

文章编号: 1672-8785(2025)07-0032-09

铟氧化物对倒装互连质量的影响及去除方法研究

王 慧* 冯晓宇 欧阳甜 马腾达

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 倒装互连技术中使用的铟凸点(即铟球)是一种在半导体封装中用于实现芯片与基板之间电气连接的材料。铟柱湿法缩球后放置时间过长会导致铟球表面生成氧化物, 可使用金相显微镜快速识别铟氧化物。分析讨论了铟氧化物的存在对倒装互连压力和导通率的影响, 提出采用湿法和干法去除氧化物。对去除方法参数进行了定量研究, 并对去除效果进行了测试分析, 使得研究结论更加全面、完善。结果表明, 采用该方法去除氧化物的电路倒装互连后探测器具有较稳定的性能, 为制备高质量、高可靠性的探测器打好基础。

关键词: 铟球; 氧化物; 倒装互连; 湿法清洗; 干法清洗

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.07.005

Study on the Influence of Indium Oxide on Flip-Chip Interconnect Quality and Its Removal Method

WANG Hui*, FENG Xiao-yu, OUYANG Tian, MA Teng-da

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Indium bumps (i.e. indium balls) used in flip-chip interconnection technology are a material used to achieve electrical connection between chips and substrates in semiconductor packaging. If the indium columns are left for too long after wet shrinkage, oxides will form on the surface of the indium balls. Indium oxides can be quickly identified using a metallographic microscope. The influence of the presence of indium oxides on the pressure and conductivity of flip-chip interconnection is analyzed and discussed, and wet and dry methods are proposed to remove oxides. The parameters of the removal method are quantitatively studied, and the removal effect is tested and analyzed, making the research conclusions more comprehensive and complete. The results show that the detectors after flip-chip interconnection of the circuit with oxides removed by this method have relatively stable performance, laying a good foundation for the preparation of high-quality and high-reliability detectors.

Key words: indium ball; oxides; flip-chip interconnection; wet cleaning; dry cleaning

收稿日期: 2024-10-20

作者简介: 王慧(1995-), 女, 山西朔州人, 硕士, 主要从事焦平面探测器倒装互连、底部填充等工艺设计及研究。

*通讯作者: E-mail: wh19800356080@163.com

0 引言

随着焦平面探测器向便携化、小型化、高性能方向发展,倒装互连技术成为先进封装的关键技术^[1-2]。倒装互连的本质是用凸点代替引线来实现芯片与读出电路的高精度键合,可实现极高功能密度集成,降低系统体积、重量、功耗等^[3]。在倒装互连过程中,钢柱作为媒介连接芯片和读出电路,承受着由温度循环、机械应力和材料特性差异引起的压力^[4]。这些压力的大小与分布对探测器的性能和可靠性有着显著影响^[5]。

钢是一种低熔点且质地较软的金属,具有良好的延展性,在一定程度上可以抵消器件集成的应力^[6]。倒装互连中通常采用热蒸发工艺完成钢凸点的沉积。热蒸发沉积的钢膜应力较小,剥离产生的钢柱具有良好的塑形和冷焊性能,在较小的压力下可以被压缩,能避免压力对探测器电极产生的负面影响^[7]。因此,钢成为倒装互连中凸点的首选材料。

但由于钢的属性较为活泼,其表面在空气中极易形成钢的氧化物。当钢表面形成的氧化物被消除后,暴露在空气中的钢表面会迅速形成新的氧化层,可见在空气中放置的钢极易被氧化^[8-9]。钢的氧化物与单质钢在物理性质上存在较大的差异,会对倒装焊造成不利的影响^[10-11]。因此,在实际应用中,需要利用一定的手段识别钢的氧化物并采取相应的措施将其去除,以确保倒装互连的质量和性能。

本文使用金相显微镜观察电路形貌,判别其是否氧化,分析对比氧化后的电路对倒装互连工艺压力以及互连导通率的影响;对此提出用湿法和干法去除钢球氧化物,并对其去除效果进行测试分析。

1 钢球氧化物

1.1 测试分析设备

采用金相显微镜对样品表面进行形貌分析。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)结合能谱进行样品成分

分析。

1.2 金相显微镜下的钢球氧化物形貌

倒焊过程中无法保证探测器与读出电路在空间位置上绝对平行。采用湿法缩球工艺将钢柱变成钢球,可适当增加钢柱凸点的高度。这在一定程度上可以补偿由不平行造成的高度差,确保阵列上的所有单元形成有效的电连接^[12]。钢柱缩球除了直接增加钢柱高度以外,也能有效缩小钢柱之间的高度差异。湿法缩球后长时间放置的电路钢球表面会形成氧化物。在倒装互连前,可以使用金相显微镜对钢球表面进行观察,选择未氧化的电路进行倒装互连,避免氧化层对倒装互连质量以及探测器性能产生影响。

