

热致封装效应对 MEMS 固支梁谐振频率的影响*

李 明 宋 竞 黄庆安[†] 唐洁影

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: MEMS 器件的封装效应显著而复杂, 其中由贴片封装引起的结构热失配是封装效应的主要成因. 论文在前期封装-器件耦合行为模型的基础上, 利用激光多普勒测振仪实验验证了贴片工艺的热致封装效应对固支梁器件性能的影响. 结果表明, 贴片前后固支梁的谐振频率发生显著变化, 并沿芯片表面表现出明显的分布特征. 考虑封装效应的理论模型可以较好地预测该结果, 为 MEMS 系统的器件-封装协同设计提供理论指导.

关键词: MEMS; 封装效应; 固支梁; 谐振频率; 协同设计
EEACC: 0170J

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)01-0157-06

1 引言

40 多年来 MEMS 吸引了无数投资者的目光, 它的应用前景几乎涉及到生产和生活的每一个角落, 尽管 MEMS 产品市场不断增长, 但是 MEMS 产业化的进程却不顺利, 大量 MEMS 产品构想陷入了困境, 甚至失败^[1]. 许多阻碍 MEMS 产业化进程的因素逐渐浮现出来, 封装问题尤为关键. MEMS 封装不仅缺少标准、设计复杂, 而且因为 MEMS 可动器件本身对应力敏感, 所以由封装工艺引入的热致结构应力将显著地影响器件的性能. 该领域的研究大多利用有限元或实验考察封装基板本身的热弹性变形, 或某一特定 MEMS 器件封装后的性能偏移^[2,3], 而未针对封装效应本身的内在机理展开基础的理论建模和实验验证. 在以往的工作中^[4,5],

我们建立并实验验证了适于分析 MEMS 多层封装结构热应变分布的解析模型, 本文将以 MEMS 固支梁器件为例, 继续从实验角度验证贴片工艺的热致封装效应对 MEMS 器件的谐振频率的影响.

2 理论模型

图 1 是贴片封装后 MEMS 固支梁器件的二维模型. 利用前期工作建立的多层结构热变形模型^[4]可算得由贴片工艺引入的器件平均应变 ϵ_{av} , 它和由加工工艺引入的残余应变 ϵ_0 一起构成了固支梁的预应变. 如果该应变非负, 或大于一阶屈曲临界载荷, 则构成经典的平直梁问题; 如果小于临界载荷, 则固支梁发生预屈曲, 属于后屈曲梁问题. 后屈曲固支梁横向振动的固有频率可以由下式解出^[6]:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ \sin\lambda_1 & \cos\lambda_1 & \sinh\lambda_1 & \cosh\lambda_1 & 1 \\ \lambda_1 \cos\lambda_1 & -\lambda_1 \sin\lambda_1 & \lambda_2 \cosh\lambda_2 & \lambda_2 \sinh\lambda_2 & 0 \\ \alpha\lambda_1 \frac{2\pi(\cos\lambda_1 - 1)}{\lambda_1^2 - 4\pi^2} & -\alpha\lambda_1 \frac{2\pi\sin\lambda_1}{\lambda_1^2 - 4\pi^2} & \alpha\lambda_2 \frac{2\pi(1 - \cosh\lambda_2)}{\lambda_2^2 + 4\pi^2} & -\alpha\lambda_2 \frac{2\pi\sinh\lambda_2}{\lambda_2^2 + 4\pi^2} & \beta - \pi\alpha \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

