

一种改进的旋转式微机械结构*

刘祖韬 黄庆安 李伟华

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 给出了一种改进的旋转式微机械薄膜残余应变测试结构. 与已有的普通微旋转结构相比, 改进的微旋转结构执行梁的宽度都保持一致. 改进的微旋转结构在旋转变形之后, 整个执行梁都会发生弯曲变形, 所以在变形之后结构的残余应力非常小且分布均匀, 没有普通微旋转结构的高应力集中, 因此测量精度高于传统微旋转结构, 更适合于高残余应变薄膜的测试. 文中详细推导了改进微旋转结构的力学模型, 并用有限元软件进行了模拟分析, 同时详细地给出了改进的微旋转结构与传统微旋转结构的性能对比, 最后用实验对改进微旋转结构的理论模型进行了验证.

关键词: 微机械; 微旋转结构; 残余应变; 测量; 有限元分析

PACC: 6220; 0630M

中图分类号: TN304. 07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-1040-05

1 引言

近十年来, 微电子机械系统迅猛发展, 已经取得了一定的成果, 而表面牺牲层技术也成为 MEMS 的主流加工技术. 但是由表面牺牲层技术制作的 MEMS 器件的性能与可靠性受薄膜中的残余应变影响很大, 残余应变会影响到薄膜的谐振频率和几何形变, 过大的残余应变甚至会导致微结构的断裂. 所以测量并控制薄膜中的残余应变是 MEMS 领域的一个非常重要的课题. 目前已经有很多种测量方法应用于薄膜残余应变的测量, 但最简单实用的测量方法是利用微机械测量结构对薄膜残余应变进行在线测试^[1], 其中的微旋转结构是薄膜残余应变测量中最常用的微机械测量结构. 微旋转结构由两个执行梁和一个指针梁构成, 执行梁的一端固定于基底上, 另一端与指针梁连接, 整个结构是一个三次超静定结构. 微旋转结构测量薄膜残余应变的基本工作原理为: 由于薄膜残余应变的存在, 微旋转结构在牺牲层的材料被腐蚀去除之后会发生平面内的膨胀或收缩变形, 对应压残余应变和张残余应变, 执行梁分别表现为伸长或者缩短. 执行梁长度的变化驱动

指针梁在平面内发生偏转运动. 通过测量指针梁顶点的偏转位移, 然后根据指针梁顶点偏转位移与薄膜残余应变之间的函数关系就可以计算出薄膜中的残余应变^[2]. 微旋转结构的缺点是必须使用显微镜人工观测指针梁顶点的偏转位移, 所以只适合小批量测试.

普通微旋转结构的执行梁与指针梁是通过旋转点连接在一起的. 旋转点的宽度远小于执行梁的宽度, 其刚度也比执行梁的刚度要小很多, 所以旋转点比执行梁更容易发生弯曲变形, 从而整个结构的变形主要集中于旋转点处. 这就导致了旋转点在结构发生旋转变形之后有极大的应力集中, 如果旋转点处的应力值超过薄膜的断裂强度, 旋转点处将会发生断裂, 造成微旋转结构的损坏. Zhang 等人制作的普通微旋转结构, 由于高应力集中, 造成旋转点在牺牲层去除之后发生了断裂^[3]. 因为普通微旋转结构旋转点处的变形是大位移和大变形, 从而无法用力学方法为指针梁端点位移与薄膜残余应变之间的关系构造一个有效的解析函数关系式, 所以从指针梁顶点位移到薄膜残余应变之间的转换计算必须根据实际情况用有限元软件进行模拟分析才能完成.

在传统微旋转结构的误差模型中, 由于旋转点

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2003AA404010)

刘祖韬 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要从事于 MEMS 材料的参数测量.

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子技术和 MEMS 研究与教学.

2004-06-10 收到, 2004-09-02 定稿

的尺寸较小,同样的由工艺加工所产生的梁宽绝对误差,将给旋转点带来较大的宽度相对误差,并且由于旋转点的应力高度集中,指针梁顶端的旋转移移对旋转点宽度的相对误差非常敏感.所以不可避免的工艺加工所带来的梁宽误差将会给普通微旋转结构带来很大的模型误差,使得普通微旋转结构的测量精度难以保证.

