

金锡键合在薄膜体声波滤波器晶圆级封装中的研究

金中¹,张基钦²,吕峻豪¹,阮文彪²,刘娅¹,甄静怡¹,孙明宝¹,孙彦红¹

(1. 中电科芯片技术(集团)有限公司,重庆 400060;2. 厦门云天半导体科技有限公司,福建 厦门 361026)

摘要:薄膜体声波滤波器(FBAR)作为一种无源、体积小和耐功率高的器件,被广泛应用于射频信号处理中。晶圆级气密封装作为小型化封装的代表,在各种高可靠性应用场景中占据重要地位。金-金键合和金-锡键合被广泛应用于薄膜体声波滤波器的气密性晶圆级封装中,但金-锡键合在工艺上更易实现。该文针对金-锡键合在气密性晶圆级封装中的应用进行了研究,在保证键合强度的情况下制作了3 GHz滤波器样品,其性能测试一致性良好,可靠性达到要求。

关键词:薄膜体声波滤波器;晶圆级封装;金锡键合

中图分类号: TN384; TN65; TN305.94 **文献标识码:**

Research on Au-Sn Bonding for Wafer-Level Packaging of FBAR Filters

JIN Zhong¹, ZHANG Jiqin², LYU Junhao¹, RUAN Wenbiao², LIU Ya¹, ZENG Jingyi¹,
SUN Mingbao¹, SUN Yanhong¹

(1. CETC Chips Technology Inc, Chongqing 400060, China;

2. Xiamen Sky Semiconductor Technology Co. Ltd., Xiamen 361026, China)

Abstract: As a passive, small-sized, and high-power-tolerant device, the film bulk acoustic resonator (FBAR) has been widely used in radio frequency signal processing. Wafer-level hermetic packaging represents miniaturized packaging and plays a critical role in various high-reliability applications. Both gold-gold and gold-tin bonding are widely used in FBAR hermetic wafer-level packaging. However, gold-tin bonding has a more straight forward implementation process. Therefore, this study investigates the application of gold-tin bonding in hermetic wafer-level packaging. Under the condition of ensuring bonding strength, 3 GHz filter samples were produced. The experimental results demonstrated identical performances with all samples passing the reliability tests.

Key words: FBAR filter; wafer level package; Au-Sn bonding

0 引言

薄膜体声波滤波器(FBAR)是一种采用电极/压电薄膜/电极的三明治结构的射频器件。新一代射频前端模组将滤波器高度集成化,实现了更高的性能和更小的体积。薄膜体声波滤波器的晶圆级封装减少了芯片上的元件数量,减小了滤波器体积,进而降低了整体成本,并提高了设备的可靠性。薄膜体声波滤波器的晶圆级封装通常分为金金键合和金锡键合两种方式。本文通过对比金金键合和金锡键合工艺,得出金锡键合更适合薄膜体声波滤波器的晶圆级封装。通过工艺分析和软件仿真找到金锡键合研究的关键难点,并通过优化工艺参数和锡层厚度解决此难点。制作3 GHz

滤波器实物,并通过了相关的可靠性测试。

1 键合金属的比较与选择

1.1 金属键合的基本流程

金金键合和金锡键合都是半导体行业中常用的键合方法^[1]。与金金键合工艺类似,金锡键合仅在密封环金属制备工艺上增加了一层电镀锡,如图1中第二步工艺。这里以Via First工艺流程为例,简单介绍金锡键合在薄膜体声波滤波器晶圆级封装中的工艺步骤。首先,在TSV盖帽晶圆上电镀一层厚约5 μm的键合金属,该键合金属层除了完成气密封外,还要进行信号连通。其次,在功能晶圆上同样制作一层厚约5 μm的键合金属层,热压键