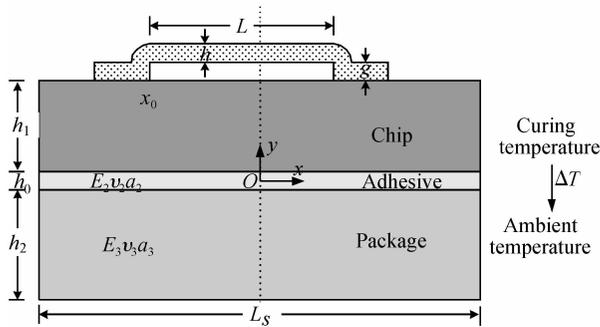


图 1 贴片封装 MEMS 固支梁器件的二维模型
Fig.1 2D model of a package MEMS device

其中 $\alpha = -\frac{8h\pi^3}{I} \left[(\epsilon_0 + \epsilon_{av}) \frac{L^2}{\pi^2} + 4 \frac{I}{h} \right]; \beta = \frac{\rho_1 \omega^2 L^4}{E'I}; \lambda_{1,2} = \sqrt{\pm 2\pi^2 + \sqrt{\pi^4 + \frac{\rho_1 \omega^2 L^4}{E'I}}}$, $E', \rho_1 = \rho h$, E, ν, h, I 和 ρ 分别是梁的杨氏模量、泊松比、厚度、惯性矩和体密度. 平直梁的固有频率可由经典梁理论获得. 特别是, 对于平直梁纵向振动的一阶固有频率, 可以应用能量法将其近似简化为^[7]:

$$f_1 = 1.028 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E'}{\rho} \left[1 + 0.295 \frac{L^2}{h^2} (\epsilon_0 + \epsilon_{av}) \right]} \quad (2)$$

* 装备预先研究基金资助项目(批准号:51308050105)

[†] 通信作者. Email:hqa@seu.edu.cn

2007-05-24 收到, 2007-08-19 定稿

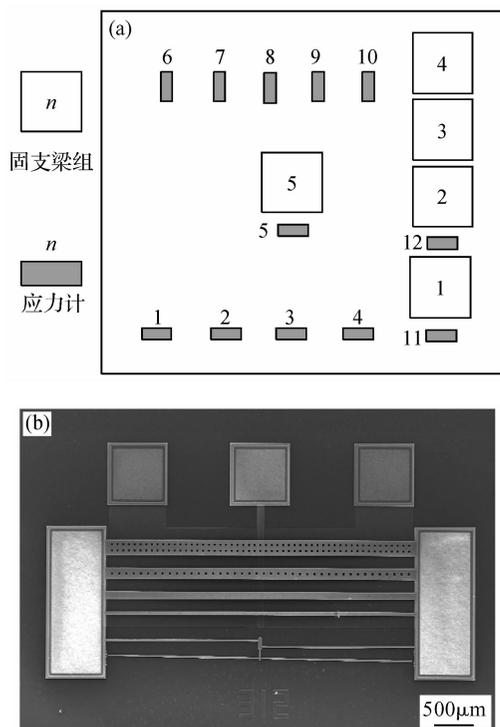


图 2 (a) 固支梁组和应力计的布局图; (b) 第 5 组梁和应力计的 SEM 照片

Fig. 2 (a) Schematic layout of the test structures; (b) SEM picture of the No. 5 test structures

从中可以看出残余应变的影响十分显著。

考虑到实际中的锚区存在一定柔度,无法提供理想固支边界条件,因此还需要在模型中计入锚区效应。已有工作中对锚区效应的考虑主要有两种途径:一种是建立锚区的解析行为模型,另一种是针对具体问题将锚区效应以参数形式进行拟合。前者不太适用于本文的情况,因为它属于动态变边界条件问题,难于严格解析求解。因此我们从锚区的功能角度出发,引入两个参数 ΔL 和 η 来表征锚区的柔度作用。 ΔL 代表锚区的形状柔度,因为真正固支的位置在锚区根部,锚区本身也参与变形,所以把锚区高度作为额外的梁长也计算在内。 η 代表锚区的应变柔度,说明锚区对固支梁轴应变的释放程度对常规表面加工工艺的固支梁和爬坡锚区,可根据这一思路给出 ΔL 和 η 的表达式为:

$$\Delta L = 2g \quad (3)$$

$$\eta = \frac{L/h}{L/h + 8 \times (1 + 0.2h/g)^3} \quad (4)$$

用 $L + \Delta L$ 代替 L , $\eta(\epsilon_{av} + \epsilon_0)$ 代替 $\epsilon_{av} + \epsilon_0$ 代入运算,即可求得考虑了锚区效应后的近似结果。

