

基于气浮喷射的 MEMS 封装中通孔的金属互联

吕文龙¹, 占 瞻², 虞凌科², 杜晓辉², 王凌云², 孙道恒^{2*}

(1. 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 2. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 在微机电系统(MEMS)圆片级封装中, 通孔缺陷极有可能降低芯片与外界电互联的可靠性. 采用气浮沉积的方法, 在通孔底部沉积纳米银浆, 形成低电阻的 Ag/Al/Si 欧姆接触结构, 解决了电极间的电学连接问题. 根据 AJ™ 300 气溶胶喷射系统的特点, 选择 50 nm 粒径的纳米银浆制作通孔 Ag/Al/Si 欧姆接触结构; 在平面圆形 Al 电极上气浮沉积纳米银浆, 改变银浆的烧结温度, 用以验证 Ag 对 Al/Si 接触电阻的影响; 将此法应用于通孔互联结构中, 并探究得出最优沉积时间, 测量两通孔间的 $I-V$ 特性. 试验结果表明, 采用超声雾化方式的气浮沉积方法, 在通孔底部沉积 15 s 的纳米银浆, 经过 300 °C 的烧结, 可以有效填充通孔底部缺陷, 并形成较低电阻的 Ag/Al/Si 接触结构. 采用按需喷印的气浮沉积方案对通孔进行沉积, 为实现 MEMS 芯片与外界的电互联提供了新思路.

关键词: 圆片级封装; 气浮沉积; 金属互联; 欧姆接触; 纳米银浆

中图分类号: TB 43; TN 405.97

文献标志码: A

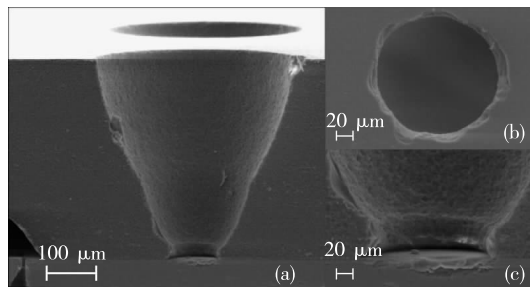
文章编号: 0438-0479(2014)05-0689-04

圆片级封装(wafer level package, WLP)技术是以晶圆片为单位进行封装操作, 在圆片前道工序完成后, 直接对圆片进行封装、测试, 然后切割分离成单个器件. WLP 技术不仅提高了封装密度, 降低了封装成本, 提高了封装效率, 同时还提高了电路性能和品质, 有效降低了 I/O 间的电感、电容和其他不希望的特性. 随着微机电系统(MEMS)对封装的尺寸、密度和成本等要求不断提高, WLP 已经成为一种趋势^[1].

由于 MEMS 器件自身的特殊性, 感应结构比较敏感、脆弱, MEMS 封装一般都会为其提供一个腔体, 该腔体在保护器件的同时为器件的正常工作提供一个良好的环境, 如气密、真空等. 在 WLP 中为了给 MEMS 器件提供这样的腔体, 通常采用盖板方式. 盖板工艺主要包括 2 个关键技术: 1) 圆片键合技术, 用于盖板与芯片基板的键合; 2) 通孔互连技术, 用于芯片与外界的电学连接. 盖板一般采用玻璃材料, 以形成玻璃-硅-玻璃结构或玻璃绝缘衬底上的硅(SOI)结构^[2].

其中, 激光刻蚀和喷砂工艺是在玻璃上刻蚀通孔的常用方法. 然而, 这 2 种工艺制作的通孔底部一般

会产生脆性崩边, 导致硅和通孔之间形成 5~40 μm 的断层, 如图 1 所示. 这一缺陷极大降低了通孔金属互联的电学可靠性. 针对这类普遍存在的工艺缺陷, 通常采用增加沉积金属厚度^[3]或改变通孔底部结构^[4]两类方法加以解决.



(a) 横截面; (b) 通孔底部; (c) 破损细节.

图 1 破损通孔的 SEM 图

Fig. 4 SEM of the breakage in the through-hole

气浮沉积(AD)技术是一种新型按需喷印方法, 在许多领域已进行了探索性的研究, 尤其在柔性电子制造、机电工程和表面修复等领域已经取得了创新性的突破, 国外研究小组已经成功地将 AD 技术应用于太阳能电池、薄膜晶体管、微传感器、微执行器等制造^[5-7]. AD(使用银浆作为墨水)喷印得到的线宽在 10~200 μm , 喷头与基板之间的距离可在 1~5 mm 内调整. 另外, 它能喷印的墨水的黏度范围更广(0.7~2 500 mPa·s), 这使它能加工金属墨水、聚合物厚膜浆

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51105320)

* 通信作者: sundh@xmu.edu.cn

料、稀释后的陶瓷粉末,甚至环氧树脂.基于以上工艺特点,本文提出了将 AD 技术应用于制作通孔互联结构中,该方案具有以下优点:1) 按需喷印,节省金属材料;2) 适应于填充各种形状的通孔^[8-9].