在金相显微镜下使用 50 倍镜头对湿法缩球后放置 4 个月的电路进行钢球形貌观察,结果如图 1 所示。可以看出,钢球表面比较粗糙、不光亮,一层黑色薄膜覆盖了钢球。使用 SEM 对其表面进行成分分析,结果如图 1(b)所示。钢表面的氧元素含量高达 18.78%,可以判断放置 4 个月的钢球表面形成了较厚重的钢氧化物。同样使用金相显微镜对湿法缩球后放置 1 h 的电路进行钢球形貌观察,结果如图 1(c)所示。可以看出,钢球表面无黑色杂质遮挡,表面清洁光亮。使用 SEM 对其表面进行成分分析,结果如图 1(d)所示。氧元素含量约为 5.56%,证明刚完成湿法缩球工艺的电路钢球表面的钢氧化物较少。因此,在倒装互连前可以快速通过金相显微镜对电路进行检测,选择表面光亮、无杂质的钢球进行倒装互连。

1.3 钢球氧化物对倒装互连的影响

1.3.1 钢球氧化物对倒装互连压力的影响

倒装互连压力是在倒装焊工艺过程中钢球与芯片电极形成电连接和机械连接时所施加的压力,是倒装互连工艺的关键参数。它由钢球体积、密度以及表面氧化程度决定。互连压力的大小会直接影响钢球与电极之间的接触面积、导电性和机械强度,对倒装互连质量起关

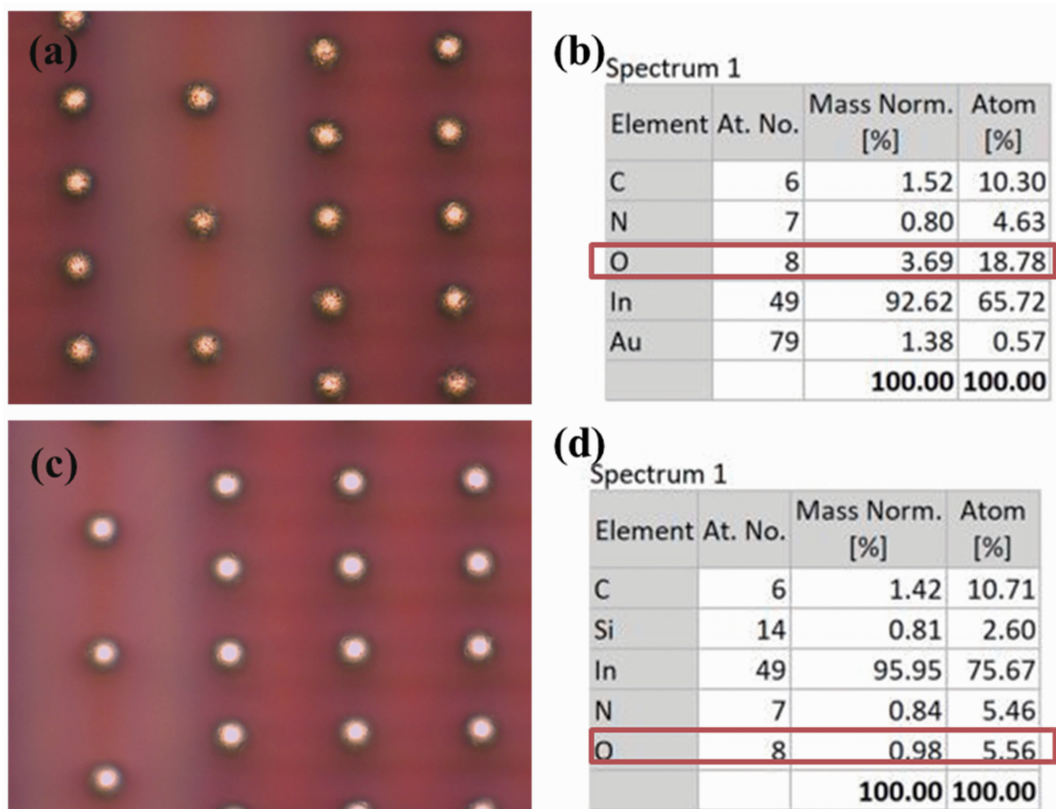


图 1 (a)金相显微镜下湿法缩球后放置 4 个月的钢球形貌图；(b)钢球表面的元素含量占比；
(c)金相显微镜下湿法缩球后放置 1 h 的钢球形貌图；(d)钢球表面的元素含量占比

表 1 氧化电路与未氧化电路互连后的钢柱压缩量

电路是否氧化	互连前的钢球高度	互连后的钢球高度	压缩量
已氧化	9.5 μm	7.2 μm	2.3 μm
未氧化	9.5 μm	6.3 μm	3.2 μm

键作用，进而影响到整个探测器的性能和可靠性。对已氧化电路和未氧化电路使用同样的互连压力进行倒装焊接，结果如表 1 所示。对互连前钢球高度一致的两种电路使用同样的压力互连，解剖后使用共聚焦显微镜测量钢球高度。

从表 1 中可以看出，同样压力下，已氧化电路的钢柱压缩量为 2.3 μm ，未氧化电路的钢柱压缩量为 3.2 μm 。已氧化电路较难被压缩，这是因为钢质地较软，而钢氧化物较硬且延展性差。当用同样压力焊接时，包裹在钢球表面的氧化物越多，越不容易压缩。因此，在互连前使用金相显微镜对电路进行严格检测。若电路表面形成较严重的氧化层，则需优化倒装互连工艺参数，精确控制倒装互连压力，确保每