3 实验验证

3.1 样品制备和验证方案

硅微机械表面加工的多晶硅梁结构作为一种经典的微动结构已得到广泛的研究和认可。本文选取基于该结构的双端固支梁器件和应力计器件作为测试结构评

表 1 测试结构的材料参数和几何参数

Table 1 Material properties and geometric dimensions of the test structures

	长度 / μm	厚度 / μm	杨氏模量 / GPa	泊松比	热膨胀系数 / (10^{-6}C^{-1})
固支梁	450~850	2	160	0.28	2.6
锚区	10	-	160	0.28	2.6
芯片	9700	540	160	0.28	2.6
胶层	9700	25	2.7	0.4	28
FR4 基板	16600	600	9	0.28	16

估封装效应。如图 2 所示,在测试芯片表面的中心、边、角等各个典型位置布置 5 组长、宽不同的固支梁和 12 组应力计,以考察封装效应的分布行为。对传统的“ \perp ”形悬臂应力计结构进行改进,将其垂直的悬臂指针分叉平行折向两端,形成“工”形结构,以节约面积,配套各位置的梁器件进行应力测量。

测试结构的加工委托北京大学微电子研究所的标准工艺线进行。首先选取 n 型单面抛光、(100)晶向的硅圆片,热氧化 300nm 的底氧层。接着 LPCVD 生长一层 180nm 的氮化硅作为绝缘层。再生长、离子注入第一层多晶硅,并光刻图形。之后 LPCVD 淀积一层 $2\mu\text{m}$ 的 PSG,刻出 dimples 和锚区图形。接着生长 $2\mu\text{m}$ 厚的第二层多晶,离子注入,刻蚀图形,作为结构层。接着根据需要进行热退火和刻蚀释放孔。最后溅射 $1.5\mu\text{m}$ 的铝层并光刻。前道工艺结束后,将硅圆片划成芯片,得到未释放的芯片样品。将该样品在 40% HF 溶液: NF_4F : 甘油: 水 = 25ml: 40g: 20ml: 46ml 的溶液里释放 20~25min,获得可动器件结构,再用去离子水、丙酮、乙醇分别清洗,并红外烘干,得到未封装的芯片样品。再选用日本富士公司生产的型号为 CB602 的 CRCBOND 红胶,将该芯片和略大于芯片尺寸的 FR4 基板粘合。按照该红胶的固化程序,在 120°C 下固化 2min,得到贴片封装后的芯片样品。实验中各材料和几何参数如表 1 所示。其中几何参数为实际测得的平均值,面内尺寸利用显微镜测得,面外厚度利用游标卡尺测得。材料参数按照文献中的常见数据估取。

基于上述测试样品,本文采用以下方案验证贴片工艺对器件性能的影响:

(1) 选择 3 块芯片依次进行实验,以考察结果的重复性。

(2) 释放前,用高倍显微镜测量记录应力计指针的起始位置。

(3) 贴片前,用高倍显微镜测量记录应力计指针读数,结合前一步数据和 FEM 模拟获得由加工工艺引入的残余应变 ϵ_0 。再利用激光多普勒仪测量记录各双端固支梁在贴片前的谐振频率。具体测量细节见下两节说明。

