

文章编号 1004-924X(2014)11-3044-06

用电镀铜锡合金薄膜实现圆片级气密封装

杜利东^{1*}, 赵 湛¹, 方 震¹, 孙学金², 王晓蕾²

(1. 中国科学院 电子学研究所 传感器国家重点实验室, 北京 100190;

2. 解放军理工大学 气象与海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要:开发了一种基于电镀铜锡合金薄膜的绝压气压传感器圆片级气密封装技术以降低常规的基于阳极键合气密封装技术的成本及难度。通过实验确定了铜锡合金薄膜的电镀参数,实现了结构参数为:Cr/Cu/Sn (30 nm/4 μ m/4 μ m)的铜锡合金薄膜;通过共晶键合实验确定圆片级气密封装的参数,进行了基于铜锡材料的气密封装温度实验。通过比较各种不同温度下气密封装的结果,确定了完成圆片级气密封装的条件为:静态压力 0.02 MPa,加热温度 280 $^{\circ}$,保持 20 min。最后,对气密封装效果进行 X-射线衍射谱(XRD)、X 射线分析、剪切力以及氦气泄露分析等实验研究。XRD 分析显示:在键合界面出现了 Cu₃Sn 相,证明形成了很好的键合;X 射线分析表明封装面无明显孔洞;剪切力分析给出平均键合强度为 9.32 MPa,氦气泄露分析则显示泄露很小。得到的结果表明:基于电镀铜锡合金薄膜可以很好地实现绝压气压传感器的圆片级气密封装。

关键词:微机械;气密封装;气压传感器;圆片级键合;电镀铜锡合金薄膜

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3044

Wafer level hermetic packaging based on electroplating Cu-Sn alloy films

DU Li-dong^{1*}, ZHAO Zhan¹, FANG Zhen¹, SUN Xue-jin², WANG Xiao-lei²

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Meteorology and Oceanography,

PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

* Corresponding author, E-mail: lddu@mail.ie.ac.cn

Abstract: A kind of wafer level hermetic packaging based on electroplating Cu-Sn alloy films was developed to reduce the cost and difficulty of traditional hermetic packaging based on anodic bonding. The electroplating parameters of Cu-Sn alloy films were determined by the electroplating experiments, and the structure of alloy film is Cr/Cu/Sn (30 nm/4 μ m/4 μ m). Then, the hermetic packaging parameter was determined by eutectic experiments. After comparing the hermetic packaging results at different temperatures, the wafer-level packaging was achieved well on a temperature of 280 $^{\circ}$ C.

收稿日期:2014-03-05;修订日期:2014-04-17.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51305423);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA040504, No. 2012AA040502)

holding time of 20 min and a static pressure of 0.02 MPa. Finally, the quality of hermetic packaging was tested by X-ray Diffractometry (XRD), X-ray analysis, a shear stress analysis and a helium leakage rate test. The XRD experiment shows that the bonding is formed because that there are phase Cu_3Sn in bonding layer. The hermetic quality is verified by the X-ray analysis and the helium leak rate test. It is suggested that no obvious holes are occurred around the hermetic ring and most of the cells have good hermetic bond quality. Moreover, the average shear strength is 9.32 MPa by shear stress test. These results demonstrate that the wafer-level hermetic packaging has been achieved well based on electroplating Cu-Sn alloy films.

Key words: micro machining; hermetic packaging; pressure sensor; wafer level bonding; electroplating Cu-Sn alloy film

1 引 言

键合技术是微机电系统 (MEMS) 领域中至关重要的技术,尤其是用在气密封装上。常规的 MEMS 气密封装主要有硅-硅熔融键合和硅-玻璃阳极键合,不过这些方法均有不足之处,如硅-硅熔融键合中的高温处理过程和阳极键合中的高电压过程都有待改进。此外,中间层键合技术也可以完成气密封装,其中中间层可以用多种物质,如有机 BCB, SU8, 光刻胶, 玻璃粉和焊料等^[1-4]。但这些方法也存在一些缺点,如有机材料中间层键合不稳定,玻璃粉和焊料键合的键合面积大等。

