag-Pd 合金线性能及 Ag/Al 键合界面方面的研究, 对 Ag-Pd 合金线键合强度的研究鲜有论述。本实验通过对比研究 Ag-4Pd 和 Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线性能和组织对焊点形貌及键合强度的影响, 进一步探究微量 Ru 元素对 Ag-4Pd 键合合金线焊点形貌及键合强度的影响机理, 为 Ag-4Pd 键合合金线的应用提供理论依据。

1 实 验

实验材料为直径 0.025 mm AgA1 和 AgA2 键合合金线, AgA1 和 AgA2 键合合金线材料成分分别为: AgA1: Ag-4Pd, AgA2: Ag-4Pd-0.5Ru, 如表 1、表 2 所示, 成分检测采用辉光放电质谱 (glow discharge mass spectrometer) 检测。其力学性能分别为: AgA1 键合合

表 1 AgA1 键合合金线的化学成分

Table 1 Chemical composition of AgA1 alloy bonding wire (ω/%)

Ag	Pd	Cu	Sn	Sb	Pb	Fe	Al	Zn	Ca
≥95.99	3.99	0.00317	0.00003	0.00012	0.00013	0.00018	0.00037	0.00031	0.00010

收稿日期: 2017-06-22

基金项目: 河南省科技攻关项目 (2GSO64-A52-05)

作者简介: 曹 军, 男, 1979 年生, 博士, 河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000, 电话: 0391-3987541, E-mail: cavan@hpu.edu.cn

表 2 AgA2 键合金线的化学成分

Table 2 Chemical composition of AgA2 alloy bonding wire ($\omega/\%$)

Ag	Pd	Ru	Cu	Sn	Pb	Fe	Al	Zn	Ca
≥ 95.51	3.99	0.49	0.00235	0.00017	0.00018	0.00037	0.00056	0.00048	0.00008

金线, 伸长率 13.6%, 拉断力 9.2×10^{-2} N; AgA2 键合金线, 伸长率 15.6%, 拉断力 10.4×10^{-2} N。

分别采用 AgA1 和 AgA2 键合金线在自动键合设备上 进行键合实验。键合设备型号: ASM Eagle60, 封装形式: 2835 LED, 焊线类型: 反向球对球焊 (bonded stitch on ball, BSOB), 劈刀类型: SPT SU-25140-415E-ZU36-E, 键合参数如表 3 所示。采用 Dage Series 4000, BS250 测试仪对键合点的拉力、剪切力进行测试, 并对测试数据进行统计分析。采用 CS-E 热导率测试仪对 AgA1 和 AgA2 键合金线进行热导率测试; 采用 GDW-500 型高低温试验箱对器件做冷热冲击试验, 温度范围: $-20 \sim 120^\circ\text{C}$, 冷热循环次数: 200 次。采用 JEOL JSM-6700F 扫描电镜 (EDS) 对 AgA1 和 AgA2 键合金线组织结构及试验样品的键合形貌进行分析。

2 结果与讨论

2.1 Ag-4Pd 键合金线性能对球焊点键合强度的影响

图 1、2、3 分别是采用 AgA1 和 AgA2 键合金线烧球及键合后, 球尺寸、球剪切力、球拉力测试统计分析结果。

由图 1 可知, AgA1 键合金线经过电子灭火 (electronic flame-off, EFO) 成球后, 其无空气焊球 (free air ball, FAB) 尺寸波动范围较大, AgA2 键合金线 FAB 尺寸较为稳定。同时 AgA1 键合金线球剪切力和球拉力略低于 AgA2 键合金线, 且 AgA1 键合金线球剪切力和球拉力波动范围大于 AgA2 键合金线, 如图 2、图 3 所示。