个钢球都受到均匀且适当的压力，从而保证倒装互连质量。

1.3.2 钢氧化物对探测器导通率的影响

使用 FC150 型倒装互连设备对已氧化电路与未氧化电路进行倒装焊接。使用导通率系统对互连后的探测器进行常温下的电学连通率测试。图 2(a)为互连已氧化电路后的探测器导通率图，其中上半部分有半圆状区域的像素没有形成电学连接。图 2(b)为互连未氧化电路后的探测器导通率图。可以看出，该探测器的导通率较高，各像素的电学连接较好。这是因为钢的氧化物会在接触界面形成一层薄膜，进而增加接触电阻。氧化层较厚时会阻碍钢球与电极之间的直接接触，导致连接不良，从而影响导通率。

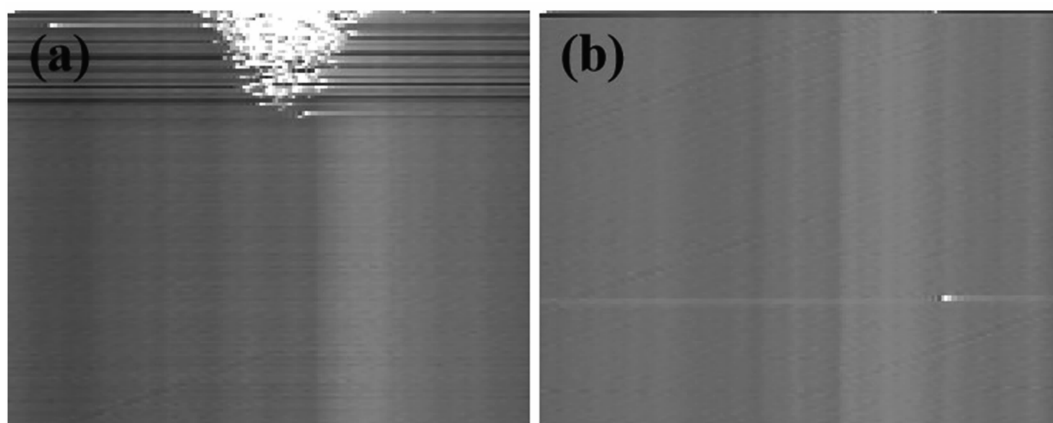


图 2 (a)互连已氧化电路后的探测器导通率图; (b)互连未氧化电路后的探测器导通率图

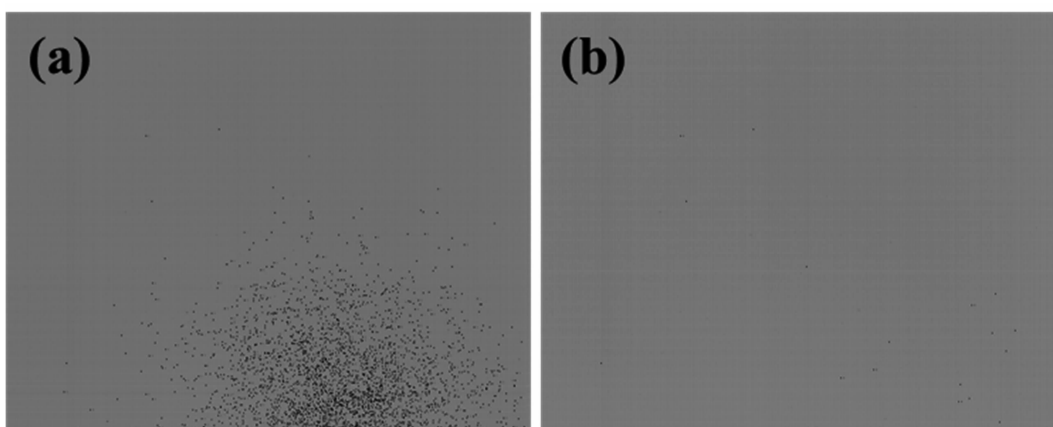


图 3 (a)互连已氧化电路后的探测器导通率图; (b)高温回流后的探测器导通率图

使用倒装焊设备将已氧化电路互连芯片,并用导通率测试系统对互连后的探测器进行电学测试。测试后进行高温回流工艺,再测试导通率。结果如图 3 所示。可以看出,互连已氧化电路后,器件会形成半圆圈状的不导通区域,如图 3(a)所示。被氧化的电路钢球在与芯片电极进行焊接后,由于钢球被氧化物包裹,钢球表面的氧化层厚度和钢球表面粗糙度较大时,施加互连压力,钢球表面的氧化层难以压裂,最终以覆盖膜留在钢球与电极接触面的中间,导致无法与芯片形成电学连接。