金属合金气密封装技术由于其成本低和操作简单等在 MEMS 领域中引起了极大的重视,如金锡 (Au-Sn)、银锡 (Ag-Sn) 和铜锡 (Cu-Sn) 合金,其中 AuSn 和 AgSn 合金受到了更广泛的关注。Sun W 对沉积金锡中间层的一种协同电镀方法进行了研究^[5]; He 开发了一种用金和锡溶液按照需要的配比混合后制作金锡合金的方法^[6]; Kim 研究了电镀参数对于银锡中间层的组份以及形态的影响^[7]。然而,金锡和银锡合金相对成本较高。相比金锡、银锡合金,铜锡合金成本较低,且同样适合用于气密封装。目前,有很多关于铜锡共晶键合气密封装研究的报道^[8-15]。Tsutomu 研究了铜锡金属键化合的方式; Kazuo

和 Hideaki 研究了铜锡合金特性; Motohiro 提出了铜锡薄膜的电镀方法; Yang 研究了生长 Cu_6Sn_5 的方法。不过,至今未见有铜锡合金气密封装应用于气压传感器的研究。

本文对基于铜锡合金的用于气压传感器研制的圆片级封装技术进行了研究。通过电镀实验、气密封装实验以及各种气密封装检测实验分析了铜锡合金气密封装在气压传感器应用中的效果。

2 实 验

2.1 气压传感器制备

图 1 所示为压阻式绝压气压传感器制作工艺流程。整个工艺基于 2 片 7.62 cm (3 in) 100 硅片。首先在一片硅片的上下表面通过热氧化工艺制作 500 nm 的氧化硅,之后通过 LPCVD 工艺制作 200 nm 氮化硅。接着在硅片的上表面通过溅射和 Lift-off 工艺制作铂检测电极。硅片的下表面经过刻蚀氮化硅和氧化硅的工艺后用 80℃ KOH 进行腐蚀直到硅剩下 20 μm , 形成压力检测空腔。接下来,在空腔键合环上通过溅射工艺制作 30 nm Cr 黏合层以及 300 nm 铜电镀种子层,通过电镀工艺形成 4 μm Cu 和 4 μm Sn; 在另一片硅片上同样首先溅射制作 30 nm Cr 黏合层以及 300 nm 铜电镀种子层,通过电镀工艺形成 4 μm Cu 和 4 μm Sn。整个基于铜锡合金的气压传感器制作工艺是通过键合设备完成的。

