

# 等离子清洗对 Cu/Al 引线键合焊点表面状态和力学性能的影响

李晓<sup>1</sup>, 杜亚红<sup>2</sup>, 高丽茵<sup>1</sup>, 袁晓虹<sup>3</sup>, 周文艳<sup>3</sup>, 康菲菲<sup>3</sup>, 刘志权<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳, 518055; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳, 110016;  
3. 云南省贵金属新材料控股集团股份有限公司, 昆明, 650106)

**摘要:** 等离子清洗作为一种前处理工艺广泛应用在引线键合、铜—铜键合和混合键合等半导体领域, 基于微观表征、统计分析和性能测试等方法研究了等离子清洗对引线键合焊点表面状态和力学性能的影响, 结果发现经过处理后, 焊盘表面水滴接触角由 96°降低至 12.6°, 每个焊盘表面平均污染颗粒数量由  $18.7 \pm 9.9$  个下降至  $3.7 \pm 1.6$  个, 平均剪切力由  $165.6 \pm 5.9$  mN 提升至  $179.3 \pm 3.9$  mN。另外随着处理时间的适当延长可以提高焊球剪切力和稳定性, 对经过 3 次回流 + 高温存储测试后失效的焊点(试验前未进行等离子处理)进行分析, 发现裂纹萌生于铝焊盘和铜焊球界面处, 裂纹沿着 CuAl<sub>2</sub> 界面拓展并导致键合失效, 分析原因是焊盘表面有机污染促进了界面处柯肯达尔空洞的形成, 进而在热机械应力的影响下形成裂纹并失效。结果表明, 等离子清洗可以有效提高焊盘表面清洁度并提升键合可靠性, 可在引线键合工艺中优化推广。

**创新点:** (1) 使用统计分析的方法给出了等离子处理对焊盘表面污染颗粒数量和键合强度的影响规律。

(2) 分析了未经等离子清洗处理的多次回流键合失效焊点, 并解认了相关失效模式和失效机理。

**关键词:** 引线键合; 等离子清洗; 表面污染; 剪切力; 失效分析

**中图分类号:** TG 442      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231020002

## Influence of plasma cleaning on the surface state and mechanical properties of Cu/Al wire bonding joint

LI Xiao<sup>1</sup>, DU Yahong<sup>2</sup>, GAO Liyin<sup>1</sup>, YUAN Xiaohong<sup>3</sup>, ZHOU Wenyan<sup>3</sup>,  
KANG Feifei<sup>3</sup>, LIU Zhiqian<sup>1,2</sup>

(1. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, 518055, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China; 3. Sino-Platinum Metals Co., LTD., Kunming, 650106, China)

**Abstract:** As a pretreatment process, plasma cleaning is widely used in semiconductor industry such as wire bonding, copper-to-copper bonding and hybrid bonding. The effects of plasma cleaning on the surface state and mechanical properties of Cu/Al wire bonding joints were studied by microscopic characterization, statistical analysis and performance testing. The results showed that after plasma treatment, the contact angle of water droplets on the pad surface decreased from 96° to 12.6°, the average number of contaminated particles on each pad surface decreased from  $18.7 \pm 9.9$  to  $3.7 \pm 1.6$ , and the average shear force increased from  $165.6 \pm 5.9$  to  $179.3 \pm 3.9$  mN. In addition, it is found that the shear force and stability of the welding ball can be improved with the proper extension of the processing time. The bonding joints that failed after three times reflow and high temperature storage tests (without plasma treatment before the experiment) were analyzed. It was found that the crack originated at the interface of aluminum pad and copper ball, and it expanded along the CuAl<sub>2</sub> interface and led to bonding failure. The reason for the failure may be that the organic pollution on the surface of the pad promotes the formation of Kirkendall void, and then cracks are formed and the

failure occurs under the influence of thermal mechanical stress. It is concluded that plasma cleaning can effectively improve the surface cleanliness of the pad and improve the bonding reliability.

**Highlights:** (1) Statistical analysis was used to clarify the influence of plasma cleaning treatment on the number of contaminated particles on the pad surface and shear force of bonding joint.

(2) Failure analysis was carried out on the multiple reflow and high-temperature storage bonding joints without plasma cleaning treatment to clarify the failure mode and failure mechanism.