本文提出了一种改进的微旋转结构,通过测量指针梁与参考线之间的偏转位移,可以计算出薄膜的残余应变.与普通微旋转结构相比,改进式的微旋转结构没有旋转点,整个结构上三条悬臂梁的宽度都相同,所以旋转变形过程中执行梁的所有部位都只发生小位移的偏转.

2 解析模型

改进的微旋转结构如图 1 所示.图 1(a)为改进式微旋转结构的整体示意图,图 1(b)局部显示了微旋转结构的指针梁在偏转移动之后的状态.改进后微旋转结构的力学模型在结构力学上属于三次超静定问题,其力学模型如图 2 所示.

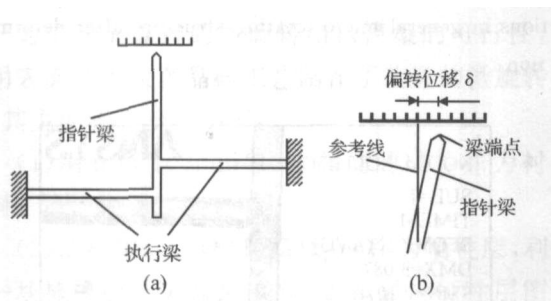


图 1 改进的微旋转结构

Fig.1 Schematic illustrations of the optimized micro-rotating structure

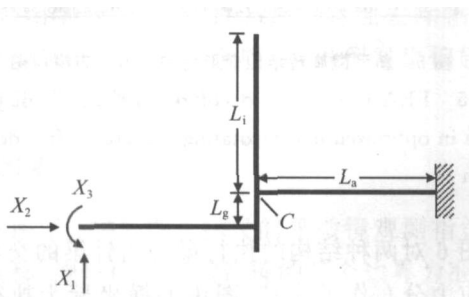


图 2 改进的微旋转结构的力学模型

Fig.2 Rigid frame simplified for the optimized micro-rotating structure with three redundant under the external force

把执行梁左端的固支边界条件去除,用等价的三个广义力(\$X_1, X_2\$ 和 \$X_3\$)代替,得到力法方程组:

$$\begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_g \\ 2L_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

方程组中的各个系数如下所示:

$$\begin{aligned} 11 &= \frac{L_g}{EA} + \frac{2kL_a}{GA} + \frac{8L_a^3 + 3L_a^2L_g}{3EI} \\ 12 &= -\frac{L_aL_g^2 + 3L_gL_a^2}{2EI} \\ 13 &= -\frac{L_aL_g + 2L_a^2}{EI} \\ 22 &= \frac{2L_a}{EA} + \frac{kL_g}{GA} + \frac{L_g^3 + 3L_g^2L_a}{3EI} \\ 23 &= \frac{L_g^2 + 2L_aL_g}{2EI} \\ 33 &= \frac{2L_a + L_g}{EI} \end{aligned}$$

式中 \$\epsilon\$ 为微旋转结构所在薄膜上的残余应变;\$k\$ 为梁截面形状的修正因子,由于本文微旋转结构上悬臂梁的截面都为矩形,所以 \$k=1.24^{[4]}\$;\$E\$ 为薄膜的弹性模量;\$G\$ 为剪切模量;\$I\$ 为梁的弯曲刚度;\$L_a, L_g\$ 和 \$L_i\$ 如图 2 所示.

