

MEMS封装技术

陈一梅, 黄元庆

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 介绍了微机电 (MEMS) 封装技术, 包括晶片级封装、单芯片封装和多芯片封装、模块式封装与倒装焊 3 种很有前景的封装技术。指出了 MEMS 封装的几个可靠性问题, 最后, 对 MEMS 封装的发展趋势作了分析。

关键词: 微机电封装; 单芯片; 多芯片; 模块; 晶片级; 倒装焊

中图分类号: TN305.94; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2005)03-0007-03

Technologies of MEMS packaging

CHEN Yimei, HUANG Yuan-qing

(Dept of Mech and Elct Engn, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract The technologies of MEMS packaging are introduced, including three promising technologies: wafer level packaging, single-chip packaging and multi-chip packaging, modular MEMS packaging and flip-chip bonding for MEMS packaging. Then several reliability issues in MEMS packaging are pointed out, and a forecast is given for its future trends.

Key words: MEMS (microelectromechanical system) packaging; single-chip; multi-chip; modular; wafer level; FCB (flip-chip bonding)

0 引言

微机电系统是指包括微传感器、微致动器 (亦称微执行器)、微能源等微机械基本部分以及高性能的电子集成电路组成的微机电器件或装置。可以说微机电系统是一种获取、处理信息和执行机械操作的集成器件。它是微机械学、微电子学、自动控制、物理、化学、生物以及材料等多学科、高技术的边缘学科和交叉学科^[1]。

经过十几年的发展, MEMS 芯片已经相当成熟, 但是, 很多芯片没有得到实际应用, 其主要原因就是没有解决封装问题。虽然 MEMS 封装采用许多与微电子封装相似的技术, 但不能简单地将微电子封装技术直接用于 MEMS 器件的封装中去。MEMS 封装的功能包括了微电子封装的功能部分, 即原先的电源分配、信号分配和散热等。但由于 MEMS 的特殊性、复杂性和 MEMS 应用的广泛性, 对封装的要求是非常苛刻的, 封装的功能还应增加如下几点:

(1) 应力: 在 MEMS 器件中, 微米或微纳米尺度的零部件其精度高但十分脆弱, 因此, MEMS 封装应产生对器件最小的应力;

(2) 高真空: 可动部件在“真空中”, 就可以减小摩擦, 达到长期可靠工作的目标;

(3) 高气密性: 一些 MEMS 器件, 如, 微陀螺必须在稳定的气密条件下才能可靠长期地工作, 有的 MEMS 封装气

密性要达到 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$;

(4) 高隔离度: MEMS 常需要高的隔离度, 对 MEMS 射频开关就更为重要。为了保证其他干扰信号尽可能小, 就要求对传感器的某些部位进行封装隔离。否则, 干扰信号叠加在所采样的有用信号上将使 MEMS 的正常功能难以发挥;

(5) 特殊的封装环境和引出: 某些 MEMS 器件的工作环境是气体、液体或透光的环境, MEMS 封装就必须构成稳定的环境, 并能使气体、液体稳定流动, 使光纤输入低损耗, 高精度对位的特性等^[2,3]。

MEMS 封装的特殊性大大增加了 MEMS 封装的难度和成本, MEMS 封装成本占整个 MEMS 成本的 50% ~ 90%, 成为 MEMS 发展的瓶颈。目前, 国内 MEMS 封装技术比较落后, 必须予以重视, 并积极发展 MEMS 封装技术。

1 MEMS 封装技术

MEMS 封装通常分为芯片级封装、器件级封装和系统级封装这样 3 个层次。

1.1 晶片级封装

许多微机械器件需要进行晶片贴合, 制作出电极/紧凑的腔体。同时, 晶片键合还完成了一级封装^[2]。几种成熟的键合技术比较如表 1。

表 1 几种键合技术的比较

Tab 1 Comparison of some bonding technologies

键合方法	键合过程的温度 ()	夹层厚度 (μm)	机械强度 (MPa)
阳极键合	180 ~ 500	无需	50
硅-硅键合	700 ~ 1000	无需	
表面活化硅-硅键合	20(室温)	无需	
金-硅共熔键合	400	2 ~ 25	200
铝-硅共熔键合	600	2	50
玻璃封接键合	400 ~ 650	20	50
冷压焊键合	20	0.12	50