(4) 贴片后,再用多普勒仪测量记录固支梁的谐振频率。

(5) 将已测得的残余应变 ϵ_0 和表 1 中的材料、尺寸参数代入理论模型中,算出双端固支梁在贴片前、后谐振频率的理论值,与实验数据进行比较,并比较 3 次实

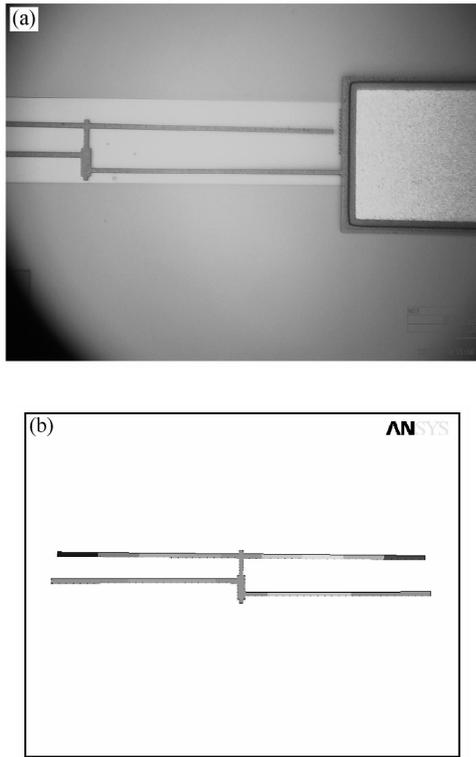


图 3 释放后偏转的应力计结构的显微镜照片(a)和 FEM 模型(b)
Fig.3 Microscope picture (a) and FEM model (b) of the rotated strain indicator after the release process

验结果的重复性.

3.2 残余应变的测量

实验中采用“工”形应力计结合 FEM 模拟来测量由加工工艺引入的残余应变. 首先利用 HIROX 公司型号为 KH-3000VD 的三维视频显微镜在 $700 \times 1-10$ 倍的放大倍率下分别观察记录固支梁结构在释放前、后的指针位置, 如图 3(a)所示. 因为实际加工后的结构尺寸可能已略微偏离版图的设计尺寸, 因此只有将释放前、后实际测得的指针位置相互比较才能得到真实的指针相对位移. 观测时需分别记录两偏转指针末端的垂直向位移值并作平均. 这种平均可以消除部分由非理想因素引入的共模误差, 从而得到较准确的垂直向位移值. 然后利用有限元软件 Ansys 按照版图设计尺寸建立应力计的 FEM 模型. 通过改变锚区间距的方法给该应力计模型依次施加一组单调变化的残余应变值, 模拟得到应力计指针末端的垂直位移随残余应变变化的关系, 并制成图表. 接下来, 将 12 组应力计的测量数据标记在图表上, 从中查表估测出残余应变的平均水平. 考虑到实际的工艺条件在芯片尺度范围内应不致有明显差异, 所以可近似认为芯片范围内的所有结构的残余应变水平应十分相近, 以此作为排除不理想数据的依据.

3.3 谐振频率的测量

实验中采用德国 Polytec 公司的激光多普勒仪 (la-

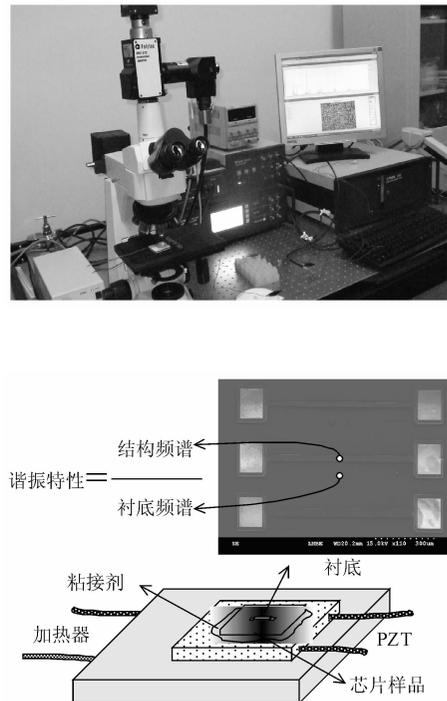


图 4 激光多普勒测量方案示意图

Fig.4 LDV setup for measuring the resonant characteristics of the test structures