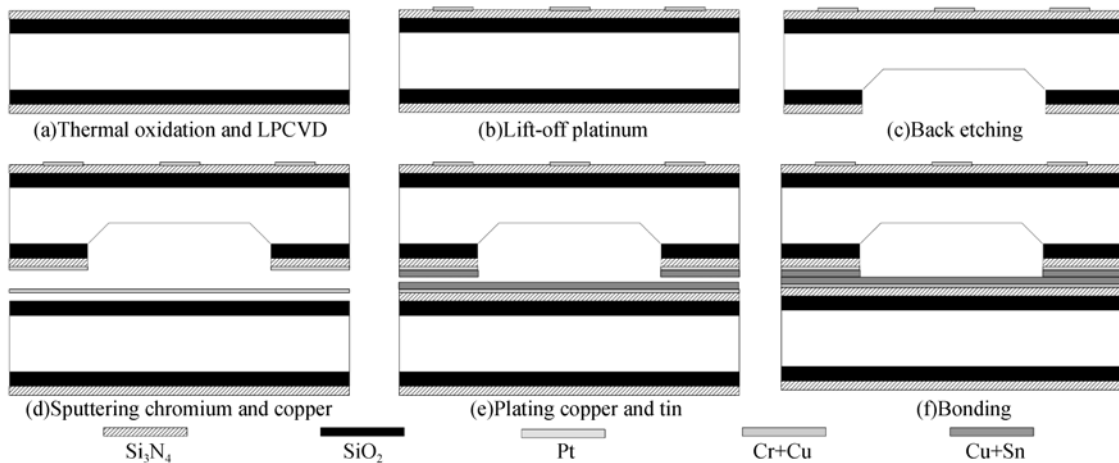


图 1 气压传感器制作流程图

Fig. 1 Fabrication process of pressure sensor

2.2 电镀参数

电镀铜和锡的参数对于中间层键合非常重要。电镀设备如图 2 所示。阴极为覆盖着电镀种子层的硅片,阳极为白金。



图 2 电镀设备

Fig. 2 Photograph of electroplating experiment

表 1 电镀液组份和电镀参数

Tab. 1 Electrolyte composition and Parameters of electroplating

	锡溶液		铜溶液	
溶液组份	SnCl ₂ · 2H ₂ O	1.5 g	CuCl ₂ · 2H ₂ O	2 g
	柠檬酸铵	2 g	柠檬酸铵	5 g
	纯水	500 mL	纯水	500 mL
阴阳极距离	4~5 cm		4~5 cm	
激励	20 r/min		20 r/min	
速度	1.8~2.5 μm/h		约 2 μm/h	
温度	18~25℃		18~25℃	

电镀液组份和电镀参数如表 1 所示。电镀锡

的实验在 0.8~4 mA/cm² 几个不同电流密度情况下完成,结果表明在电流密度小于 2 mA/cm² 时,电镀层致密且光滑。电镀铜实验则显示电流密度要限制在 1~1.5 mA/cm² 之间。电镀电流密度为 1 mA/cm² 和 2 mA/cm² 情况下的 SEM 表面结构照片如图 3 所示。

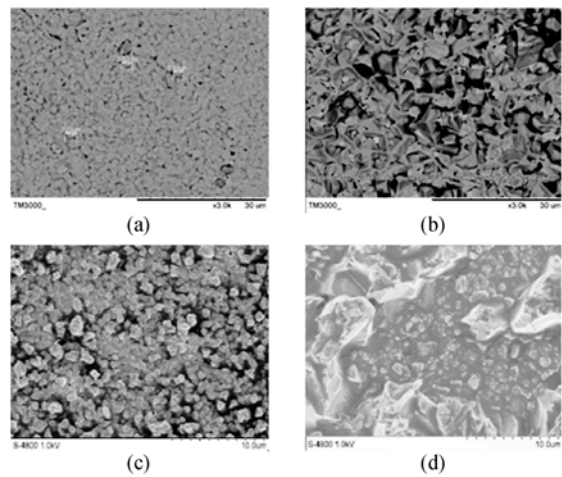


图 3 不同电流密度下电镀铜和电镀锡的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of Cu and Sn electroplated under different current densities

2.3 键合温度

键合温度是完成中间层键合的重要参数。本文在静态压力 0.02 MPa,保持 20 min 条件下,分别在 250 和 280℃ 进行了键合实验。实验开始时,温度成阶梯状上升,即开始以 0.2℃/s 的速度升至 150℃ 保持 5 min,之后以 0.1℃/s 的速度升至设定点。首先做了 250℃ (A 组) 和 280℃ (B

组)情况下的键合实验。基于随机选择的划片后的芯片,通过 Dage Series 4000 Bondtester 进行剪切力的测试,测试结果如表 2 所示。从表中可以看出 A 组的平均剪切力大于 B 组,原因可能是由于电镀铜和电镀锡的不同聚集速度形成的小孔洞,图 4 的 SEM 照片显示了孔洞的存在。但 A 组中最小的剪切应力是 1.9 MPa,说明 A 组的稳定性小于 B 组。