表 3 Ag-4Pd 键合金线键合参数

Table 3 Bonded parameters of Ag-4Pd alloy bonding wire

Ball bonded	Wedge bonded	Electronic flame off
Impact force, F_f/N	0.80	Bonded force, F_1/N 0.90 Spark voltage/V 5000
Bonded force, F/N	0.75	Power, P_1/mW 80 EFO current/A 1.20
Power, P/mW	60	Time, t_1/ms 6 EFO time/ms 0.60
Time, t/ms	8	Bonded force, F_2/N 0.70 Tail length/mm 0.15
		Power, P_2/mW 50 Bonded tem./ $^\circ\text{C}$ 220
		Time, t_2/ms 6

图 4 是 AgA1 和 AgA2 键合金线 FAB 显微形貌。由图 4 可知, AgA1 键合金线 FAB 形貌呈不规则球

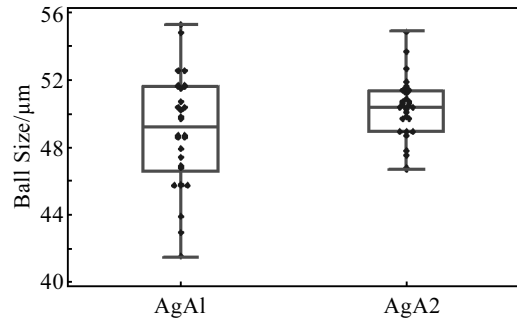


图 1 AgA1、AgA2 键合金线球尺寸统计分析

Fig.1 Ball size analyses of AgA1, AgA2 alloy bonding wire

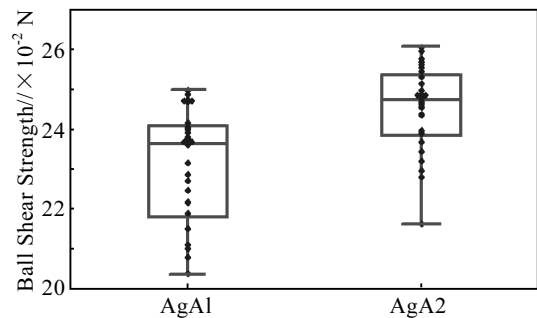


图 2 AgA1、AgA2 键合金线球剪切力统计分析

Fig.2 Ball shear strength analyses of AgA1, AgA2 alloy bonding wire

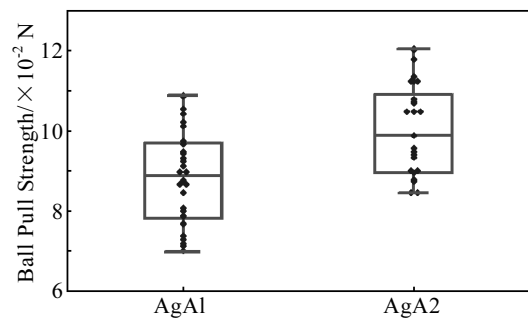


图 3 AgA1、AgA2 键合金线球拉力分析

Fig.3 Ball pull strength analyses of AgA1, AgA2 alloy bonding wire

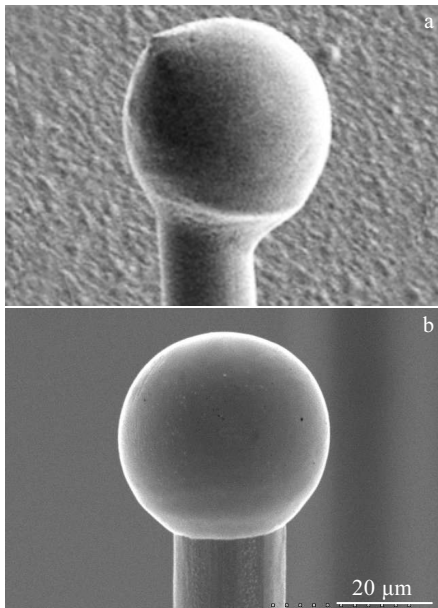


图 4 Ag-4Pd 合金键合线 FAB 形貌
Fig.4 FAB morphologies of Ag-4Pd alloy bonding wire:
(a) AgA1 and (b) AgA2