ser Doppler vibrometer, LDV) 测量记录各双端固支梁在贴片前后的谐振频率. 该 LDV 型号为 MSV-400M2-20, 采用速度解码方式和 6400 线的 FFT 后处理算法, 可以直接测出激光光点位置的物体在所给定频率范围内的振动频谱. 如图 4 所示, 测量时将样品用双面胶或 FABER-CASTELL 公司的 Tack-it 万能黏土粘贴在 PZT 压电陶瓷激励片上, PZT 带动整个芯片振动, 提供器件结构的基础激励. 结构对谐振频率处的激励频率分量响应最强烈, 形成谐振峰. 通过测量、比对结构和衬底上关键位置处所测得的幅度频谱, 可以得到结构的谐振特性的幅频图, 读取较准确的谐振频率.

图 5(a) 是实际测得的固支梁中点位置的典型谐振特性. 图中各谐振峰的品质因数均不低于 20, 根据单自由度振动系统理论可推知此时谐振频率和固有频率的差距很小, 由此读出的谐振频率等同于梁的固有频率. 结合 LDV 的模态扫描功能还可以发现, 图中 3 个谐振峰分别对应着系统在面外振动方向的一阶、三阶和五阶模态, 而其他模态的谐振峰并不明显. 这是因为基础振动下匀质等截面固支梁受到的惯性力关于梁中心呈偶对称, 抑制了关于中心呈奇对称的偶阶模态; 同时设计上固支梁的梁宽远大于梁厚, 又抑制了面内振动的模态. 实际测量中选取记录第一、三阶的模态频率.

为了加深对实验结果的验证, 对比和排除实际器件结构和信号处理中的非理想因素, 文中还参考了有限元分析的结果. 在 Ansys 软件中基于平面单元建立爬坡锚区固支梁的二维模型, 在谐分析模块的功能基础上, 纳入对梁预屈曲等大变形因素的考虑, 结合后处理模块功能变相地在梁上施加惯性载荷力, 完成了梁器件在基础

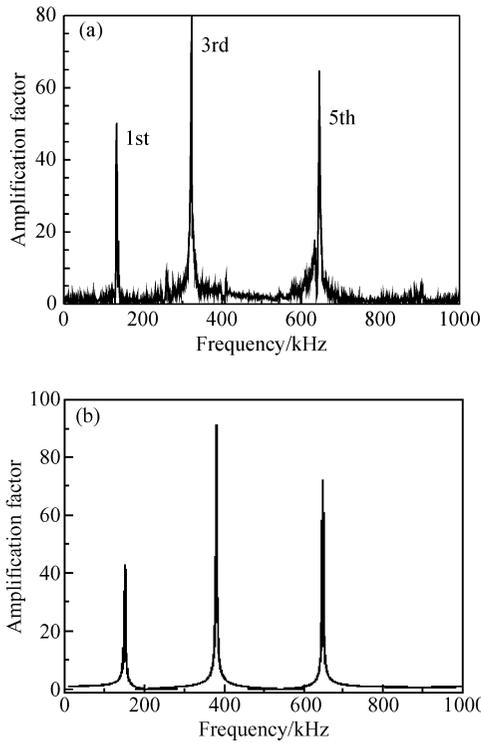


图 5 LDV 测量(a)和有限元仿真(b)得到的固支梁的谐振特性
Fig.5 Typical resonant characteristics of a fixed-fixed beam obtained by LDV (a) and FEM (b)

振动下的频谱分析.图 5(b)是在与(a)所测固支梁相近的器件参数下模拟得到的谐振特性谱,结果在数值和形状上均吻合得较好.这种对比有利于确认和提取更准确的谐振特性的数据.