表 2 不同温度下的剪切力

Tab. 2 Shear strength at different temperatures

组别	剪切力/MPa		
	平均	最大	最小
A(250℃)	11.37	19.77	1.9
B(280℃)	9.32	10.95	5.85

2.4 键合结果

圆片级键合照片如图 5 所示,可以看出 94.5% 的区域完成了键合。X 射线是一种键合质量评估的重要方法。A 和 B 两组选择的芯片测试结果如图 6 所示。A 组在键合面上具有明显的没键合好的区域(图中黑色区域),而 B 组没有。综合考虑上述剪切力测试结果,最后将键合温度定为 280℃。

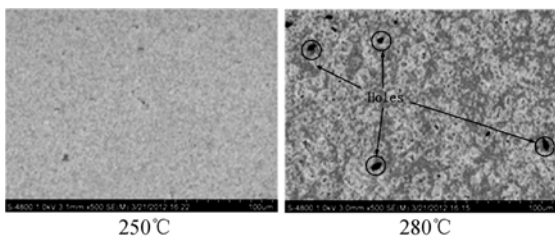


图 4 250℃ and 280℃ 情况下键合面的 SEM 照片
Fig. 4 Photos of bonding interfaces under 250℃ and 280℃

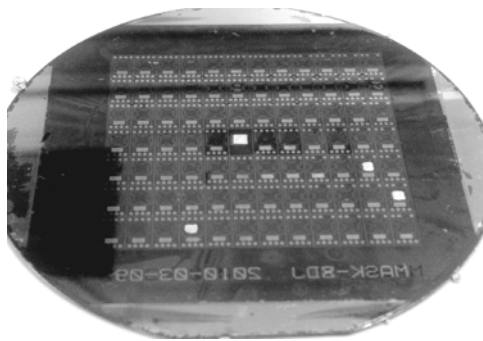
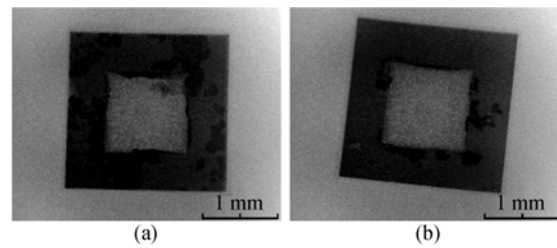
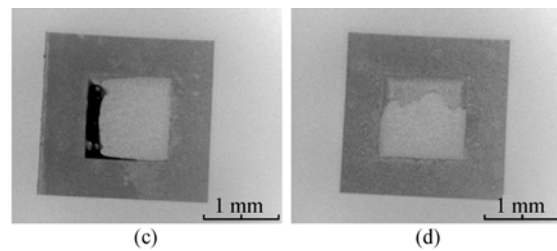


图 5 圆片级键合
Fig. 5 Photo of wafer level bonding



250℃ 键合情况
Bonding at 250℃



280℃ 键合情况
Bonding at 280℃

图 6 X 射线扫描图
Fig 6 X-ray scan images

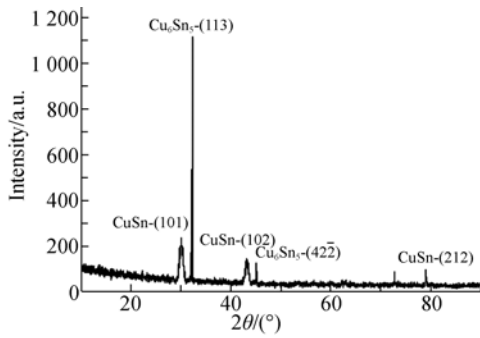
氦气泄露也是一种重要的检测键合质量的手段。用研制好的感压膜为 20 μm 的压力传感器进行了氦气泄露测试,结果如表 3 所示,泄漏率小于 4×10⁻⁴ Pa·cm³/s,表明 280℃ 键合情况下,可以形成很好的键合结果。