形,如图 4a 所示。AgA2 键合合金线 FAB 形貌呈较规则球形,如图 4b 所示。由于 AgA1 键合合金线 FAB 球形不如 AgA2 键合合金线 FAB 形状规则,在 FAB 球尺寸统计分析中波动范围较大。通过对 AgA1 和 AgA2 键合合金线进行热导率测试可知,AgA1 键合合金线导热率为 403 W/m·K, AgA2 键合合金线导热率为 385 W/m·K, Ru 使 Ag-4Pd 键合合金线导热率降低了 5%。在 EFO 过程中,通过高压放电将一定长度(0.1~0.2 mm)键合合金线熔融,在表面张力作用下成球,对于 AgA1 键合合金线,导热率较高,其 FAB 局部区域凝固速率高于 AgA2 键合合金线,从而导致 FAB 形状呈不规则形状。

图 5 为 AgA1 键合合金线球焊点形貌。由图可知,AgA1 键合合金线球焊点颈部存在微小裂纹。由于

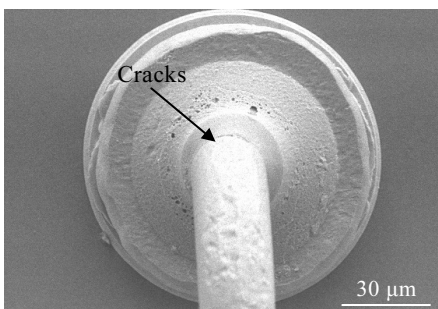


图 5 AgA1 键合合金线球焊点颈部微裂纹形貌
Fig.5 Neck crack of FAB of AgA1 alloy bonding wire

AgA1 键合合金线再结晶温度低,热影响区长度约为 50 μm,如图 6a 所示。对于 AgA2 键合合金线,Ru 元素的加入,提高了键合合金线的再结晶温度,降低了 FAB 球的热影响区长度,热影响区长度约为 35 μm,热影响区长度降低了约 30%,如图 6b 所示。引线键合过程中,球焊点颈部需要反复大变形来完成焊线的成拱,而过长的热影响区使得 AgA1 键合合金线颈部力学性能降低,在超声、压力和温度等复合场的作用下,使球焊点颈部产生严重应力集中并伴有滑移产生,如图 7 所示,进而引起微裂纹,降低了球焊点拉力,使得 AgA1 键合合金线球拉力低于 AgA2 键合合金线。

此外,器件经过冷热冲击试验后,球焊点颈部的裂纹在反复冷热冲击条件下会扩展,微裂纹的扩展将使电阻值增加,进而产生局部过热,在大电流作用下使得焊点颈部发黑,如图 8 所示,最终引起短路,产生死灯现象。对于 AgA2 键合合金线,其 FAB 球的热影响区长度较短,FAB 颈部具有优良的力学性能,避免了球焊点颈部裂纹的产生,使得球焊点拉力较为稳定,消除了器件冷热冲击后出现的死灯现象。

2.2 Ag-4Pd 键合合金线性能对楔焊点键合强度的影响

图 9 为 BSOB 键合方式下楔焊点拉力统计分析。

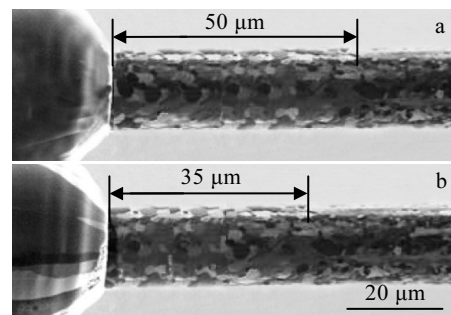


图 6 Ag-4Pd 键合合金线热影响区长度
Fig.6 Heat affected zone length of Ag-4Pd alloy bonding wire:
(a) AgA1 and (b) AgA2