探测器在进行高温回流工艺后,导通率图中的不导通区域消失,如图 3(b)所示。这是由于高温回流工艺过程中,腔室内通入的还原性气体将部分钢球表面的氧化物还原,暴露出来的钢与芯片金电极形成钢金合金,从而实现电学连接,使导通率图中的不导通区域变小或

消失。此种高温回流工艺在一定程度上可以提升探测器的导通率,增加探测器良率,降低成本。

2 氧化物去除方法

2.1 湿法去除氧化物

湿法去除氧化物是指将已氧化电路重新放置在湿法缩球的溶液中加热 1 min。钢球表面形貌如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,已氧化电路经过湿法高温浸润之后,钢球表面洁净、光亮,无杂质。这是因为湿法缩球溶液具有铵类还原物,可将钢球表面的氧化物还原,从而达到去除氧化物的作用。从图 4(d)中可以看出,钢球表面的氧元素含量降至 9.21%,说明钢球表面的一部分氧化物已经被还原。

取多个已氧化电路放置在湿法缩球溶液中加热。改变加热时间,进行一系列试验,分别对钢球表面的氧成分进行测量。结果如图 5 所

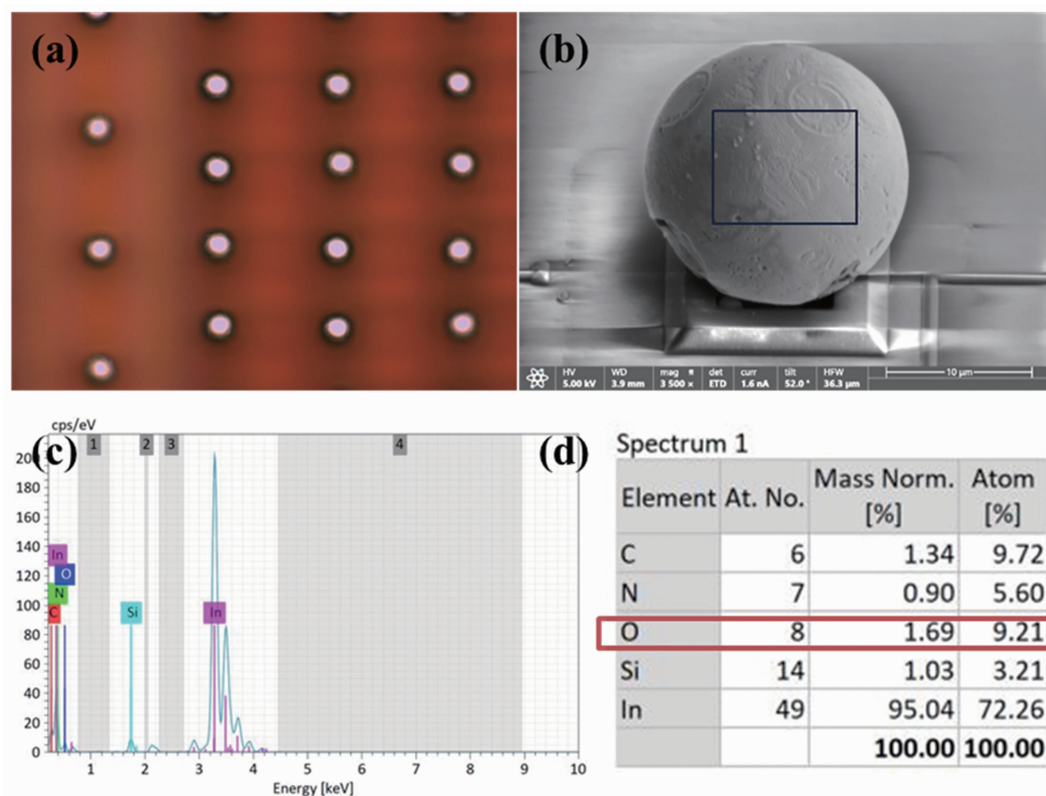


图 4 湿法去除已氧化电路的形貌：(a)金相显微镜下的钢球形貌；(b)钢球 SEM 形貌；(c)钢球表面能谱分析；(d)钢球表面元素含量占比

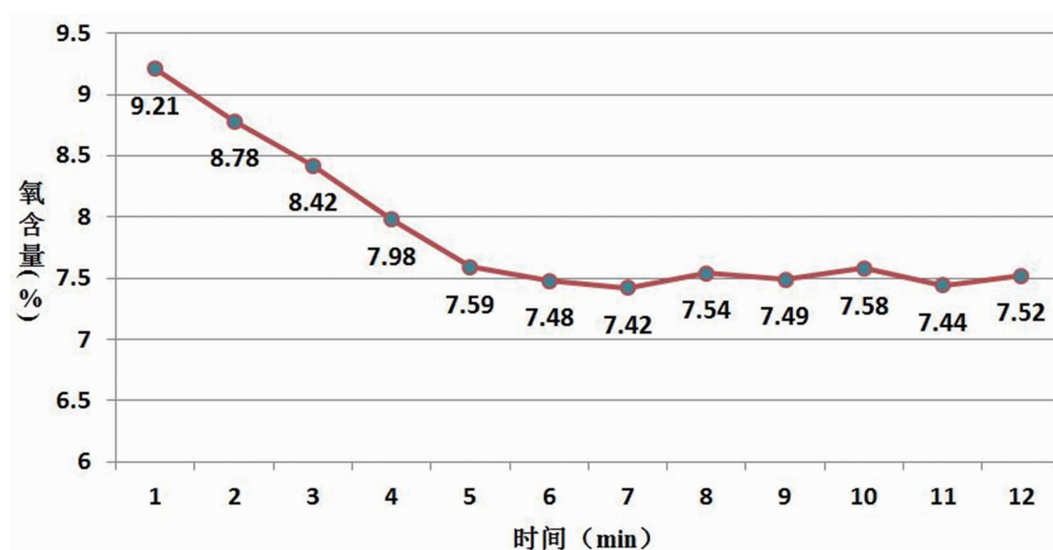


图 5 不同加热时间下的钢球氧元素含量占比

示。可以看出，随着电路放入湿法溶液中加热时间的增加，钢球表面氧化物中氧元素含量先减小然后趋于稳定，在 7 min 时达到最小值。因此，在倒装互连前对电路钢柱进行湿法加热处理，可以有效地减少钢柱表面的氧化物。加热时间需要根据实际电路状态进行评估，并不

是时间越长，氧化物去除得越干净。

选择两个已氧化电路进行湿法去除氧化物，分别加热 1 min 和 7 min，清洗后与芯片进行倒装互连。对两个探测器进行导通率测试，结果如图 6 所示。可以清楚地看到，湿法去除氧化物的效果较明显，如图 6(a)所示，加

热 1 min 后电路互连探测器的导通率图中还有少量未导通的散盲元。如图 6(b)所示, 加热 7 min 后电路互连探测器的导通率图中散盲元较少, 互连质量较好。因此, 采取湿法去除氧化物可以提升倒装互连导通率, 保证倒装互连质量, 且在加热 7 min 后可以取得较好的导通效果。