对方程组(1)求解得到 \$X_1, X_2\$ 和 \$X_3\$. 根据结构力学可以得到整个结构上的内力分布,从而得到旋转梁与指针梁连接点(图 2 上的 \$C\$ 点)的位移,\$C\$ 点的水平位移:

$$h = \frac{X_2L_a}{EA} - L_a \quad (2)$$

垂直位移:

$$v = \frac{kL_aX_1}{GA} + \frac{1}{EI} \left[(X_3 - X_1L_a + X_2L_g) \frac{L_a^2}{2} - \frac{X_1L_a^3}{3} \right] \quad (3)$$

旋转位移:

$$\theta = \frac{1}{EI} \left[(X_3 - X_1L_a + X_2L_g) L_a - \frac{X_1L_a^2}{2} \right] \quad (4)$$

根据公式(2),(3)和(4)所得到的位移,可以推出指针梁顶点的位移为,

$$= L_i + h \quad (5)$$

上面的公式表明指针梁端点的位移是薄膜内的残余应变的函数,函数关系只与微结构的平面几何尺寸有关,而与薄膜的厚度和弹性模量无关.公式(5)的反函数即为微旋转结构测量薄膜残余应变的工作函数:

$$= () \quad (6)$$

微旋转结构测量误差的主要来源为指针梁的旋转位移测量误差和梁的宽度误差,后者由工艺造成.通过公式(6)可以推导出结构的误差.假设指针梁端点位移的测量误差为 d ,梁的宽度误差为 dW ,测量的误差为:

$$d = \frac{\partial}{\partial d} d + \frac{\partial}{\partial W} dW \quad (7)$$

3 有限元模拟

为了了解改进后新型微旋转结构和普通微旋转结构之间的性能差异,本文对两种结构做了对比性的有限元分析.有限元模拟实验所用的软件为商业软件 ANSYS,模拟所采用的有限单元为平面单元 183,模型的材料参数是:弹性系数为 $1.8 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.22,热膨胀系数为 2.7×10^{-6} .两种结构的几何尺寸:两种结构的执行梁 (L_1) 和指针梁长度 (L_i) 都为 $100\mu\text{m}$,悬臂梁的厚度都为 $1.0\mu\text{m}$,执行梁之间的垂直间距 (L_g) 为 $8\mu\text{m}$;改进微旋转结构的悬臂梁宽度都为 $1.5\mu\text{m}$,普通微旋转结构的悬臂梁宽度为 $6\mu\text{m}$,普通微旋转结构的旋转点宽度与长度都为 $1.5\mu\text{m}$.薄膜残余应变的模拟方法是对微旋转结构施加温度负载,温度负载与应变的关系为:

$$T = \dots / \dots \quad (8)$$

式中 ϵ 为微旋转结构所在薄膜上的残余应变; α 为薄膜的热膨胀系数.

图 3 给出了两种结构在不同的薄膜残余应变情况下的偏转位移.有限元的模拟结果表明改进的微旋转结构的偏移量略不小于普通残余应变的偏移

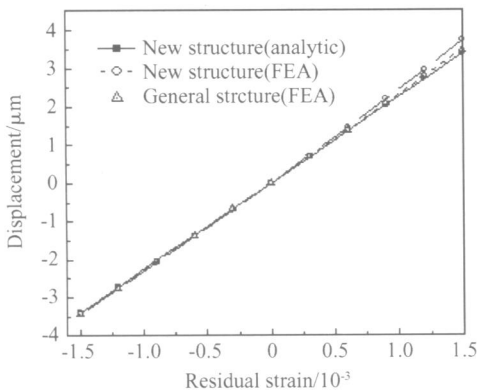


图 3 指针梁端点位移与残余应变的关系曲线

Fig. 3 Deflection of indicating beams as a function of residual strain

量,而且通过改进结构的解析公式得到的偏移量与有限元方法得到的偏移量基本相同,说明了本文所提出的微旋转结构的解析公式精度比较高.

由于两种结构都是超静定结构,所以变形之后结构上仍有残余应力存在.图 4 和图 5 为两种结构在薄膜残余应变为 -0.00135 的情况下牺牲层去除之后的残余应力模拟分布图.从这两个图中可以看出普通微旋转结构的残余应力集中于旋转点处,而改进微旋转结构的残余应力相对均匀地分布在整个结构上,并且残余应力很小.