收稿日期:2023-01-12

作者简介:金中(1981-)男,北京市人,硕士,高级工程师。通信作者:阮文彪(1979-),男,江西省新干县人,博士,高级工程师。

合金属以达到密封和连通的功能。最后，盖帽晶圆露铜，制作外部焊盘，形成一个完整的器件。

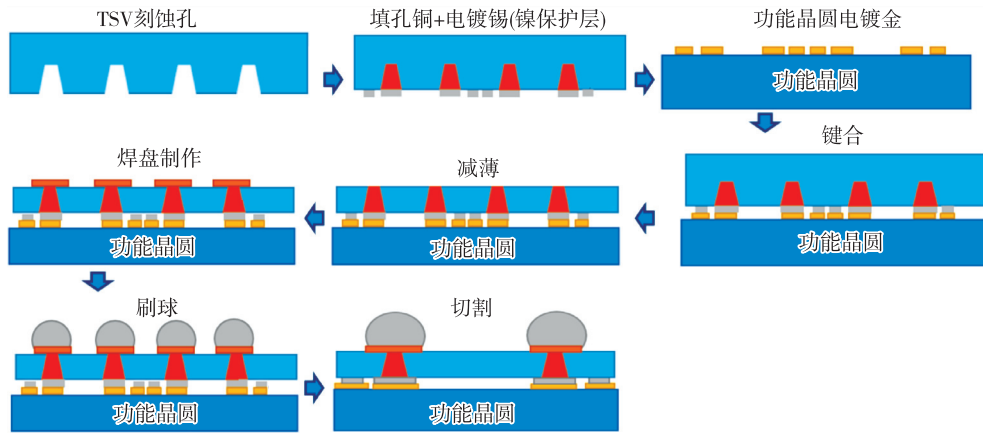


图1 金-锡键合封装的薄膜体声滤波器流程图

1.2 键合金属的选择

应用在滤波器封装中的键合金属主要为金锡和金金。表1为两种键合技术的参数对比^[2]。由表可见，金金键合对整个键合面粗糙度的要求较高，必须进行化学机械抛光(CMP)工艺，其粗糙度小于10 nm才能满足工艺要求。同时，金金键合压力达到4 MPa，这对键合设备的压力水平和台盘本身的压力一致性要求较高^[3]。

表1 金属键合参数对比表

键合材料体系	键合温度/℃	键合压力/MPa	键合面粗糙度
金锡	280	1	<0.1 mm
金金	380	4	<10 nm

金锡键合在整个制程中要求相对较低。首先，采用电镀工艺可以控制锡层厚度，价格相对较低；其次，由于锡在键合过程中处于熔融状态，本身的流动性可以弥补整晶圆在制备过程中的翘曲，且不需要CMP等价格相对较高的制程；最后，其键合温度相对较低，有利于控制晶圆翘曲及提高生产效率。

综上所述，对比于金金键合，金锡键合工艺的制程价格较低，生产效率相对较高，在晶圆级封装中优势明显。

2 金锡键合在晶圆级封装中的风险分析

2.1 控制金锡间化合物 Au₅Sn 的生成

金锡键合利用金与锡的熔点差异，当温度高于锡的熔点 232 °C 时，锡开始融化并在金界面发生扩散，快速形成金锡的共晶相，冷却后成为稳定的金锡共晶体。

界面金属间化物的性能是决定金锡键合可靠

性和质量的主要因素^[4]。金属间化物的组合由键合材料的比例以及键合条件决定。通过查表可知间化物的生成焓和结合能。表2为金锡结合能和生成焓参数值。

表2 金-锡结合能和生成焓

合金	结合能/eV	生成焓/eV
AuSn	-4.143 0	-1.811
AuSn ₂	-4.129 0	-1.786
AuSn ₄	-4.057 0	-1.826
Au ₅ Sn	-3.956 3	-2.078

若生成焓越小，则反应越易发生；若结合能越低，则结构越稳定。由表2可知，Au₅Sn的生成焓最小，反应更易产生；其结合能最大，结构最不稳定。因此，在整个工艺过程中要避免 Au₅Sn 生成。