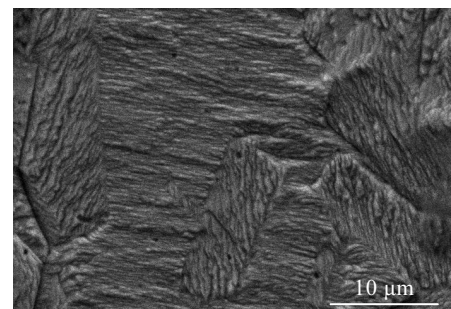


图 7 AgA1 键合合金线颈部变形后组织结构
Fig.7 Microstructure of neck of AgA1 alloy bonding wire after deforming

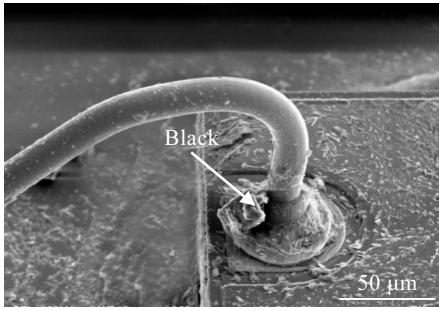


图 8 球焊裂纹导致的焊点颈部发黑

Fig.8 Black neck caused by ball neck crack

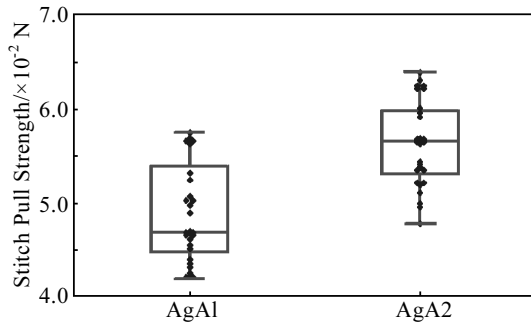


图 9 AgA1、AgA2 键合金线楔焊点拉力统计分析

Fig.9 Stitch pull strength analyses of AgA1, AgA2 alloy bonding wire

由图可知, AgA1 键合金线楔焊点拉力分布范围较大且略低于 AgA2 键合金线楔焊点拉力。

对于 AgA1 键合金线, 由于其导热率较高, 使得 FAB 形状不完全规则, 在 BSOB 键合方式下, 其形成的圆形焊盘形状存在凸起, 导致楔焊点线材与焊盘接触面不均匀, 如图 10 所示, 进而导致拉力波动范围较大。此外, AgA1 键合金线楔焊点拉力较低时, 器件经过冷热冲击试验后, 颈部连接薄弱点在反复热冲击应力条件下产生裂纹, 甚至出现楔焊点颈部断裂

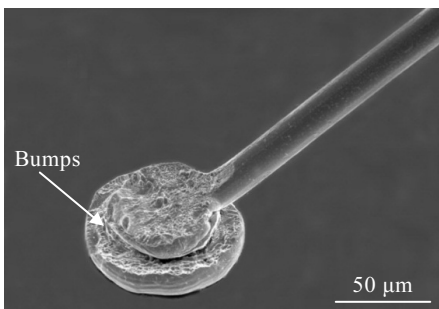


图 10 BSOB 键合方式下受损的楔焊点形貌

Fig.10 Defect bonded morphology in BSOB model

现象, 如图 11 所示, 从而导致器件失效。

2.3 Ag-4Pd 键合金线组织对球焊点键合强度的影响

图 12~15 是键合金线组织对键合强度的影响。由图 12 可知, AgA2 键合金线晶粒尺寸基本一致, 其球焊点形状规则圆整, 如图 13 所示; AgA1 键合金线, 其晶粒尺寸不均匀, 存在部分大晶粒, 如图 14 所示, 晶粒尺寸差异较大, 其球焊点呈不规则形状, 有部分“耳朵”突出, 如图 15 所示; 在高密度、窄间距