表 3 280℃ 时铜锡键合样片氦气泄露检测

Tab. 3 Helium leakage rates of Cu/Sn alloy at 280℃

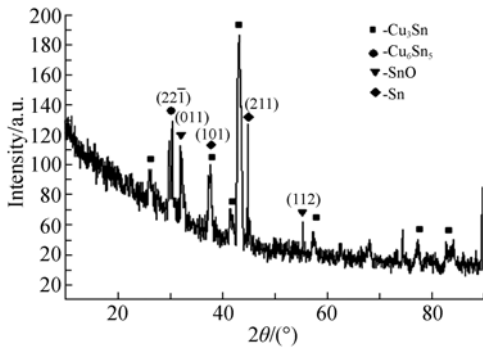
No.	氦气泄漏率(Pa·cm ³ ·s ⁻¹)
1	2.8×10 ⁻⁴
2	2.6×10 ⁻⁴
3	2.6×10 ⁻⁴
4	3.4×10 ⁻⁴
5	2.4×10 ⁻⁴

铜锡共晶键合效果通过 XRD 分析进行测试。测试用金属间化合物(IMCs),面积为 10×10 mm。A 组和 B 组熔融铜/锡合金的 XRD 分析如图 7 所示。



(a) 试验条件为 250°C

(a) at 250°C



(b) 试验条件为 280°C

(b) at 280°C

图 7 铜锡合金 XRD 分析图

Fig. 7 X-ray diffraction patterns for the Cu-Sn alloy

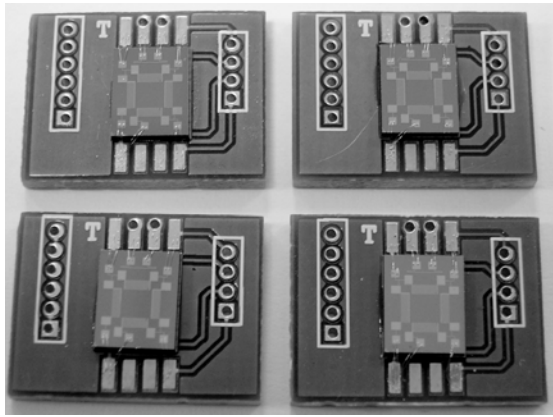


图 8 传感器样片

Fig. 8 Photo of sensor

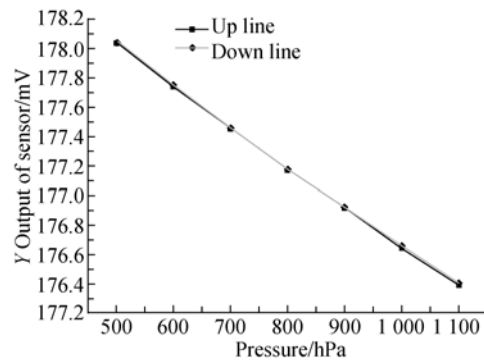


图 9 传感器输出特性曲线

Fig. 9 Output test curve of the sensor

3 性能分析

随机选择划片后的制作好的气压传感器进行测试,传感器样品如图 8 所示。输入电压为 5 V, 室温情况下的特性曲线如图 9 所示。线性度为:

$$\text{Linearity} = \frac{|\Delta y_{\max}|}{y_{fs}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中: y_{fs} 是满量程输出, Δy_{\max} 是拟合值与真实值之间的最大差值。根据图 7 中的数据,测试气压传感器的线性度为 1.48%。迟滞误差为:

$$E_{\text{hysteresis}} = \frac{|\Delta y_{H\max}|}{2 \times y_{fs}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中: $\Delta y_{H\max}$ 是传感器测试上行程与下行程的最大差值。根据图 7 数据计算得到测试气压传感器的迟滞大约 0.49%, 传感器灵敏度为 $2.7 \mu\text{V}/\text{hPa}$ 。尽管线性度较大,但基于铜锡合金的圆片级键合封装方法用于气压传感器的制备仍然很有效。线性度的问题可以通过改变应变检测材料得到解决。