阳极键合技术已经被广泛应用,可将硅与玻璃、金属及合金在静电作用下键合。当在极间施加电压(200 ~ 1000V,视玻璃厚度而定),在键合温度(180 ~ 500)下,与玻璃键合强度可达到玻璃或硅自身的强度量值甚至更高。硅-硅的互连也能用阳极实现,但需中间夹层,在其中一个抛光的硅片表面上沉积 2 ~ 4 μm 7740°玻璃膜,电流密度保持 $10\text{A}/\text{m}^2$,温度稳定在 450 ~ 550 即可实现良好的封接,键合强度可达到硅或绝缘体自身的强度量级,且气密性好。但直接键合的温度处理过程难以控制。而在真空环境下采用 A 离子束对已处理过的硅表面清洁,在室温、真空条件下便能实现牢固的键合。玻璃封接键合是采用丝网印刷、喷镀、淀积或挤压等技术将纯度高、含钠低的悬浮在酒精溶液中的超精细玻璃粉置于一对被键合的界面而实现封接,封接后表面气密好,并有较高的机械强度。

1.2 单芯片封装

在一块芯片上制作保护层,将易损坏的器件和电路屏蔽起来以避免环境对其造成不利的影 响,并制作出有源传感器/制动器部分的通路,并实现与外部的电接触。

1.2.1 金属封装

金属封装通常是在多层 RF 模数和综合电子线路中,因为金属封装有好的热散性,能够屏蔽电子辐射。金属外壳一般不能直接安装各种元器件,大多通过陶瓷基板完成元器件的安装和互连,然后将固定好元器件的基板与底座粘接,最后是封帽工艺。金属外壳的封帽具有特殊的重要性,因为要求高可靠性,封装必须要求气密性,达到标准的水气含量。在封帽工艺中,封接材料的熔点必须足够低或利用局部加热方法,使元器件及其焊点免受高温的影响。图 1 是金属封装的几种类型。

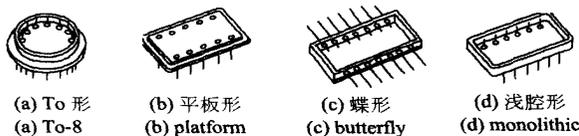


图 1 金属封装的几种类型

Fig 1 Several types of metal packaging

1.2.2 陶瓷封装

用陶瓷封装质量轻,可大量生产和成本低,可轻易做到气密封装,而且,多层陶瓷封装能使器件尺寸变小,成本降低,同时,能集成 MEMS 和其他元件的信号。陶瓷封装的可靠性中有几个问题:陶瓷会在烧结后“压缩”,这将使要求气密性的器件失效。陶瓷和金属材料的粘接强度比陶瓷和陶瓷的要弱;在高温烧结后,包装器件的内部金属可能散开以致器件失效。

1.2.3 多薄膜封装

一般多薄膜封装有 2 种技术,一种是低温烧结陶瓷,大约 25 μm 的薄聚合物压叠在一起,只有开端层需要烧结;另一种用的也是聚合物,用丝网印刷,厚度为 1 ~ 2 μm 。聚合物的介电常数是 2.8 ~ 3.2。

1.2.4 塑料封装

塑料封装一般分为前铸模和后铸模,如图 2、图 3 所示。而前铸模又分为注射铸模和转移铸模。有凹槽的和真空空气密的 MEMS 封装用的是注射铸模,而普通的 IC 封装用的是转移铸模。前铸模和后铸模的区别是后铸模有个空腔,并在键合后密封上一个盖板来保护内部结构。运用塑料封装成本低、可靠性高。但不能用在气密封场合,在高温和潮湿的环境下,塑料封装会分层和开裂^[4]。