本文以玻璃-硅-玻璃封装结构为例,针对喷砂方法制作的通孔,提出一种高可靠性、低成本的结合 AD 技术的金属互联制作方法.制作工艺:首先在玻璃通孔图案化溅射一层铝膜,然后采用 AD 方法向通孔内喷印纳米银浆,最后加热蒸发掉银浆中的有机成份,形成 Ag/Al/Si 的接触结构,以实现 MEMS 器件与外界的电学连接.

1 AD 系统

Optomec 公司 AJTM 300 气溶胶喷射系统主要包括雾化器、喷头和 XY 运动平台等,如图 2 所示.沉积过程:雾化器使纳米材料雾化,生成一层致密的颗粒蒸气,该蒸气被一股气流从雾化器中带出来,随后这股气流被鞘气包裹形成同轴气流,最后同轴气流从喷头喷射到位于 XY 运动平台的收集板上.气浮喷射的材料线宽范围 10~200 μm ,喷头到收集板的距离在 1~5 mm 之间^[10].

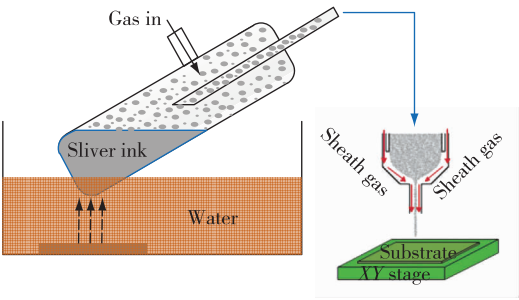


图 2 带超声雾化器的 AD 系统原理图
Fig. 2 Schematic of aerosol deposition system with ultrasonic atomizer

2 试 验

2.1 通孔欧姆接触结构的制作方法

金属银的电导率为 $63.01 \times 10^6 \text{ S/m}$,是良好的导电材料,而且容易制成纳米浆料,目前已被广泛地应用于 AD 系统.本文选择型号为 Cabot CSD-32 的纳米银浆,但考虑到 Ag-Si 共熔点为 835°C ^[11],远高于 MEMS 工艺中大部分电极以及基材的极限温度^[12].因此无法直接制作 Ag/Si 接触结构.为了实现通孔的

金属互联,同时获得良好的欧姆接触特性,提出一种基于 AD 工艺的 Ag/欧姆金属/Si 三层结构.其中,相比于 Ag, Lee 研究得到 500°C 是 MEMS 中的 Al 电极形成欧姆接触的经验温度,而 7740 玻璃的标定软化点为 840°C , 500°C 退火不会影响器件的性能.基于 AD 的喷印特性,选择 Ag 作为通孔底部的填充金属,通过局部喷印,实现玻璃通孔与硅的电学连接.

Ag/Al/Si 接触结构的制作流程见图 3,包括以下 2 个步骤:

- 1) 采用光刻工艺制作掩膜图形,限定玻璃盖板上沉积 Al 的具体区域;
- 2) 采用电子束蒸发法,在通孔底部和侧面沉积 $1.5 \mu\text{m}$ 的 Al,然后在 500°C , N_2 气氛中退火 30 min;
- 3) 采用 AD 法,在通孔内沉积纳米银浆,然后在 N_2 气氛中烧结.

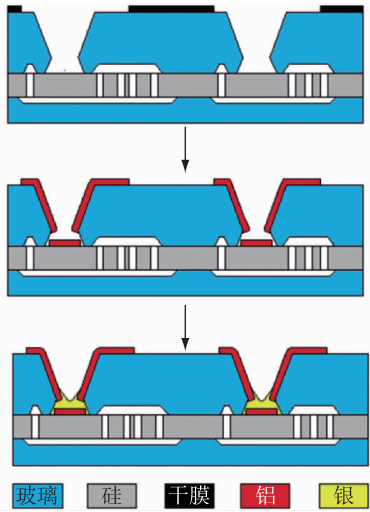


图 3 Ag/Al/Si 接触结构的制作流程
Fig. 3 Processing flow of Ag/Al/Si contact structure

2.2 工艺试验

为验证方案可行性,首先在硅衬底上制作 Ag/Al/Si 接触结构,考察引入 Ag 后 Al/Si 接触电阻的变化量.详细步骤:1) 在 P 型硅衬底上制作 2 个半径为 1.5 mm,中心距为 4.5 mm 的 Al 圆电极;2) 采用 AD 法,在 Al 电极表面沉积相同尺寸的 Ag 电极,得到如图 4 所示的 Ag/Al/Si 接触结构. AD 系统的基本参数:雾化器为超声,雾化器功率为 32.69 W,载气流量为 14 mL/min,鞘气流量为 185 mL/min,喷印线宽为 $46 \mu\text{m}$.