2.2 封装结构中应力最大点

键合工艺中应力过大将导致键合层冷却后出现分层缺陷。本文采用COMSOL软件分析键合工艺完成后封装结构中应力最大的位置，如图2-3所示。滤波器器件尺寸为1 mm×1 mm。

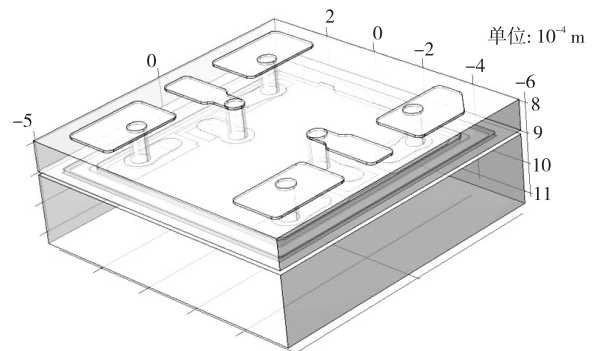
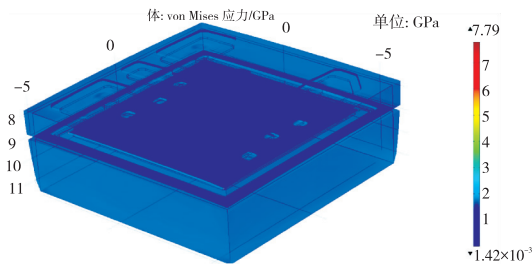
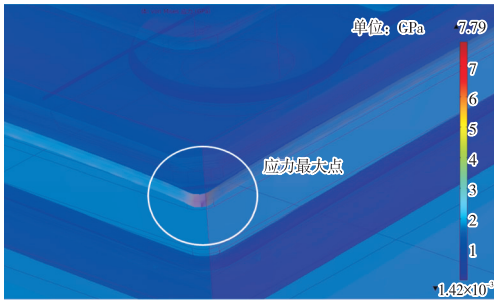


图2 晶圆级封装三维模型



(a) 整体应力分布



(b) 应力集中区域

图 3 金-锡键合应力分布

由图 3 (b) 可知,金-锡键合的应力最大值为 7.79 GPa,位于密封环转角的金锡交界处。下面将重点关注密封环的可靠性问题^[5]。

3 工艺测试结果及优化

3.1 工艺测试结果

在键合工艺设计上充分考虑控制间化物的生成以及消除整个键合过程中的应力,工艺方案设置:键合程序的最高温度设置在 280 °C。采用阶梯形升温方式逐步完成。锡层熔化后,保持整个键合过程中键合压力一直为 13 kN;在降温过程中,保证应力能充分释放。图 4 为金-锡键合工艺测试温压曲线。

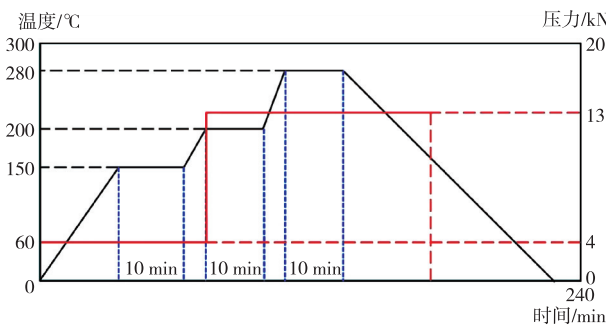


图 4 金-锡键合工艺测试温压曲线

采用 UHAST^[6]方案验证键合工艺的有效性。若测试器件存在分层、漏水的缺陷,可通过红外进行检查。经检验,工艺测试后所有的器件都有漏水现象,如图 5 所示。

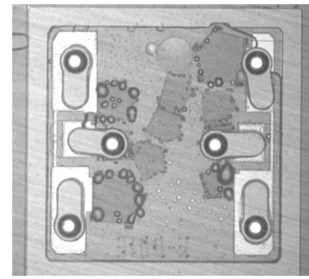
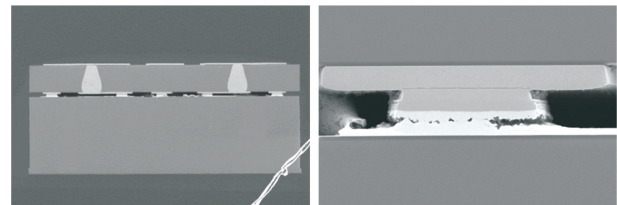