**Key words:** wire bonding; plasma cleaning; surface contamination; shear force; failure analysis

## 0 序言

在集成电路或 LED 的封装领域中, 引线键合作为一种成熟的金属互连技术占据着重要的市场地位, 这是一种使用细金属线作为键合丝, 利用热量、压力和超声波能量使键合丝与焊盘紧密焊合, 实现芯片与基板间的电气互连和芯片间的信号传递<sup>[1]</sup>。随着电子封装的集成化和高性能化发展, 键合丝的线径、焊盘尺寸和引线间距逐渐缩小, 这导致键合焊点处所受热应力、机械应力和电应力程度急剧增加, 从而引发一系列服役可靠性问题。在多种引线键合失效模式中, 较为常见是由于热失配引起的循环拉力或剪切力导致的键合界面断裂, 因此提高键合丝与焊盘间的结合力是提升引线键合服役可靠性的关键<sup>[2]</sup>。

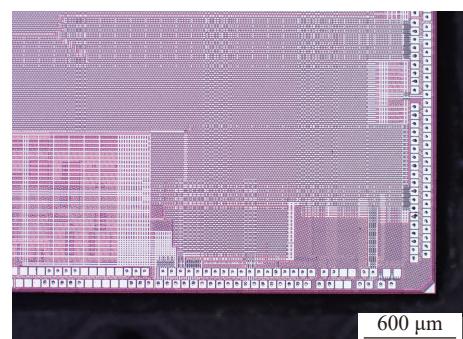
研究发现除了键合丝材料和键合工艺参数等对键合界面结合力有影响以外, 键合时焊盘表面的清洁度也起到至关重要的作用<sup>[3-5]</sup>。在焊接过程中, 键合丝熔化形成空气自由球 (free air ball, FAB) 并与焊盘表面接触形成金属间化合物 (intermetallic compound, IMC), 从而形成有效和可靠的键合点。如果焊盘表面发生氧化或存在污染颗粒, 则会阻碍焊球和焊盘间的原子扩散, 从而降低键合强度甚至形成虚焊和脱焊焊点<sup>[6]</sup>。

实际生产中为了在键合时得到清洁的表面, 一般会对焊盘进行清洗处理, 等离子清洗作为干法清洗中的一种, 因具有环保、高效和无损伤等优点, 逐渐在工业中得到大范围应用。以往的研究集中在等离子清洗工艺参数对推球测试的影响等方面, 但是对焊盘表面微颗粒的清洁能力仅停留在主观判断上, 缺乏大量统计数据的支持<sup>[7-9]</sup>, 另外, 对于由表面微颗粒所引起的键合失效缺乏相应的表征和机理解释。文中针对 IC 芯片引线键合结构, 分析了等离子处理对焊盘表面污染颗粒的清洁效果以及对键

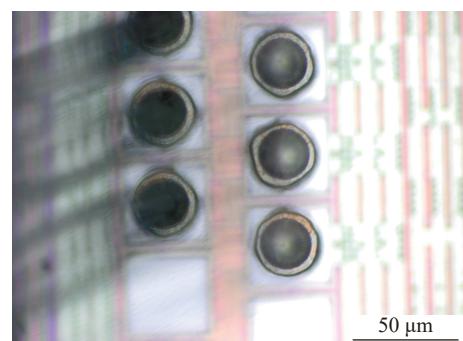
合界面结合力的影响, 同时对由表面微颗粒所引起的键合失效焊点进行了失效分析, 为等离子清洗工艺的发展提供技术参考。

## 1 试验方法

试验样品表面分布有尺寸为  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  的铝焊盘, 使用线径为  $20 \mu\text{m}$  的镀钯铜键合丝进行键合试验, 键合后形貌如图 1 所示。等离子清洗设备的型号为 VPC-500F8, 所用气体和流量分别为氩气和  $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ 。为了研究等离子清洗对引线键合效果的影响, 试验时将样品分为 A ~ E 共 5 组, 其中 A 组未进行等离子处理直接键合, 另外 4 组分别实施不同的等离子清洗功率和处理时间, 具体参数



(a) 样品宏观图像



(b) 样品键合点局部图像

图 1 试验样品图像

Fig. 1 Images of the experimental sample. (a) macroscopic image of sample; (b) bonding point image

见表 1. 等离子清洗前后使用 OCA50 接触角测试仪, 进行水滴接触角试验以观察焊盘表面亲水性变化, 使用 VK-X1100 激光共聚焦显微镜来检测焊盘表面污染颗粒的尺寸和数量, 其中每组样品数量为 8 个, 引线键合完成后使用 Dage4000 设备对键合焊点进行剪切力试验, 每组样品剪切数量为 30 个.