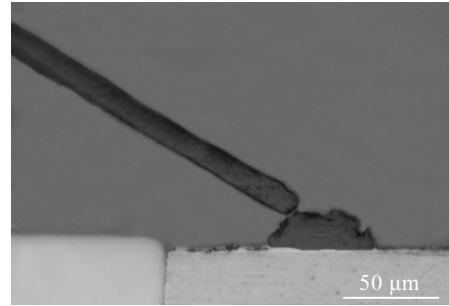


图 11 冷热冲击试验后楔焊点颈部断裂

Fig.11 Wedge bonded neck crack after thermal shock test

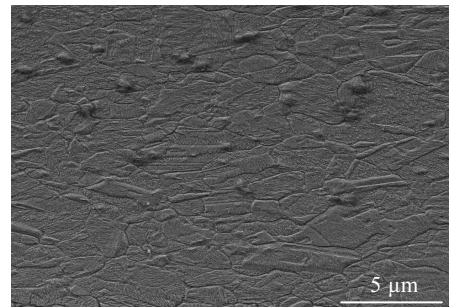


图 12 晶粒尺寸均匀的 AgA2 键合金线组织

Fig.12 Microstructure of AgA2 alloy bonding wire with uniform grain size

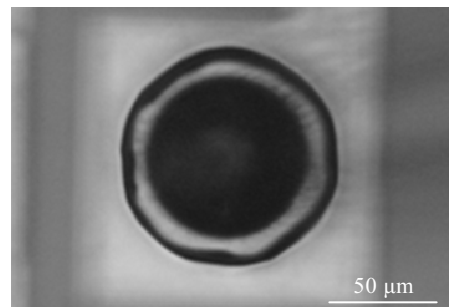


图 13 AgA2 键合金线形状均匀的球焊点形貌

Fig.13 Uniformly bonded FAB morphology for AgA2 alloy bonding wire

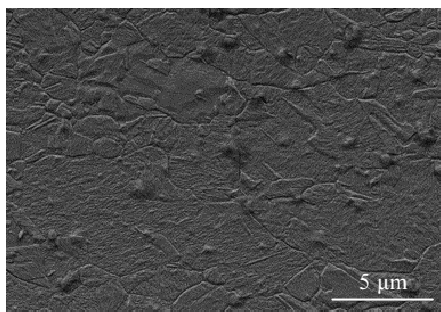


图 14 晶粒尺寸不均匀的 AgA1 键合合金线组织

Fig.14 Microstructure of AgA1 alloy bonding wire with non-uniform grain size



图 15 AgA1 键合合金线形状不均匀的球焊点形貌

Fig.15 Non-uniform bonded FAB morphology for AgA1 alloy bonding wire

封装中, 由于基板的面积小, 这种球焊点形状不规则的缺陷将使焊点溢出基板, 引起器件短路。

对于 AgA1 键合合金线, 其晶粒尺寸不均匀, 各个晶粒的取向不同, 不同晶体学方向上的弹性模量存在差异, 不同取向晶体的应力-应变曲线也将不同。焊线键合就是在超声、压力及温度等复合场中使键合合金线产生形变并达到与基板金属原子间的结合, 由于 AgA1 键合合金线存在粗大晶粒, 在键合过程中, 粗大晶粒将沿着较易变形的方向形变, 进而导致形变不均匀, 产生不规则的球焊点形状。AgA2 键合合金线, Ru 的加入起到了细化晶粒的作用, 使得 AgA2 键合合金线晶粒尺寸均匀, 没有粗大晶粒, 同体积条件下的金属晶粒个数较多, 尽管每个晶粒的取向不同, 但形变时的协同作用较明显, 进而降低了形变的不均匀性程度, 形变时同样的形变量可分散到更多的晶粒中, 从而产生较均匀的形变, 使得球焊点形状较规则, 提高了球焊点的连接强度。

3 结论

1) Ru 元素的加入使 Ag-4Pd 键合合金线热导率由

403 W/m·K 降低到 385 W/m·K, 低导热率有利于降低 Ag-4Pd 键合合金线 FAB 缺陷。

2) Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线热影响区长度较 Ag-4Pd 键合合金线缩短约 30%, 消除了由于热影响区长度过大导致的颈部微裂纹缺陷, 具有较好的颈部连接强度。