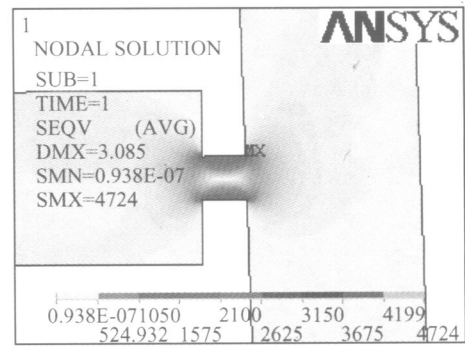


图 4 普通微旋转结构旋转点的应力分布模拟图

Fig. 4 FEA representation of residual stress distributions in general micro-rotating structure after deformation

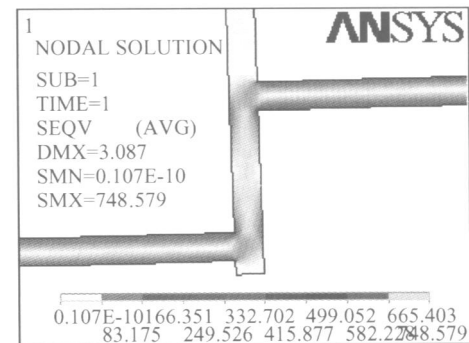


图 5 新型微旋转结构变形后的应力分布模拟图

Fig. 5 FEA representation of residual stress distributions in optimized micro-rotating structure after deformation

图 6 对两种结构的执行梁与指针梁的交界处的残余应力分布作了比较.图中的横坐标为执行梁在靠近指针梁处的梁宽,纵坐标为相交线段上的等价应力.图 6 显示了普通微旋转结构在变形之后残余应力集中非常严重,其最小值为 250MPa ,线段两端的残余应力值甚至超过了 4GPa ,而薄膜的断裂强度

一般为 1~4 GPa 左右,所以实际情况中普通旋转结构可能会发生断裂,从而导致整个结构的损坏.而改进的微旋转结构在变形之后的应力分布要小很多,最大应力值也没有超过 500MPa,且整个执行梁上的残余应力分布比较均匀.

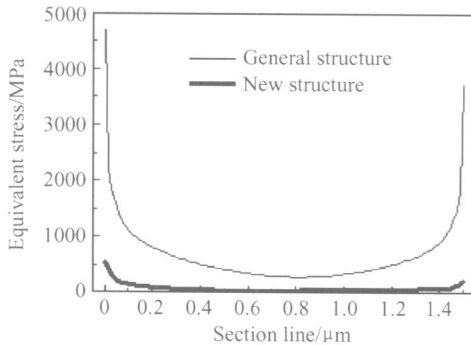


图 6 变形后执行梁剖面的等效应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution across section line

4 制作与测试

4.1 制造

为了验证改进的微旋转结构模型的可行性,我们用表面牺牲层多晶硅工艺制作了改进的微旋转结构,其主要制作步骤如下:

(1)用 p 型 100mm (100) 晶向的硅片作为衬底材料.

(2)淀积磷硅玻璃 (PSG) 2μm 作为牺牲层,利用第一块掩模版干法腐蚀磷硅玻璃,形成牺牲层图形结构;

(3)用 LPCVD 法淀积 0.6μm 厚的多晶硅薄膜;利用结构层掩模版刻蚀形成残余应变测试结构;

(4)用浓度为 30% 的 HF 酸腐蚀去除牺牲层,释放出测试结构上的残余应变,得到发生偏转变形的微旋转结构,如图 7 所示.

4.2 测量

使用了 100 × 带有标尺的显微镜观测指针梁顶点的位移.测量位移以指针梁的某个边界为准,也可以设计专用的指针读数系统来测量指针梁的位移^[5,6].为了能够得到更大的可观测的位移,试验中使两个完全相同的测试结构对称分布,这样两个指针梁端点之间的距离为单个指针梁位移的两倍.