2.2 干法去除氧化物

干法去除氧化物是指基于气体放电产生高能量等离子体, 在特定条件下以一定速度和能量撞击被氧化的物体表面, 削弱分子与表面的结合力, 使表面氧化物形成小分子或者脱落, 从而实现清洗的目的^[13-14]。氩气是惰性气体, 氩离子很难与材料表面的杂质发生物理化学反应。可以使用氩气等离子体通过溅射作用清洗芯片表面杂质, 因此常用其清理易氧化的材料表面。将已氧化电路放入等离子体处理设备, 通入氩气, 形成的氩气等离子体溅射到电路表面, 使电路表面的氧化物被清洗。

取 4 个已氧化电路, 使用氩气等离子体对其进行干法清洗, 分别轰击 2 min、90 s、1 min、30 s 后观察电路表面氧化物情况, 结果如图 7 所示。经过氩气等离子体轰击 30 s 后, 氧元素含量由 18.78% 降至 6.74%。继续增加氩气等离子体轰击时间, 轰击其钢球表面。随着轰击时间的增长, 表面氧元素的含量逐渐减少, 钢球表面更加光亮、洁净。但是氩气等离子体对材料的选择性差, 很可能对处理的材料

表面产生较大的损伤^[15]。轰击条件控制不当时会造成金属表面的原子溅射和二次损伤。

使用金相显微镜对经等离子体清洗 2 min 后的电路进行观察, 发现其焊盘发生变色, 由原来的金色变为白色。对焊盘表面进行能谱分析, 结果如图 8 所示。可以看出, 等离子体清洗 2 min 后焊盘表面的 Au 元素含量为 9.02%, 而未经等离子体清洗的焊盘表面的 Au 元素含量为 65.07%, 可见长时间使用氩气等离子体清洗电路会使电路焊盘表面的 Au 元素发生原子溅射。溅射后的 Au 元素落在电路钢球表面, 在能谱分析图中如图 7 所示, 可以看到钢球表面有 Au 元素。

2.3 去除氧化物后的探测器性能

将用氩气等离子体轰击 1 min 后的电路与已氧化电路分别互连两块芯片, 然后将得到的两个探测器封装在测试杜瓦中, 并采用焦平面参数测试系统进行性能测量。图 9(a)为互连氩气等离子体轰击 1 min 后电路的探测器电平图, 图 9(b)为互连已氧化电路的探测器电平图。对比两者可以明显看到, 第一个探测器各像元间响应的均匀性比第二个探测器好, 且稳定性明显提升。这是因为钢表面的氧化物会使钢球的电阻率变高, 高接触电阻会导致信号传输不畅或连接不稳定; 互连该电路后, 混成探测器的暗电流变大, 像元响应幅度、响应率一致性和稳定性受到影响, 降低了器件的性能和可靠性。