图 5 UHAST 试验后器件漏水

3.2 键合工艺优化过程

为了明确改进方向,对进水器件进行了切片分析。经分析,发现在密封环的位置出现了金锡层不连续的缺陷,空洞面位于 Ni_xSn_y 和 Au_xSn_y 间化合物之间,导致整个器件进水,如图 6 所示。



(a) 整体结构 (b) 密封环金锡层不连续

图 6 UHAST 进水器件切片

针对上述问题,在工艺流程中做了如下优化:

1) 对温度和压力进行优化。设置压力增加到 15 kN,温度降低到 270 °C,以确保整个键合过程中具有足够的压力^[7]。

2) 增加锡层厚度。优化后的锡层厚度大于 5 μm,保证了金锡共晶时仅有少量的 Au_5Sn 生成。

图 7 为优化后的金-锡键合温压曲线。

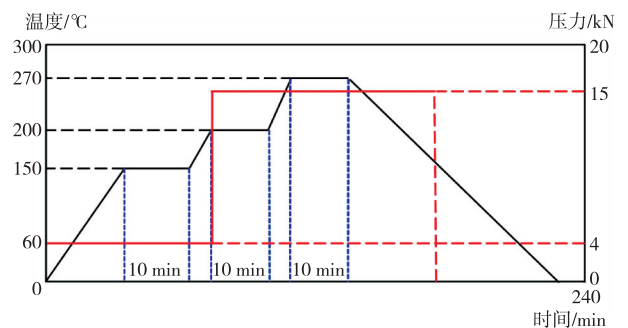
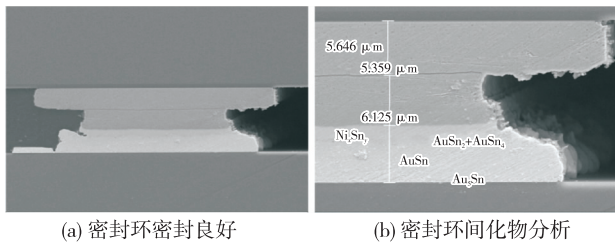


图 7 优化后金-锡键合温压曲线

采用优化后的方案对滤波器进行晶圆级封装,并对器件进行切片分析。由图 8(a)可知,器件未出现连续性空洞,密封环间化合物界面位置共晶效果良好。整体间化合物厚度约 6 μm,底部间化合物以 Au_5Sn 为主,中间区域间化合物以 $AuSn$ 为主(见图 8 (b)),靠近镍的区域为 $Ni_xSn_y + AuSn_2 + AuSn_4$,这与 Au_5Sn 较少的预期相符。