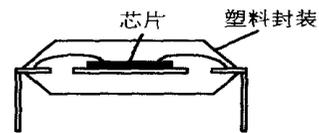


图 2 塑料前铸模封装

Fig 2 Formermolded plastic packages



图 3 塑料后铸模封装

Fig 3 Postmolded plastic packages

上述 4 种通常是采用标准预成型封装。封装过程是:首先,将芯片安装在预成型封装中,用引线键合实现芯片和封装引线之间的电气连接,然后,填充化合物材料或用特殊的盖板将封装封好,同时,保留有源芯片区。

1.3 多芯片封装 (MCM)

MCM 技术提供了一种诱人的集成和封装 MEMS 器件的途径,它具有在同一衬底上支持多种芯片的能力,而不需要改变 MEMS 和电路的制造工艺,其性能可以做到最优而无需做出妥协^[6]。根据衬底类型和芯片间互连方法的不同,MCM 有多种不同的形式。常用的衬底材料包括陶瓷、硅和作印刷板用的层压板。芯片可粘附在衬底表面或嵌入衬底。芯片间互连是通过各种方法来实现,如,引线键合、凸点倒扣焊或直接金属化。MCM 除明显的尺寸和质量优

势外,芯片之间距离的缩短使低噪声连线成为可能,从而改善系统性能。

Butle 等人采用的高密度互连的 MCM 封装技术,这种方法是将芯片嵌入衬底上的腔体中,在元件顶部制作一个薄膜互连结构。Morrissey 等人演示了微系统多芯片封装的另一个例子,是用塑料无引线芯片载体 (PLCC) 制造的叠层实现了微系统的三维封装。PLCC 是一个带有墙的腔体的芯片载体,芯片置于腔体中心的叶片上,引线键合完成互连,腔体填充环氧密封材料以保护芯片及引线键合的引线,不同芯片之间的互连是通过表面镀铜/镍/金,然后用准分子激光器光刻出互连图形来实现的。

1.4 模块式 MEMS^[1,5,6]

模块式 MEMS 是德国 IM 实验室 Reichl 和 Grosser 二人提出的概念。源于 CSP 和立体集成,最重要的是微系统具有各种不同物理参数所需要的接口。模块式 MEMS (MOMEMS) 和传统的微系统不同的是建立了标准的批量生产、降低成本、缩短进入市场的时间。

MOMEMS 设计依赖各种不同的微加工和精密工程。MOMEMS 要求微系统尺寸紧凑,封装可以向三维自由扩展。MOMEMS 的“外壳”的创新形式能完成不同功能的同时实现尽可能高的封装密度。

1.5 倒装焊技术^[7-10]

近年来,出现了许多新型的封装技术,其中,比较有代表性的除了上面介绍的多芯片封装和模块式封装,还有采用倒装焊 (FCB) 的 MEMS 封装。倒芯片封装是芯片和基板的直接安装互连技术。FCB 是芯片朝下,使芯片上的焊区和基板上的焊区互连。它具有电性能好、芯片安装密度高、高 I/O 数和低成本的特点,而且,大大简化了互连工艺,快速、省时,成为了 MEMS 封装中一种简单和具有成本效益的方法。香港科技大学已经用倒装芯片 (FOCB) 技术封装压力传感器,将激励电路倒装焊在同一块挠性基板上。Patrick 等人采用独特的倒封装密封了 RF MEMS,经过测试效果良好。

倒芯片封装有个好处是芯片本身提供了 MEMS 结构的封盖,大量的倒封装接口的方法已经在许多文献中描述到^[1]。因为倒装焊是芯片朝下,很适合于光电器件的封装。在光开关的显微镜中对直光路需要精确放置和对位,而采用倒芯片封装则能够成功地保证光路对准,x、y、z 三轴都能达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的后键合精度。而这 $\pm 1 \mu\text{m}$ 足够用来光路和波导对准。这种转换和放置方法降低了装配的复杂性,加速了 MOMEMS 器件的发展周期。

2 MEMS 封装中存在的问题^[1,2,5]

MEMS 器件设计的初期若能考虑到封装和测试,其成本和时间都将大大减少,同时,还能提高可靠性。下面阐述 MEMS 封装将面对的技术问题:

(1) 粘合

毛细作用、静电吸附和直接化学键合都是导致粘合的

因素,像在悬臂梁和基底之间就会出现粘合。腐蚀牺牲层很便利,但这项技术也提高粘合和破裂的几率。

(2) 应力

在薄膜的工艺过程中,会出现残余应力,这种应力在高温退火能被释放出来。CTE 的不同和工艺过程器件的压缩都会产生应力,而用低杨氏模量的材料能有效降低残余应力的同时提高器件性能。

(3) 环境应力造成失效

MEMS 中机械运动部件易因热循环、振动、摆动、潮湿、辐射等应力作用而失效。

(4) 划片

在划片过程中,需冷却液沿着划分路线来冲洗微小颗粒杂物以避免表面划伤。主要参数应考虑切速、切深、刀头的尺寸、冷却液的流速和角度方向等。

(5) 把持

在 MEMS 中移动芯片需要用夹子夹住芯片的边缘然后放到确切的位置,所以,确切定位仪器的设计将会增强工艺能力和 MEMS 后封装工艺的可靠性。

(6) 圆片级封装

用于键合的移动仪器是圆片级封装的不良因素,如果考虑移动和污染应在制作工艺的外部制作一个防护罩。

(7) 除气

树脂封装会产生湿度和有机气体,将导致器件的粘附和腐蚀,应去除掉。

(8) 测试

测试是 MEMS 封装的主要问题之一。在 MEMS 加工工艺的开始就得考虑每步工艺可能致命的失效,否则,成本将大大增加。

3 未来发展趋势

MEMS 技术于 20 世纪 90 年代进入商业化时代,正显示强大生命力的发展势头。随着 MEMS 的飞速发展,它的应用将更加广泛,但 MEMS 封装形式取决于很多因素,如,它的类别和用途等,但总体上,MEMS 封装未来发展趋势为:

(1) MEMS 封装会更大程度上借鉴和引用微电子封装技术和经验开发出合适的封装形式,这是降低成本的一个有效的途径;

(2) 微型化是 MEMS 封装发展的趋势,如, CSP (芯片规模封装) 体积小可容纳的引脚多、电性能和散热性能好、成本较低, CSP 能和 SMD 工艺兼容使系统更小型化;

(3) MEMS 封装会向着集成化、标准化和低成本方向发展。如, MOMEMS 的前景比较看好,因为 PLCC 采用的工艺相对比较简单、比较成熟。MOMEMS 的发展将使封装可批量生产,缩短进入市场时间;

(4) MEMS 可能出现高灵活和高性能的不同于传统 IC 封装的全新封装,包括封装的材料、工艺等。MEMS 类型的多样性和复杂性,加上小型化趋势将迫使 MEMS 发展其特殊的封装。

(下转第 12 页)

和减法放大器是为了提高插值的分辨力。若采用 A/D 转换,则高频调制改为采样保持,采样频率 f_{H} 应满足 $f_{\text{H}} = n f_s$ ($f_{\text{H}} > f_s$),即可达到插值细分的目的。

4 实验结果

用 CL128 型 128 位线阵 SSPA ($p = 50 \mu\text{m}$) 图像传感器将衍射光信号转换成数字信号送入计算机,分别用传统方法(用计算机通过软件编程测量)和插值细分方法对标称值为 $213 \mu\text{m}$ 的细丝进行了测量,测量结果如表 1。表 1 中,插值细分方法 $f_s = 32 \text{ kHz}$, $f_{\text{H}} = n f_s = 320 \text{ kHz}$ (取 $n = 10$)。

表 1 测试结果

Tab 1 Test result

测量方法	次数	平均值 (μm)	误差值 (μm)	相对误差 (%)
传统方法	10	209.65	3.35	1.57
插值细分方法	10	213.45	0.45	0.21