图 5 为 Ag 在不同温度烧结后,接触电阻的相对变化量.由图 5 可知,当烧结温度低于 500°C 时,Ag/Al/Si 结构相较于 Al/Si 结构,接触电阻的变化量小



图 4 平面 Ag/Al/Si 接触结构
Fig. 4 Plane Ag/Al/Si contact structure

于 4%，表明 Ag 的引入，基本不影响 Al/Si 的接触电阻。

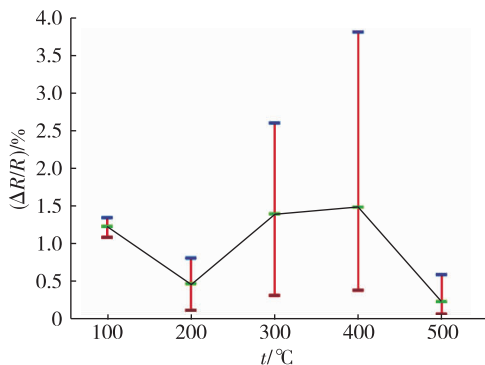


图 5 不同烧结温度下，引入 Ag 后接触电阻的相对变化量
Fig. 5 The relative change of the resistance at different sintering temperatures after Ag was deposited on Al/Si

采用 3M 600 胶带对 Ag/Al/Si 结构进行黏附性测试，测试结果如图 6 所示。结果表明，烧结温度不高于 300 °C 时，Ag 与 Al 的黏附性较好，基本上不脱落，其拉伸强度超过 9.8 N/cm²，当 Ag 烧结温度超过 400 °C 时，Al 表面的 Ag 发生不同程度的脱落。

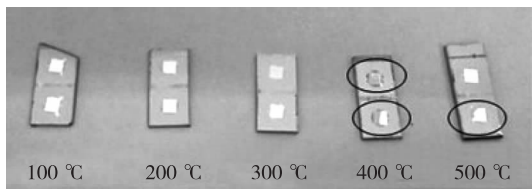


图 6 不同烧结温度下 Ag 与 Al 的黏附性测试
Fig. 6 Adhesion test at different sintering temperatures

3 通孔的电学性能测试

采用与上述试验相同的工艺条件，在喷砂工艺制作的玻璃通孔（底部半径为 110 μm）底部填充纳米银浆，并在 300 °C，N₂ 气氛中烧结。随后对填充好的两通孔进行 I-V 测试，测试结构如图 7 所示。

两通孔间的 I-U 特性曲线如图 8 所示。测试结果

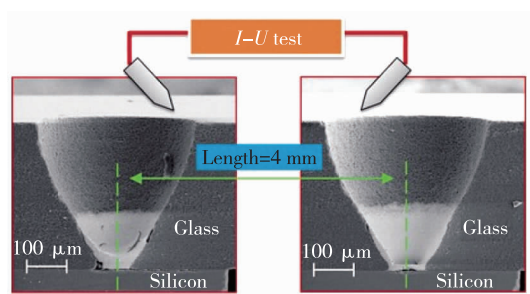


图 7 两通孔的 I-U 测试结构
Fig. 7 I-U test structure between two through-holes

表明，电子束蒸发的 Al 无法有效填充玻璃通孔底部的破损区域，玻璃通孔与硅仍处于断路状态；AD 法沉积的 Ag 完全填充了玻璃通孔底部与硅之间的断层，形成了较低电阻的 Ag/Al/Si 欧姆接触结构，实现了玻璃通孔与硅的电学连接。