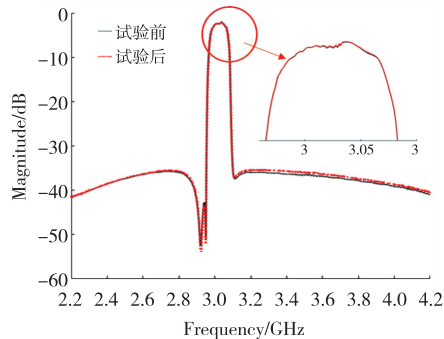


(a) 密封环密封良好 (b) 密封环间化合物分析

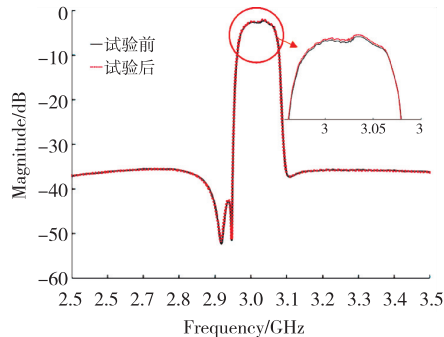
图8 优化后密封环切片分析

4 样品器件可靠性验证及性能测试

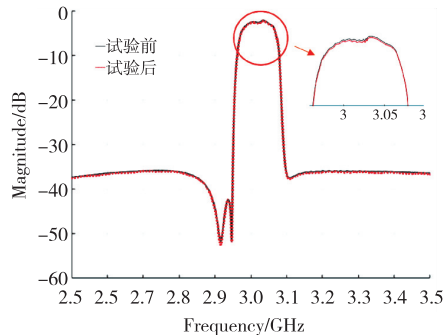
按照上述优化工艺制作了 3 GHz 薄膜体声波滤波器样品。为了验证器件的可靠性,参考同类器件的试验项目^[8]对其进行可靠性试验,并对比了试验前后器件的电性能变化^[9],以此评估试验对器件可靠性的影响。图9为可靠性试验前后器件电性能测试结果。



(a) 300次温度循环试验前后性能对比无明显变化



(b) 湿热试验前后性能对比无明显变化



(c) 回流焊试验前后性能对比无明显变化

图9 可靠性试验前后芯片电性能测试结果

经测试,金锡键合工艺的可靠性^[10]较好。特别是在经过 300 次温度冲击试验后,器件性能依然正常,远超过一般的考核标准。

5 结束语

本文介绍了金锡键合在薄膜体声波滤波器气密性晶圆级封装中的研究。通过增加锡层的厚度和键合压力,提升了键合工艺的可靠性,且未出现分层、漏水等缺陷。通过该工艺制作的 3 GHz 薄膜体声波滤波器,其性能指标和可靠性均达到相关项目要求,表明金锡键合工艺能够运用在滤波器的气密性晶圆级封装中。

参考文献:

- [1] 肖卫平,朱慧珑.应用于三维集成的晶圆级键合技术[J].微电子学,2012,42(6):836-841.
- [2] 王喆焱.微系统设计与制造[M].2版.北京:清华大学出版社,2015:112-113.
- [3] 卢丹丹,米佳,彭兴文,等.声表面波器件晶圆键合工艺研究[J].压电与声光,2020,42(3):361-364.
LU Dandan, MI Jia, PENG Xingwen, et al. Study on wafer bonding technology of SAW devices[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2020,42(3):361-364.
- [4] 吴焱,刘鹏飞,姜理利.面向异质集成的 Au-Sn、Au-In 晶圆级键合[J].固体电子学研究与进展,2021,41(4):246-250.
- [5] 潘代强,周洲,姜喆.应用于一体化芯片晶圆级集成的铜孔表面平坦化工艺设计与实现[J].传感器技术与应用,2023,11(6):324-331.
- [6] 徐罕,朱亚军,戴飞虎,等.晶圆级封装中的垂直互连结构[J].电子与封装,2021(10):83-90.
- [7] 何洪涛.一种基于 BCB 键合技术的新型 MEMS 圆片级封装工艺[J].MEMS 器件与技术,2010,47(10):629-634.
- [8] 唐代华,金中,司美菊,等.SAW 滤波器 WLP 封装中腔体抗模压塌陷研究[J].压电与声光,2021,43(1):84-87.
TANG Daihua, JIN Zhong, SI Meiju, et al. Study on cavity collapse resisting molding pressure in WLP of SAW filter[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2021,43(1):84-87.
- [9] 冷俊林,杨静,毛海燕,等.一种声表面波器件的新型晶圆级封装技术[J].压电与声光,2011,33(4):517-519.
- [10] 刘娅,孙科,马晋毅,等.C 波段 WLP 薄膜体声波滤波器的研制[J].压电与声光,2021,44(2):260-263.
LIU Ya, SUN Ke, MA Jinyi, et al. Development of C band WLP packaged FBAR [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2021,44(2):260-263.