表 1 等离子清洗参数表  
Table 1 Plasma cleaning parameters

分组	功率 $P/W$	处理时间 $t/s$
A组	0	0
B组	300	25
C组	400	25
D组	300	50
E组	400	50

选取未进行等离子处理的键合焊点样品进行 3 次回流试验和高温存储 (24 h, 125 °C) 试验, 试验后通过四探针检测键合界面接触电阻以甄别失效样品并进行分析. 首先对失效样品进行金相制备, 然后使用 Helios 5 UX 聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 在键合丝和焊盘界面进行薄片加工, 最后使用 JEM-F200 透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对界面进行高分辨微观组织表征.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 等离子清洗对焊盘表面和键合强度的影响

未处理和处理后焊盘表面的水滴接触角, 如图 2 所示, 计算得到接触角分别为 96° 和 12.6°. 等离子处理后接触角减小了 86.9%, 结果表明等离子清洗可以有效提高键合表面的亲水性并降低焊盘表面张力, 这有利于 FAB 的铺展并形成良好的键合界面. 研究表明清洗过程中高能粒子在物理轰击作用或化学反应作用下, 可以有效清除样品表面的氧化层, 从而暴露出洁净的铝原子表面<sup>[10]</sup>. Lin<sup>[11]</sup>通过 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 分析等离子处理后焊盘表面元素分布的变化, 结果显示处理前表面含有 CuO<sub>2</sub>, CuO 和 NiO 等污染物, 而处理后 C, O 和 Cu 等杂质元素的含量显著减少. 除此以外, 等离子处理还可以改变表面官能团状态, 从而提高键合表面自由能; Peng 等人<sup>[7]</sup> 使用 XPS 分别对施加不同等离子频率处理的焊盘进行分析并计算了其表面自由能,

发现相比于处理前表面自由能分别上升了 210.1% 和 228.8%; Yang 等人<sup>[12]</sup> 认为表面自由能受到焊盘表面的极性分子的显著影响, 发现经过等离子处理后形成高极性化学基团, 如 C = C/O 和 C-OH 键, 这有利于提升键合界面粘附性.

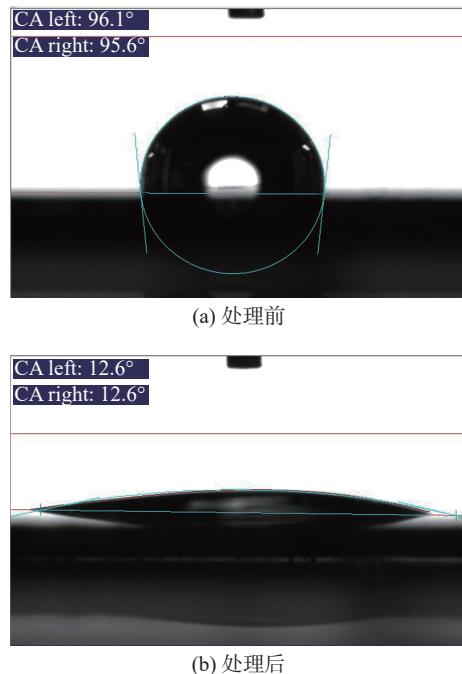


图 2 等离子处理前后接触角  
Fig. 2 Contact angle before and after plasma cleaning.  
(a) before processing; (b) after processing

对未处理和处理后焊盘表面污染颗粒进行观察, 如图 3 所示, 等离子处理前后污染颗粒和剪切力统计, 如图 4 所示. 从图 3(a) 可以看出, 未经过等离子清洗的焊盘表面分布大量白色颗粒状污染物, 平均粒径约为 0.5 μm. 在经过等离子清洗后, 焊盘表面颗粒状污染物数量明显减少见图 3(b). 为了得到准确的颗粒状污染物数量分布数据, 对每组所有样品进行测试并统计分析见图 4(a), 结果显示未处理和处理后每个焊盘表面平均污染颗粒数量分别为  $18.7 \pm 9.9$  和  $3.7 \pm 1.6$  个, 即处理后污染颗粒数量下降了 80%, 这表明等离子清洗可以有效减少焊盘表面污染颗粒数量. 焊盘表面的颗粒污染可能来自于焊盘制备或塑封过程中引入的胶体残留, 也可能来自于烘烤过程中产生的挥发性气体沉积<sup>[13]</sup>. 另外, 产线的空气中漂浮的灰尘也可能是污染物来源, 等离子处理过程中高能 Ar<sup>+</sup> 在溅射作用下, 可以将这些固体颗粒分解为 CO<sub>2</sub>, CO 和 H<sub>2</sub>O 等气体, 然后被真空泵抽离焊盘表面.