如果用传统方法直接对两暗纹周期中的视频信号 $V_0^*(t)$ 的脉冲个数计数来测量 s ,则测量分辨力只有 $50 \mu\text{m}$ 。采用插值细分方法观察 $V_0(t)$ 波形很平滑,其相位有所延迟,但其暗纹周期不变, V_{out} 是经采样频率为 $f_{\text{H}} = n f_s = 320 \text{ kHz}$ (取 $n = 10$) 的采样保持电路处理后的输出信号, V_{out} 波形的暗纹周期与 $V_0(t)$ 完全一样,用 V_{out} 测暗纹周期,就使图像传感器的分辨力提高 n 倍,达到 $50 \mu\text{m} / 10 = 5 \mu\text{m}$ ($f_{\text{H}} = 320 \text{ kHz}$),使其测量精度大幅度提高。

5 结论

在激光衍射测微一类应用中,通常是衍射图样的光强分布 $I(x)$ 转换成视频信号输出,通过检测视频信号中

相邻极小幅值点的间距来确定衍射图样暗纹间距 s_0 。如果直接对两暗纹周期中的视频信号 $V_0^*(t)$ 的脉冲个数计数来测量 s 的周期,则测量分辨力只有 p 。利用插值细分的方法能够更准确地找到相邻极小幅值点之间的相对距离,如果取插值采样频率 f_{H} 是图像传感器工作频率 f_s 的 n 倍,那么,图像传感器的分辨力就提高 n 倍,达到 $\frac{p}{n}$,使其测量精度更为精确。实验表明:该方法完全能应用于实际测量,其测量精度不受图像传感器像元中心距大小的限制。

参考文献:

- [1] 孙定源,周桂贤,郑德锋. 衍射法测量细丝直径的研究 [J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 24 - 27.
- [2] 张凤生. 提高细丝衍射图样暗纹间距测量准确度的数据处理方法 [J]. 计量技术, 2000, (7): 30 - 33.
- [3] 刘义族. 提高非接触式细丝直径测量精度的技术和方法探讨 [J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2002, 22(2): 60 - 62.
- [4] 张士勇. 电荷耦合图像传感器在细线直径测控系统中的应用 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2003, (4): 31 - 32.
- [5] 范志刚. 光电测试技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 200 - 206.
- [6] 王跃科,叶湘滨,黄芝平,等. 现代动态测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 12 - 14, 136 - 182.

作者简介:

贺国权 (1962 -), 男, 重庆垫江人, 涪陵师范学院副教授, 主要从事信号检测与处理、开关电源的研究。

(上接第 9 页)

4 结论

MEMS 封装是 MEMS 技术开发和批量生产的关键技术之一。在 MEMS 产品概念的早期就应考虑 MEMS 封装问题, 大力开展 MEMS 封装技术的研究和开发。

参考文献:

- [1] Reichl H, Gresser V. Overview and development trends in the field of MEMS packaging [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2001 - 06 - 25.
- [2] Rameshan R, Ghaffarian R. Challenges in interconnection and packaging of microelectromechanical systems (MEMS) [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2000 - 05 - 24.
- [3] Boustedt K, Persson K, Stanneby D. Flip chip as an enabler for MEMS packaging [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2002 - 03 - 31.
- [4] Hsieh C T, Jyh-Ming Ting, Yang C, et al. The introduction of MEMS packaging technology [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2002 - 12 - 06.
- [5] Persson K, Boustedt K. Fundamental requirements on MEMS packaging and reliability [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2002 -

03 - 06.

- [6] Schuenemann M, Jan K A, Gresser V. MEMS modular packaging and interfaces [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2000 - 05 - 24.
- [7] Wilkerson P, Kranz M, Przekwas A, et al. Flip-chip hemetic packaging of RFMEMS [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2001 - 08 - 26.
- [8] Quirke C, Lecapentier G. High accuracy flip-chip assembly of MOEMS [optical switch example] [DB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2002 - 12 - 06.
- [9] Xiao Guo-wei, Chan P C H, Teng A, et al. A pressure sensor using flip-chip on low-cost flexible substrate [B/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org>, 2001 - 06 - 01.
- [10] Butler J T, Bright V M, Comois J H. Advanced multichip module packaging of microelectromechanical systems [J]. Sensors and Actuators A, 1998, 70: 15 - 22.

作者简介:

陈一梅 (1980 -), 女, 福建莆田人, 厦门大学硕士, 主要从事 MEMS 的封装研究。