4 结果分析

图 6 给出了 2 号芯片上应力计测量残余应变的结果.实际设计的应力计共有 3 种尺寸,分别根据这 3 种尺寸用 Ansys 模拟得到它们的偏转位移-残余应变的关系图表.用 3.2 节所述的方法测得实际数据,画在该图表中.除去明显的坏点和与均匀残余应变假设不相符的坏点,在一共 12 个测试样品中得到 7 个好点(有重合),由此得到残余应变的平均水平 $\epsilon_0 = -360 \times 10^{-6}$,如图

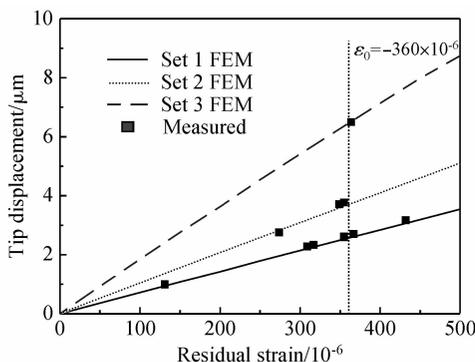


图 6 2# 芯片上应力计测量工艺引入的残余应变
Fig.6 Residual strain measured by strain indicator in test chip 2#

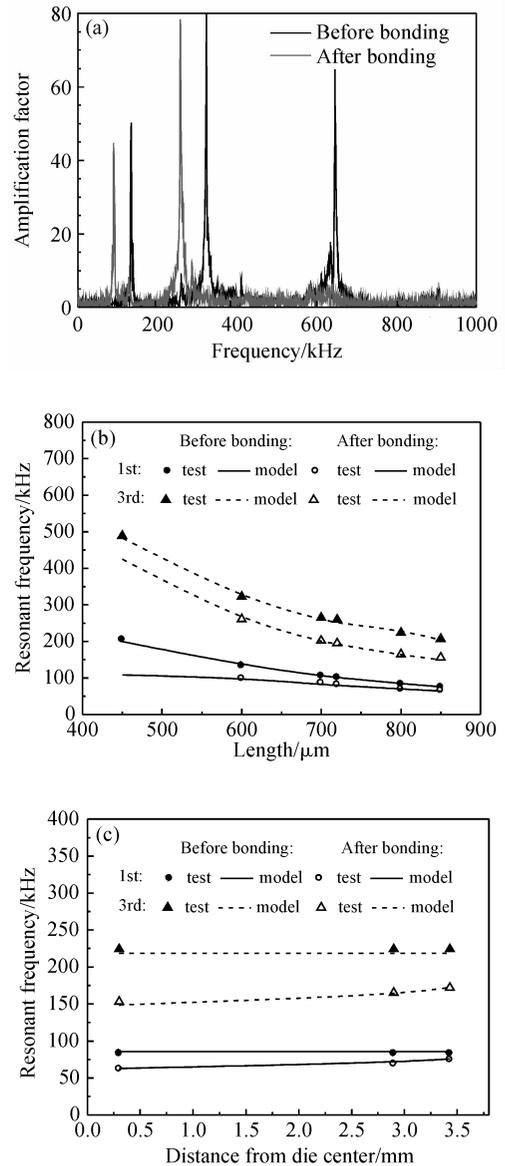


图 7 2# 芯片贴片前后理论和实验对比 (a)固支梁的谐振特性;(b)相同位置不同长度梁的频率偏移;(c)不同位置相同长度梁的频率偏移

Fig.7 Experimental and theoretical results before and after bonding (a) Typical vibration characteristics of a fixed-fixed beam; (b) Frequency shifts of the beams at a similar position; (c) Frequency shifts of beams at distributed positions

中虚线所示.后文中还将看到,根据该残余应变计算出的贴片前固支梁的谐振频率和实测值很接近,从而进一步验证了该结果的准确性.