为了研究等离子清洗对焊点剪切力的影响, 对未处理和处理后键合点进行焊球剪切测试, 统计结

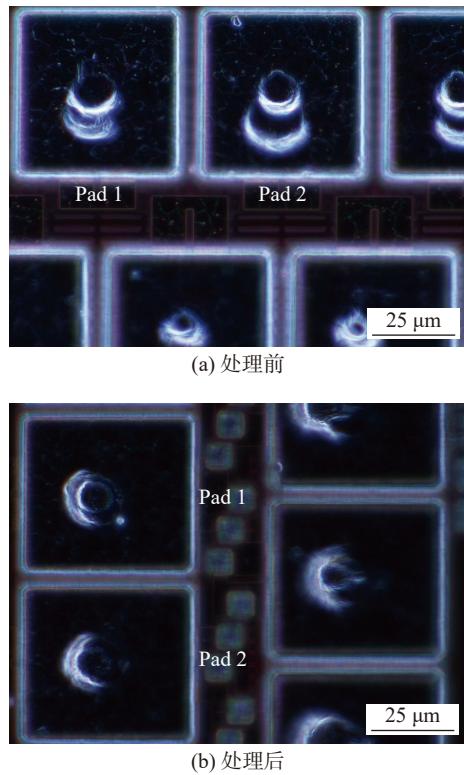


图 3 等离子处理前后焊盘表面污染颗粒

Fig. 3 Contaminated particles on pad surface before and after plasma processing. (a) before processing; (b) after processing

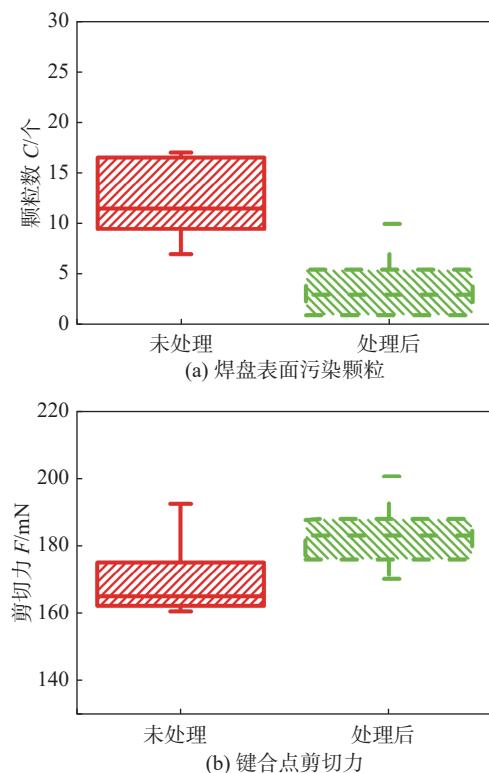


图 4 等离子处理前后污染颗粒和剪切力统计

Fig. 4 Statistics of contaminant particles and shear force before and after plasma treatment. (a) contaminant particles; (b) shear force

果见图 4(b), 平均剪切力分别为  $165.6 \pm 5.9$  和  $179.3 \pm 3.9$  mN, 表明等离子清洗处理后焊球剪切力和稳定性均有所提升。结合接触角和污染颗粒统计结果可以推测, 焊球剪切力的提升得益于界面表面张力的减小和污染颗粒数量的下降。研究表明焊接强度受到界面接触面积和界面 IMC 厚度(或互扩散层厚度)的影响<sup>[14]</sup>, 一方面表面张力的作用导致界面接触面积减小, 另一方面污染颗粒和氧化膜的存在会吸收键合时由加热和超声提供的能量, 从而降低界面 IMC 的厚度(或互扩散层厚度), 使焊接界面结合强度下降<sup>[15]</sup>。