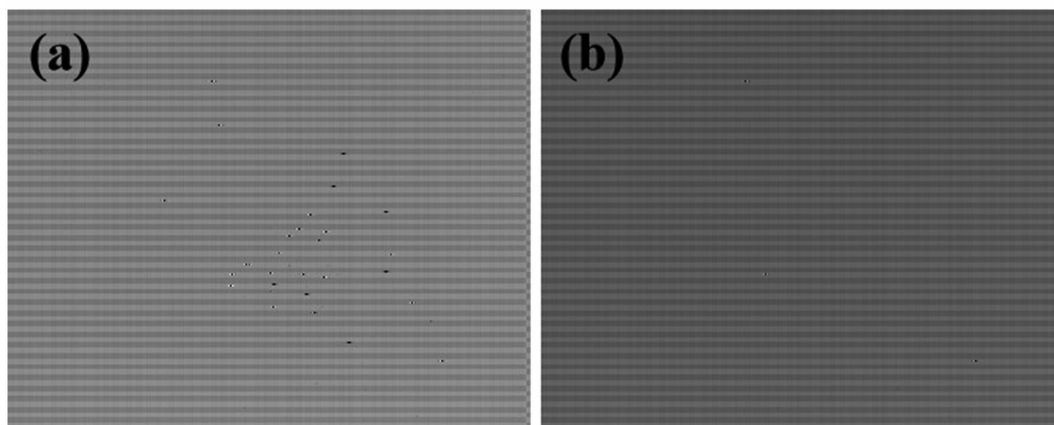


图 6 (a)加热 1 min 后电路互连探测器的导通率图; (b)加热 7 min 后电路互连探测器的导通率图

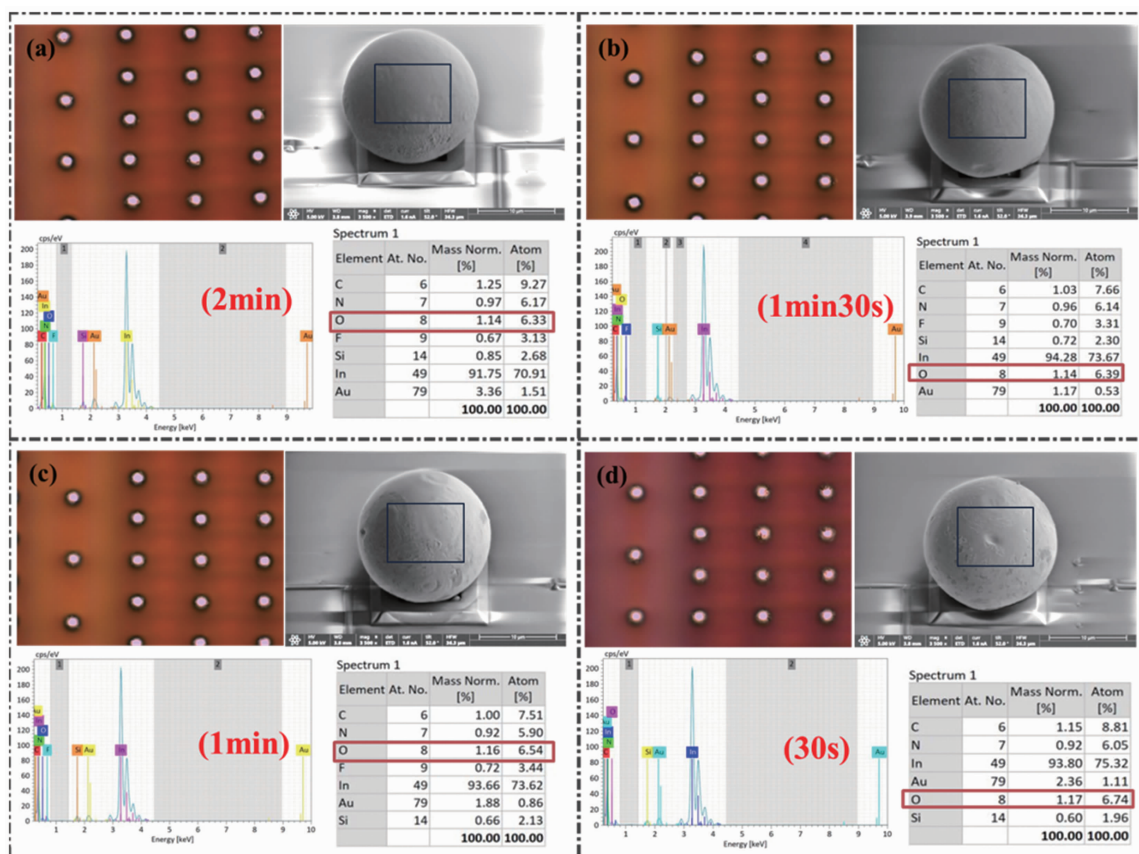


图 7 经不同等离子轰击时间后的钢球形貌及成分：(a) 2 min；(b) 90 s；(c) 1 min；(d) 30 s

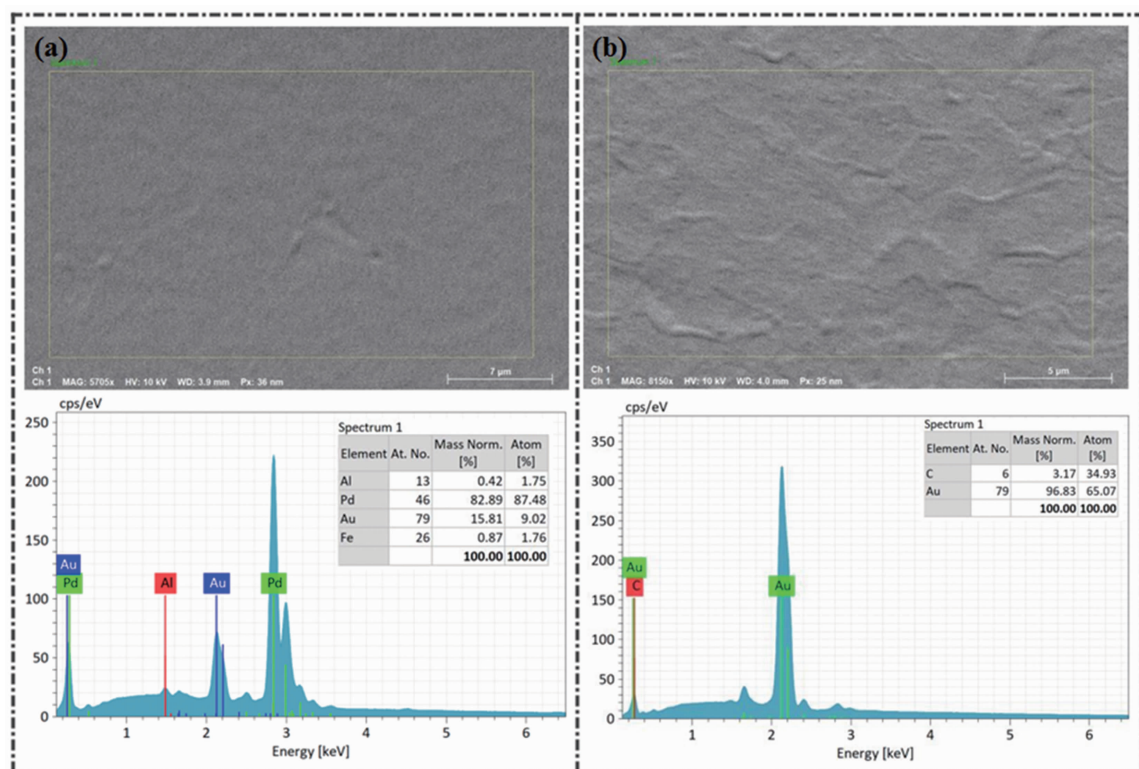


图 8 电路焊盘的形貌及成分：(a) 等离子体清洗 2 min；(b) 未经等离子体清洗

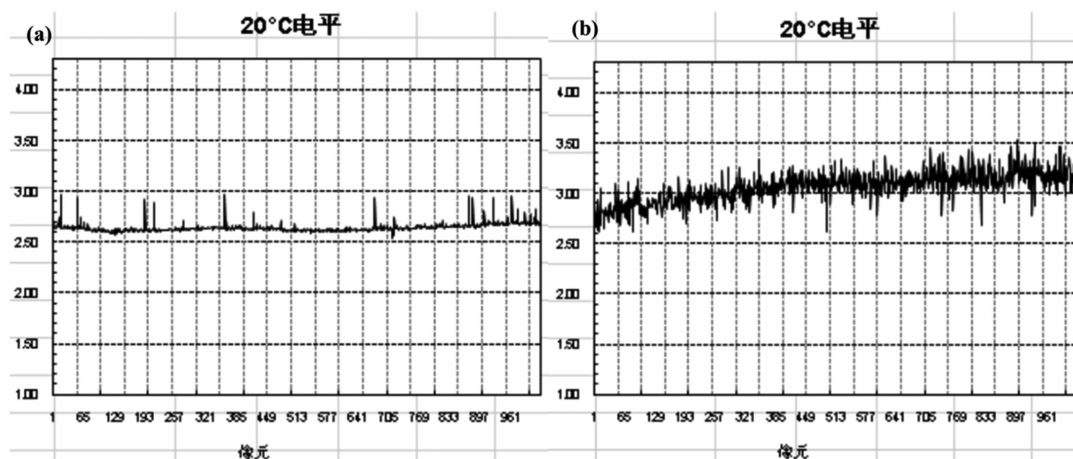


图 9 不同电路互连器件的测试电平图: (a)等离子体轰击 1 min 后的电路; (b)已氧化电路

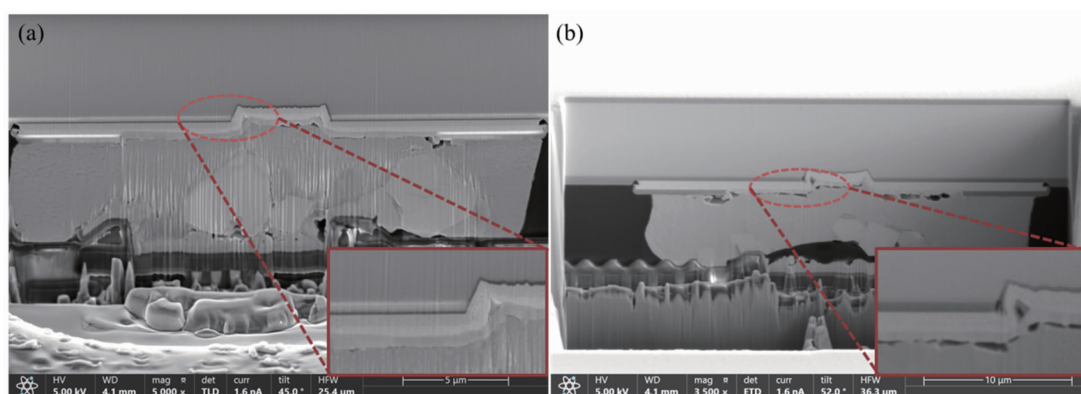


图 10 不同电路互连探测器的断面图: (a)等离子体轰击 1 min 后的电路; (b)已氧化电路

为进一步分析,对两个探测器中的像元进行聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)截面扫描,结果如图 10 所示。可以看出,电路端钢球与芯片电极之间接触紧密,无孔隙。这是因为氩气等离子体轰击后,电路钢球表面的氧化物被去除,且等离子体轰击能使钢球表面发生分子级微观形态变化,使表面粗糙化,从而改善钢球表面的粘接性能,增加倒装互连的键合强度。图 10(b)为互连已氧化电路的探测器的截面 FIB 图。由于倒装互连前钢球表面被氧化物包裹,钢球与芯片电极接触位置的浸润性不太好,存在孔隙,导致互连的机械强度较弱。由于探测器需要在 80 K 左右甚至更低的温度下工作,经过高低温冲击后,钢凸点的连接结构疲劳失效,导致信号传输损失或干扰,影响了探测器的灵敏度和响应速度,降低了探测器的性能,证实了测试结果。

3 结束语