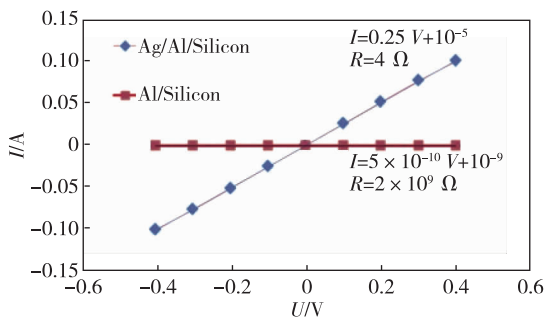


图 8 两通孔之间的 I-U 特性曲线
Fig. 8 I-V characteristic curve between two through-holes

4 结 论

激光刻蚀和喷砂工艺制作的玻璃通孔底部容易产生破损。本文首先在玻璃通孔底部和侧面蒸发一层 1.5 μm 的 Al，然后采用 AD 方法在通孔底部沉积 15 s 的纳米银浆，经过 300 °C 烧结的 Ag 完全填充了玻璃通孔底部与硅之间的断层，形成了较低电阻的 Ag/Al/Si 欧姆接触结构，实现了玻璃通孔与硅之间的电学连接。试验结果表明，AD 方法作为一种新型的直写方法，能够有效解决通孔底部破损造成的玻璃通孔与硅的电学连接问题，对研究 MEMS WLP 中微结构与外界的电互联提供了新思路。

此外，通过移动 XY 运动平台，AD 方法可实现对通孔的点对点沉积，不仅节省了金属材料，而且整个过程也不再需要掩膜来确定沉积区域，简化了制作工艺。

参考文献:

- [1] Lee M C, Kang S J, Jung K D, et al. A high yield rate MEMS gyroscope with a packaged SiOG process[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15:2003-2010.
- [2] 王玉传. MEMS 圆片级芯片尺寸封装研究[D]. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006.
- [3] Wensink H. Fabrication of microstructures by powder blasting[D]. Netherlands: University of Twente, 2002.
- [4] Zhao Q C, Yang Z C, Guo Z Y, et al. Wafer-level vacuum packaging with lateral interconnections and vertical feedthroughs for microelectromechanical system gyroscopes[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2011, 10(1):011507.
- [5] Lebedev M. Optical micro-scanner fabricated on stainless steel by aerosol deposition method[C] // Proceedings of the 14th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, ISAF. Tsukuba, Japan: IEEE, 2004: 165-168.
- [6] Wang X Y, Chang P Z, Vasic D, et al. A flexion mode piezoelectric micro-transformer processed by aerosol deposition method[C] // IEEE Ultrasonics Symposium. New York, USA: IEEE, 2007: 1049-1052.
- [7] Akedo J. Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89: 1834-1839.
- [8] Hon K K B, Li L, Hutchings I M. Direct writing technology-advances and developments[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 601-620.
- [9] 李京龙, 孙福, 张赋升. 气浮沉积技术[J]. 机械科学与技术, 2005, 25(2): 177-180.
- [10] XU B L, Lv W L, Wang X, et al. Conductive micro silver wires via aerosol deposition[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS. Kyoto, Japan: IEEE, 2012: 282-285.
- [11] Lin C W, Hsu C P, Yang H A. Implementation of silicon-on-glass MEMS devices with embedded through-wafer silicon vias using the glass reflow process for wafer-level packaging and 3D chip integration[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18: 1-6.
- [12] Rhoderick E H, Williams R H. Metal-semiconductor contacts[M]. Oxford: Clarendon Press, 1988.

Application of Aerosol Jet Technology on Through Hole Metal Interconnection for MEMS Wafer Level Package

LÜ Wen-long¹, ZHAN Zhan², YU Ling-ke², DU Xiao-hui², WANG Ling-yun², SUN Dao-heng^{2*}

(1. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology,

2. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In MEMS wafer level package, the reliability of electrical interconnection between the chip and external environment may be reduced by the breakage of the through-hole. The breakages of the through-hole deteriorate the reliability of electrical interconnection between internal device and external circuit. In order to solve the problem, the Aerosol Jet technique is adopted in this paper, which deposits nano-silver ink at the bottom of the through hole, forming Ag/Al/Si contact structure with low resistance. First, nano-silver ink with particle diameter of 50 nm is deposited on planar round electrodes with Aerosol Deposition to verify the influence of Ag on Al/Si contact resistance. Then, the bottoms of the through holes are filled with silver ink to form Ag/Al/Si contact structure. The *I-V* characteristics between two through holes are also tested. The experimental result shows that aerosol jet method with ultrasonic atomizer is able to fill the breakage in through hole and form Ag/Al/Si contact structure with low resistance after depositing nano-silver ink for 15 s and sintering under 300 °C. The Aerosol Deposition method which is deposit on demand, provides a new thinking to achieve the electrical interconnection.

Key words: wafer level package; aerosol deposition; metal interconnection; ohmic contact; nano silver