## 2.2 等离子清洗参数对键合强度的影响

对不同参数等离子清洗后的样品(B-E 组)进行焊球剪切力测试, 统计结果如图 5 所示。B-E 组的测试结果分别为  $167.6 \pm 11.8$ 、 $164.6 \pm 11.8$ 、 $174.4 \pm 8.8$  和  $171.5 \pm 12.7$  mN。对比 4 组结果可以看出当功率从 300 W 提升至 400 W 后, 对键合点剪切力的影响较小。但当处理时间由 25 s 提高至 50 s 后, 剪切力分别提升了约 4%。结果表明, 300 W 功率足以提供有效的清洁能力, 而适当增加处理时间可以更加彻底地清除表面污染, 最终提高了键合界面结合力。李翔等人<sup>[8]</sup>研究表明, 提高功率可以促使更多的氩气转变为等离子体, 同时也能提高  $\text{Ar}^+$  的动能, 从而增强等离子清洗的效果, 但并非意味着功率越高越好, 因为  $\text{Ar}^+$  的溅射同时也作用在焊盘金属表面, 溅射效果过强可能导致焊盘损伤<sup>[16]</sup>; Berman 等人<sup>[17]</sup>通过扫描隧道显微镜研究了氩气和氧气等离子处理对金电极表面粗糙度的影响, 发现氩等离子体使电极表面产生塑性变形从而使粗糙度显著提升, 而氧等离子体则相对较弱。同理处理时间过短会导致清洗效果不佳, 而处理时

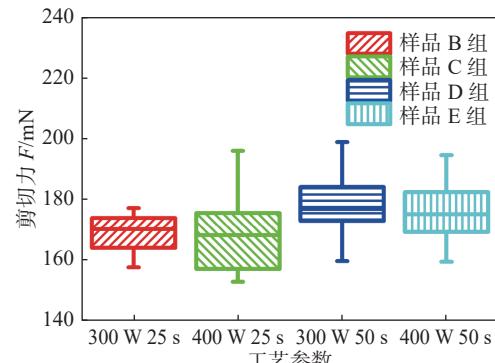


图 5 不同工艺参数下键合点剪切力统计

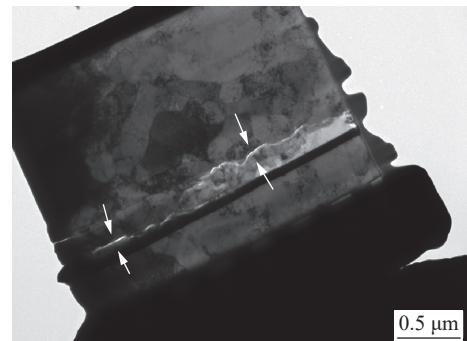
Fig. 5 Statistics of shear force at bonding point under different plasma cleaning parameters

间过长也会导致焊盘损伤; Peng 等人<sup>[18]</sup>研究表明当使用氧气进行等离子清洗时, 可以更有效地提高有机物清洁效果, 但处理时间过长则有导致焊盘二次氧化的风险, 因此一个合适的等离子清洗工艺参数组合对于清洗效果和键合质量十分重要。