综上所述,电路钢柱湿法缩球后放置时间过长会产生钢的氧化物。在倒装互连前可使用金相显微镜对电路进行筛选,避免氧化物影响互连压力,降低互连导通率。为减少对器件性能的影响,本文提出两种去除钢氧化物的方法(包括湿法清洗和干法清洗),并对其清洗方法进行了定量研究。湿法清洗随着加热时间的增加,氧元素含量先减小然后趋于稳定,加热 7 min 时氧元素降到 7.2%,获得较好的去除效果。湿法清洗对电路表面未引入其他污染,工艺较温和。干法清洗采用等离子体轰击,可大幅降低钢氧化物中氧元素的含量,在 1 min 时就有较好的效果:氧元素含量降至 6.54%,且电路焊盘受损较小,互连混成的探测器性能较稳定。在大量实验数据的基础上,本文的研究内容加强了量化等方面的论证,为提高倒装

互连质量、提升器件性能、改善器件可靠性提供了详细的解决方案。湿法和干法去除钢球氧化物的长期可靠性还需在后续组件验证中作进一步研究。

参考文献

- [1] 耿红艳, 周州, 宋国峰, 等. 红外探测器倒装互连技术进展 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(3): 722–726.
- [2] 刘若冰, 王爽, 陈勤, 等. 红外焦平面探测器键合和剪切可靠性试验研究 [J]. *激光与红外*, 2022, **52**(6): 861–869.
- [3] Huang Y, Lin C, Ye Z H, et al. Reflow flip-chip bonding technology for infrared detectors [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, **25**(8): 1–6.
- [4] Liao G, Du L, Su L, et al. Using RBF networks for detection and prediction of flip chip with missing bumps [J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, **55**: 2817–2825.