4 结论

本文基于电镀铜锡合金研究了一种用于绝压气压传感器的圆片级气密封装方法。介绍了气压传感器制作工艺,研究了铜锡合金电镀参数以及完成气密封装的键合温度参数。实验结果表明:在静态压力为 0.02 MPa,保持 20 min,280°C 加热问题条件下可以得到圆片级键合效果,平均剪切力强度为 9.32 MPa。通过 XRD、X 射线以及氦气泄露检测验证了圆片级键合用于气压传感器制备的有效性。对圆片级气密封装方法制备的气压传感器样品的特性进行了测量。结果表明:气压传感器的线性度为 1.48%,迟滞误差为 0.49%,灵敏度为 $2.7 \mu\text{V}/\text{hPa}$ 。本文方法可以很好地实现绝压气压传感器的圆片级气密封装。

参考文献:

- [1] NIKLAUS F, ANDERSSON H, ENOKSSON P, *et al.*. Low temperature full wafer adhesive bonding of structured wafers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 92: 235-241.
- [2] SANTERI T, SAMI F. Free-standing SU-8 microfluidic chips by adhesive bonding and release etching [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 120:408-41.
- [3] PANG C, ZHAO Z, DU L D, *et al.*. Adhesive bonding with Su-8 in a vacuum for capacitive pressure sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147: 672-676.
- [4] ZHANG W Y, LABUKAS J P, TATICLUCIC S, *et al.*. Novel room-temperature first-level packaging process for microscale devices [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 123-124: 646-65.
- [5] SUN W, IVEY D G. Microstructural study of co-electroplated Au/Sn alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36:757-766.
- [6] HE A Q, LIU Q, IVEY D G. Development of stable, non-cyanide solutions for electroplating Au-Sn alloy films [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2006, 17: 63-70.
- [7] KIM J Y, YU J, LEE J H, *et al.*. The Effects of Electroplating Parameters on the Composition and Morphology of Sn-Ag Solder [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(12):1459-1464.
- [8] TSUTOMU S, MASAMOTO T, YASUhide O. Intermetallic compound formation between lead-free solders (Sn) and Cu or Ni electrodes [J]. *Materials Letters*, 2007, 61: 2093-2095.
- [9] KAZUO Y, SHUICHI K, KENGO M, *et al.*. Development of Cu-Sn alloy plating with superior excellent sliding characteristics and corrosion resistance [J]. *Furukawa Review*, 2011, 40: 8-11.
- [10] MOTOHIRO Y, KOTA K, MASATAKA H, *et al.*. A superelastic nanocrystalline Cu-Sn alloy thin film processed by electroplating [J]. *Materials Letters*, 2008, 62: 4473-4475.
- [11] YANG M, LI M Y, WANG L, *et al.*. Growth behavior of Cu₆Sn₅ grains formed at a Sn₃.5Ag/Cu interface [J]. *Materials Letters*, 2011, 65: 1506-1509.
- [12] HIDEAKI T, TETSURO N, KAZUHIRO N. Epitaxial growth of Cu₆Sn₅ formed at Sn-based lead-free solder/non-textured polycrystalline Cu plate interface [J]. *Materials Letters*, 2009, 63: 2687-2690.
- [13] RONG Y B, CAI J, WANG S D, *et al.*. Low Temperature Cu-Sn Bonding by Isothermal Solidification Technology [C]. *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP)*, Beijing, 2009: 96-98.
- [14] CHENG R, JIANG K W, L X X. Enhanced solder joint bonding strength of electronic packaging with electrowetting effect [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88: 3244-3248.
- [15] YU D Q. Development of reliable low temperature wafer level hermetic bonding using composite seal joint [J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52: 589-594.

作者简介:



杜利东(1980—),男,山西大同人,博士,助理研究员,2002年于西安电子科技大学获得学士学位,2010年于中国科学院电子学研究所获得博士学位,主要从事微传感器系统与集成技术、无线传感器网络方面的研究。E-mail: lddu@mail. ie. ac. cn



赵湛(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事基于MEMS技术的新型微传感器及系统,无线网络集成微传感器技术等方面的研究工作。E-mail: zhaozhan@mail. ie. ac. cn