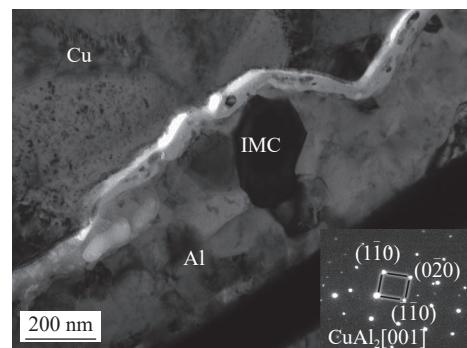
### 2.3 未进行等离子清洗的键合样品的失效分析

经过 3 次回流 + 高温存储试验后失效的焊点(试验前未进行等离子处理)截面图像和 FIB 切片图像, 如图 6 所示。四探针电性能测试经过老化试验后键合点接触电阻提升了 50%, 证明此焊点已失效。从图 6(a)标记的箭头处可以看出, 在失效样品的键合界面处存在一条裂纹, 图 6(b)为裂纹萌生位置的高倍图像, 可以看出裂纹萌生于铝焊盘和铜线界面处, 裂纹下方铝焊盘内有少量多边形 IMC 颗粒。由于 IMC 层分布的不均匀性, 裂纹穿过 IMC 层延伸至 IMC 和铜焊点之间的界面, 对 IMC 进行高倍观察并使用选区电子衍射技术对 IMC 物相进行标定见图 6(b), 显示 IMC 成分为 CuAl<sub>2</sub>, 并以纳米级等轴晶的形式存在。键合界面处有污染颗粒或氧化层存在的情况下会导致界面接触电阻显著上升, 引起局部发热增加, 从而促进 Cu/Al 界面处的原子互扩散进程<sup>[18]</sup>。另一方面, 污染颗粒或杂质原子引起的晶体缺陷可以作为原子扩散的快速通道, 导致 Cu/Al 界面处的原子互扩散进程加剧。研究表明界面处原子适当的互扩散过程有利于形成 IMC 并增加界面结合力, 但过度的互扩散过程反而会导致键合界面脆性增加, 甚至形成柯肯达尔空洞<sup>[19]</sup>。Papadopoulos 等人<sup>[20]</sup>研究了等离子清洗对键合金丝焊接可靠性的影响, 试验发现处理前样品仅能通过 150 °C 高温存储试验 (AEC-Q100 标准), 而处理后的样品可以通过 250 °C 高温存储试验考核, 同时拉力测试结果的稳定性也同步提高。这是由于污染和水分导致的潜在腐蚀, 或 IMC 覆盖范围较弱导致 IMC 生长和空洞驱动的机制引起的。

在进行多次回流 + 高温存储试验过程中, 样品会因热膨胀系数不匹配受到循环拉应力和剪切应力。在此作用下焊点会在其薄弱部位萌生裂纹和拓展, 从而导致断裂失效发生。结合试验结果和上述分析, 推断初始裂纹的萌生是由于热力学应力集中在位于铝焊盘内部或铝焊盘和 IMC 界面处的柯肯达尔空洞导致, 接着裂纹沿着相对较脆的 IMC 拓展, 最终延伸到 IMC 和铜线焊点之间的界面处。



(a) 样品失效点的切片



(b) 样品裂纹局部图像及 IMC 衍射花样

图 6 失效样品的 TEM

Fig. 6 TEM of the failure sample. (a) failure position; (b) local crack and IMC diffraction pattern

## 3 结论

(1) 使用统计的方法研究了等离子清洗对焊盘表面污染颗粒数量的影响, 发现经等离子处理后每个焊盘表面平均污染颗粒数量由  $18.7 \pm 9.9$  个下降至  $3.7 \pm 1.6$  个, 同时键合焊点剪切力由  $165.6 \pm 5.9$  mN 提升至  $179.3 \pm 3.9$  mN, 这些数据表明等离子清洗可以有效减少焊盘表面污染颗粒数量并提升键合强度。

(2) 对等离子清洗功率和处理时间进行研究, 发现当处理时间从 25 s 提高至 50 s 后, 不同功率下键合焊点的剪切力分别提升了 4%。

(3) 对经过 3 次回流 + 高温存储测试后失效的焊点(试验前未进行等离子处理)进行分析, 发现裂纹萌生于铝焊盘和铜焊球界面处, 随后裂纹拓展并导致失效, 失效的原因是由于焊盘表面有机污染促进了界面处柯肯达尔空洞的形成, 进而在服役过程中受应力的影响形成裂纹并失效。