- [5] 贾柔柔. 倒装焊器件封装关键结构的疲劳寿命预测及可靠性评价 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [6] 费多洛夫, 阿克林楚著. 张启运, 徐克敏译. *钎化学手册* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [7] 董绪丰. 混成式焦平面探测器倒装互连研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [8] Kim Y H, Choi J H, Choietc K S. New Reflow Process for Indium Bump [C]. *SPIE*, 1997, **3061**: 60–67.
- [9] 张国栋, 王海珍, 龚启斌, 等. 增强混成式焦平面器件互连芯片可靠性的几点措施 [J]. *航空兵器*, 2001, **38**(3): 13–14.
- [10] Chu K, Lee J, Cho H, et al. Characteristics of Indium Bump for Flip-Chip Bonding Used in Polymeric-Waveguide Integrated Optical Interconnection Systems [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, **43**(8): 5922–5927.
- [11] 张智超, 赵建忠. 氧化层对倒装焊接质量的影响与分析 [J]. *红外与激光*, 2009, **39**(10): 25–29.
- [12] 沈天铸. 红外焦平面探测器互连中的 In 缩球工艺 [J]. *红外技术*, 2007, **29**(2): 96–98.
- [13] 叶亚云. 光学元件表面的激光清洗技术研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
- [14] 金英. 等离子体射流特性及在金属表面清洗中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [15] 沙春鹏, 卢少微, 赵雪莹, 等. 等离子体清洗技术在航空制造业中的应用及前景分析 [J]. *能源研究与管理*, 2014, **21**(4): 77–80.