3) BSOB 键合方式下, Ag-4Pd 键合合金线 FAB 形状不规则引起焊盘表面凸起, 使其楔焊点连接强度低于 Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线。

4) Ag-4Pd 键合合金线中, 微量元素 Ru 的加入, 细化了晶粒, 相同体积内的不同取向的金属晶粒数目增加, 增强了变形时的协同作用, 形变时同样的形变量被分散到更多的晶粒中, 从而产生较均匀的形变, 在相同工艺条件下, 使 Ag-4Pd-0.5Ru 键合合金线球焊点形状较 Ag-4Pd 键合合金线均匀。

参考文献 References

- [1] Liu P, Tong L, Wang J *et al. Microelectronics Reliability*[J], 2012, 52(6): 1092
- [2] Uno T. *Microelectronics Reliability*[J], 2011, 51(1): 88
- [3] Hsueh H W, Hung F Y, Lui T S *et al. Microelectronic Reliability*[J], 2014, 54(11): 2564
- [4] Ramos A S, Vieira M T. *Intermetallics*[J], 2012, 25(3): 70
- [5] Cao Jun(曹 军), Fan Junling(范俊玲), Xue Tonglong(薛铜龙). *Materials Science and Technology(材料科学与工艺)*[J], 2014, 22(5): 48
- [6] Kumar S, Heo Y, Kim S *et al. IEEE Electronics Packaging Technology Conference*[C]. Singapore: IEEE, Computer Society, 2013: 15
- [7] Zeng Y Z, Ke W B, Hong M J. *Microelectronics Reliability*[J], 2013, 53(7): 985
- [8] Tseng Y W, Hung F Y, Lui T S. *Microelectronics Reliability*[J], 2015, 55(3): 608
- [9] Hang C J, Tian H Y, Wang C Q *et al. Transactions of the China Welding Institution*[J], 2013, 34(2): 13
- [10] Breach C D, Wulff F, Tok C W. *Microelectronics Reliability* [J], 2006, 46(1): 543
- [11] Lia B H, Yea J T, Liao J K *et al. Journal of Dentistry*[J], 2014, 42(3): 319
- [12] Li J H, Liu L G, Ma B K *et al. IEEE Electron Device Letters* [J], 2011, 32(12): 1731
- [13] Zhong Z W, Ho H M, Tan Y C *et al. Microelectronic Engineering*[J], 2007, 84(2): 368
- [14] Chuang T H, Wang H C, Tsai C H *et al. Scripta Materialia*[J], 2012, 67(6): 605

- [15] Guo R, Hang T, Mao D *et al. Journal of Alloys & Compounds* [J], 2014, 588(9):622
- [16] Tseng Y W, Hung F Y, Lui T S *et al. Microelectronics Reliability*[J], 2015, 55(8): 1256

Effects of Properties and Structure of Ag-4Pd Alloy Bonding Wire on Bonding Strength

Cao Jun¹, Fan Junling², Gao Wenbin¹

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

(2. Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The difference of properties and structure between Ag-4Pd and Ag-4Pd-0.5Ru alloy bonding wires were analyzed by scanning electron microscope, strength tester and thermal conductivity tester. The effects of Ru on ball size, bonded morphology and bonding strength of Ag-4Pd alloy bonding wire were investigated. The results show that Ru doping decreases the thermal conductivity of Ag-4Pd alloy bonding wire from 403 W/m·K to 385 W/m·K, makes the free air ball shape more regular, and increases the bonding strength. In addition, Ru doping also decreases the heat affect zone length from 50 to 35 μm , and eliminates the ball neck crack defect caused by excessively long heat affect zone. Besides, Ru can refine the grains of Ag-4Pd alloy bonding wire, cause more metal grains of different orientations within the same volume, and improve the synergistic effect and uniformity of deformation; as a result, we obtain more regular ball bonded shape.

Key words: Ag-4Pd alloy bonding wire; Ru; morphology; structure; strength

Corresponding author: Cao Jun, Ph. D., School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, P. R. China, Tel: 0086-391-3987541, E-mail: cavan@hpu.edu.cn