## 参考文献

- [1] 莫德锋, 杨力怡, 张晶琳, 等. 钯金丝超声键合正交试验及焊点

- 质量评价 [J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 39 – 42.
- Mo Defeng, Yang Liyi, Zhang Jinglin, et al. Orthogonal test and quality evaluation of platinum wire ultrasonic bonding[J]. Transactions of the China Welding, 2013, 34(9): 39 – 42.
- [2] Xu K F, Zhang W X, Luo J, et al. Evolution mechanism of interfacial multi-layer intermetallic compounds and failure behavior in the Al–Au wire bonding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 2843 – 2856.
- [3] 王福亮, 李军辉, 韩雷, 等. 键合时间对粗铝丝超声引线键合强度的影响 [J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 47 – 51.
- Wang Fuliang, Li Junhui, Han Lei, et al. Effect of bonding time on thick aluminum wire wedge bonding strength[J]. Transactions of the China Welding, 2006, 27(5): 47 – 51.
- [4] 王权, 丁建宁, 薛伟, 等. 硅芯片外引线键合的热压焊装置及焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 61 – 64.
- Wang Quan, Ding Jianning, Xue Wei, et al. A novel instrument of silicon chip thermocompression outer wire bonding and jointing process research[J]. Transactions of the China Welding, 2006, 27(5): 61 – 64.
- [5] Bieliszcuk K, Zreda J, Chmielewski T M. Influence of cylindrical cells surface cleaning by means of laser ablation on wedge wire bonding process[J]. *Coatings*, 2024, 14(4): 445 – 465.
- [6] 马斌, 程丕俊, 师筱娜, 等. 等离子清洗在 LED 封装工艺中的应用 [J]. 电子工业专用设备, 2012, 41(1): 23 – 26.
- Ma Bin, Cheng Pijun, Shi Xiaona, et al. Plasma cleaning process in the application of LED package[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2012, 41(1): 23 – 26.
- [7] Peng H Y, Devarajan M, Lee T T, et al. Comparison of radio frequency and microwave plasma treatments on LED chip bond pad for wire bond application[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5: 562 – 569.
- [8] 李翔, 崔卫兵, 张进兵. 浅析多次等离子清洗对引线键合质量可靠性的影响 [J]. 中国集成电路, 2022, 31(10): 85 – 89.
- Li Xiang, Cui Weibing, Zhang Jinbing. Effect of plasma cleaning times on wire bonding quality reliability[J]. China Integrated Circuit, 2022, 31(10): 85 – 89.
- [9] 罗红媛, 蔡成德, 黄信章. 等离子清洗对引线键合质量可靠性的影响 [J]. 电子工艺技术, 2012, 33(1): 26 – 30.
- Luo Hongyuan, Cai Chengde, Huang Xinzhang. Impact of plasma cleaning on reliability of wire bonding[J]. Electronics Process Technology, 2012, 33(1): 26 – 30.
- [10] Lin Y, Li H, Wang Q, et al. Effect of plasma surface treatment of aluminum alloy sheet on the properties of Al/Gf/PP laminates[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 507: 145062 – 145070.
- [11] Lin Y S. A surface analysis on oxygen plasma-cleaned gold pattern-plated substrates for wire bondability[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 173: 47 – 57.
- [12] Yang X M, Zhong Z W, Diallo E M, et al. Silicon wafer wettability and aging behaviors: impact on gold thin-film morphology[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, 26: 25 – 32.
- [13] Chong Y F, Gopalakrishnan R, Tsang C F, et al. Chemical and morphological studies of plasma-treated integrated circuit bond pads[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, 30(3): 275 – 282.
- [14] Zhou H L, Chang A D, Fan J L, et al. Copper wire bonding: a review[J]. *Micromachines*, 2023, 14: 1612 – 1629.
- [15] Chan Y H, Kim J K, Liu D, et al. Effect of plasma treatment of Au–Ni–Cu bond pads on process windows of Au wire bonding[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2005, 28: 674 – 684.
- [16] 李丙旺, 李苏苏, 李彪. 粘片过程中引线粘污及其处理工艺技术 [J]. 电子与封装, 2019, 19(8): 1 – 4.
- Li Bingwang, Li Susu, Li Biao. Contamination and cleaning technology in die bonding process[J]. Electronics & Packaging, 2019, 19(8): 1 – 4.
- [17] Berman D, Krim J. Impact of oxygen and argon plasma exposure on the roughness of gold film surfaces[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520: 6201 – 6206.
- [18] Peng H Y, Devarajan M. Investigation of oxygen followed by argon plasma treatment on LED chip bond pad for wire bond application[J]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2015, 27(4): 129 – 136.
- [19] Zhou Shiqi, Zhang Yubo, Gao Liyin, et al. The self-healing of Kirkendall voids on the interface between Sn and (111) oriented nanotwinned Cu under thermal aging[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 588: 152900 – 152910.
- [20] Papadopoulos C, Villiger T, Steiner S, et al. Gold wire bond study for automotive application[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 114: 113899 – 113904.

第一作者: 李晓, 硕士, 工程师; 主要研究方向为电子封装金属互连材料及可靠性; Email: [zhiquanliu70@163.com](mailto:zhiquanliu70@163.com).

通信作者: 刘志权, 博士, 研究员; Email: [zqliu@siat.ac.cn](mailto:zqliu@siat.ac.cn).

(编辑: 刘启明)