接下来利用已有模型计算梁在贴片前后的谐振频率.首先根据表 1 中的参数和文献[4]中的理论模型,计算固支梁贴片前的应变 ϵ_{av} 和贴片后的应变 $\epsilon_0 + \epsilon_{av}$.再将所得应变与理想固支梁的一阶临界屈曲应变 $\epsilon_b = -\pi^2 h^2 / (3L^2)$ 比较,如小于临界应变则视为屈曲梁,用公式(1)计算其谐振频率,否则采用公式(2).计算时还要结合(3)和(4)式以考虑锚区效应的影响.图 7(a)是 2# 芯片在贴片前、后固支梁的幅度谐振特性的测量结果.可以看出各阶模态频率发生一致而显著的偏移,偏移幅度最高可达 15%~30%.图 7(b)给出了相同位置、

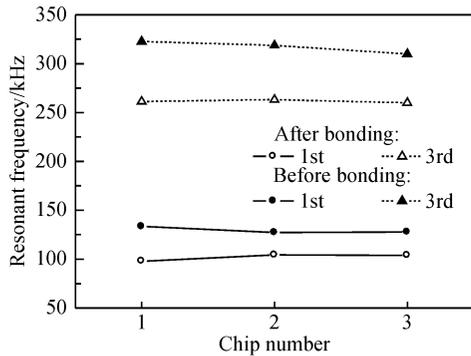


图 8 三次芯片测量的重复性比较

Fig.8 Repeatability of the measured data from the 3 test chips

不同长度梁的谐振频率偏移情况. 该组梁处于芯片上以长、宽为坐标轴的直角坐标系中的同一横坐标位置附近, 因而梁上的应变水平相当. 其中长度小于 $600\mu\text{m}$ 的固支梁的一阶谐振频率的相对频偏尤其明显, 而实际应用中该种尺度的梁十分常见, 其一阶谐振频率也是十分关键的设计参数. 图 7(c) 给出了不同坐标位置、相同长度梁的频偏值, 从中可以发现明显的随位置而分布变化的特征, 其原因正是来自于热致封装应变本身的分布效应. 但无论哪种情况, 理论和实验结果都十分接近. 图 8 比较了 3 次芯片实验结果的重复性. 在 3 个芯片上选择同一根长度为 $600\mu\text{m}$ 的固支梁, 在贴片前、后测量其一阶和三阶谐振频率作为比较对象. 从图中可以看出, 3 次测量数据在贴片前后均存在一定差距, 说明无论是加工工艺还是贴片工艺都可能存在一定的公差. 但该差距最大不超过 6%, 远小于贴片导致的频率偏移率, 因此可以认为实验结果具有较好的重复性, 能够验证封装效应及其理论模型.

可见, 热致封装效应对 MEMS 器件性能的影响不仅显著, 而且会随着器件的类型、材料参数、加工工艺、封装工艺、环境乃至版图设计等因素的不同而表现出多样的影响趋势, 增加了设计者了解和把握其规律的难度. 而本文通过对最简单而且对热致应力最敏感的双端固支梁器件的实验说明, 考虑了封装-器件结构耦合的理论模型^[4], 能很好地预测这些热致封装效应, 使得我们在设计之初就可以对封装、器件参数进行优化, 预测或补偿有明显规律的封装效应, 提高设计效率, 降低后道校准的难度. 有趣的是, 利用本次实验所采用的封装配置, 的确可以显著地降低芯片表面的热致应变. 固支梁器件的轴向应变从封装前的 -360×10^{-6} 降低到了封装后的约 $-130 \sim -180 \times 10^{-6}$, 使谐振频率明显发生改变. 尽管环境温度变化后, 该应变仍会随之改变, 但是该实验预示了利用简单的封装设计补偿、控制器件结构应变范围的可能性. 本实验的另一个重要结论在于, 封装

应变具有显著分布特性, 使得即使相同的器件尺寸, 也会因为加工位置的不同而在性能上产生差异. 这种效应一方面需要在设计中加以重视和补偿, 另一方面也为控制器件的工作状态提供了一种新的有益的资源. 也即全面利用封装-器件的协同设计挖掘封装上系统 (system in package, SIP) 在信号传递、信息交互方面的潜力, 尤其是开发封装中结构耦合、物理域耦合现象对 MEMS 系统的应用价值, 使得封装不仅仅是充当微系统的机械载体, 而且能参与到系统功能中去, 提高微系统的工作效率.

5 结论

本文利用激光多普勒动态测试系统, 实际测量了 MEMS 固支梁由于贴片工艺的热致封装效应而发生的频率漂移, 并将实验数据与前期的理论模型结果进行了对比. 结果表明 MEMS 多层封装结构热-机械耦合效应对器件基本性能的影响显著而复杂. MEMS 固支梁的谐振频率在贴片封装后发生较大漂移, 并随着器件加工位置呈现出分布变化的特征. 考虑封装-器件结构耦合的理论模型可以较好地预测这一结果, 为封装级的器件设计提供理论指导.

参考文献

- [1] Hsu Tairan. MEMS packaging. Institute of Engineering and Technology, 2004
- [2] Sun Zhiguo, Zhang Qun, Huang Weidong, et al. Evolution residual in-plane stress during curing process and thermal treatment of COB packages. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(8): 874 (in Chinese) [孙志国, 张群, 黄卫东, 等. 板上芯片固化及热处理过程中表面残余应力的演变. 2002, 23(8): 874]
- [3] Lee C C, Peng C T, Chiang K N. Package effect investigation of CMOS compatible pressure sensor using flip chip and flex circuit board technologies. Sensors and Actuators A, 2006, 126: 48
- [4] Song Jing, Huang Qing'an, Tang Jieying. Effects of die bonding on MEMS characteristics: cell library study. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(1): 156 (in Chinese) [宋竞, 黄庆安, 唐洁影. 芯片粘接工艺对 MEMS 性能影响的单元库法模型. 半导体学报, 2006, 27(1): 156]
- [5] Li Ming, Huang Qing'an, Song Jing, et al. Study of the thermomechanical coupling effect in COB packaging structures. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1606 (in Chinese) [李明, 黄庆安, 宋竞, 等. COB 封装中热-机械耦合效应的研究. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1606]
- [6] Nayfeh A H, Kreider W, Anderson T J. An analytical and experimental investigation of the natural frequencies and mode shapes of buckled beams. AIAA Journal, 1995, 33: 1121
- [7] Liu Guangyu, Fan Shangchun. New technology and application of sensors. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Publishing House, 1995 (in Chinese) [刘广玉, 樊尚春. 新型传感器技术及应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995]

Thermally Induced Packaging Effect on the Resonant Frequencies of a Fixed-Fixed Beam^{*}

Li Ming, Song Jing, Huang Qing'an[†], and Tang Jieying

(*Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: To characterize the effect of deformation of die-bonding packages on the performance of MEMS devices, a laser scanning vibrometer was used, based on the theory of vibration analysis and signal processing. Because it is a commonly used structure in MEMS design, a surface micromachined polysilicon fixed-fixed beam was chosen. Its resonant frequencies from the 1st to the 3rd order were recorded before and after die bonding and compared to FEM simulations. The results suggest that the thermo-mechanical coupling deformation in the multilayer packaging structure affects the performance of MEMS device remarkably, and the resonant frequencies shift of the beam are more than 15%~30%. Therefore, it is possible to include the package effect in the primary design circle of MEMS devices, which may enhance the device performance and shorten the primary design cycle.

Key words: MEMS; packaging effect; fixed-fixed beam; resonant frequency; co-design

EEACC: 0170J

Article ID: 0253-4177(2008)01-0157-06

^{*} Project supported by the Advanced Research Foundation for Equipment (No. 51308050105)

[†] Corresponding author. Email: hqa@seu.edu.cn

Received 24 May 2007, revised manuscript received 19 August 2007