图 7 显示了用 LPCVD 多晶硅薄膜制作的残余

应变测量结构的 SEM 照片.通过这种优化微旋转结构的测量,得到多晶硅薄膜上残余应变的最大值与最小值之间差为 0.73×10^{-6} ,平均应变为 1.34×10^{-6} (压应变).指针梁位移和梁宽度的误差分别为 0.1 和 0.2μm,对应于薄膜残余应变的误差为 0.06×10^{-6} .

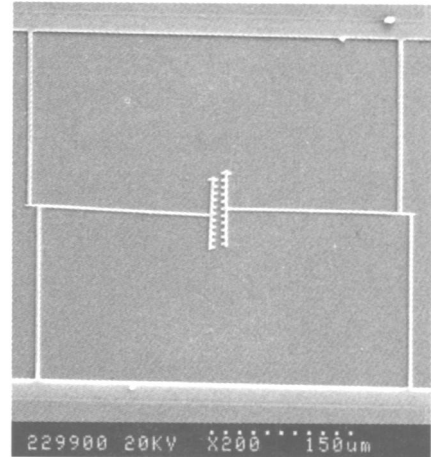


图 7 新型微旋转结构的 SEM 图片

Fig. 7 A micrograph of SEM of an optimized micro-rotating strain sensor fabricated using a sacrificed process

5 结论

本文所提出的改进微旋转结构是对普通的微旋转结构的优化.改进微旋转结构的执行梁的宽度一致,因此不存在应力集中的问题.因整个结构的变形均匀分布在执行梁上面,发生的变形也可以作为小位移处理,所以能够用结构力学精确地分析它的力学模型.有限元的模拟结果表明改进的微旋转结构变形之后的残余应力分布远小于普通微旋转结构的残余应力分布,这样明显减小了微旋转结构的测量误差,并提高了制成品率.实验结果也证明本文所提出的改进的微旋转结构的解析模型的正确性,可以应用于薄膜残余应变的测量计算.

参考文献

[1] Liu Zutao, Huang Qing'an, Jiang Yanfeng. In-situ test structures of micromachined thin films. Measurement & Control Technology, 2002, 21 : 6 (in Chinese) [刘祖韬, 黄庆安, 姜岩峰. 微机械薄膜应力的在线测试结构. 测控技术, 2002, 21 : 6]

[2] Van Drieënhuizen B P, Goosen J F L, French P J, et al. Comparison of techniques for measuring both compressive and ten-

- sile stress in thin films. *Sensors and Actuators A*,1993 ,37/38:756
- [3] Zhang X, Zhang T Y, Zohar Y. Measurements of residual stresses in thin films using micro-rotating structures. *Thin Solid Films*,1998 ,335 :97
- [4] Roark R J ,Young W C. *Formulas for stress and strain*. Optimized York ,McGraw-Hill ,1975
- [5] Elbrecht L ,Storm U ,Catanescu R ,et al. Comparison of stress measurement techniques in surface micromachining. *Journal of Micromechanics and Microengineering* ,1997 ,7 :151
- [6] Kim C J , Muller R S, Pisano A P. Residual strain measurement of thin films using microfabricated vernier gauges. *Sensors and Materials* ,1993 ,4(4) :291

An Optimized Micro-Rotating Structure for Measuring Residual Strain of Thin Films *

Liu Zutao , Huang Qing 'an , and Li Weihua

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

Abstract : This paper presents an optimized micro-rotating structure for local measurement of residual strain in a thin film. This optimized structure is composed of three cantilever beams with uniform width. An analytical model is derived to relate the measured displacement to residual strain. Finite-element modeling is also used to analyze the model. Experimental results with p-type doped as well as undoped LPCVD polysilicon films demonstrate the effectiveness of the proposed structure.

Key words : residual strain ; micro-rotating-structures ; measurement ; film ; micromachining ; finite element analytic

PACC : 6220 ; 0630M

Article ID : 0253-4177(2005)05-1040-05

* Project supported by National High Technology Research and Development of China (No. 2003AA404010)

Liu Zutao male ,was born in 1978 ,PhD candidate. He is engaged in research on MEMS materials measurement.

Huang Qing 'an male ,was born in 1963 ,professor ,adviser of PhD candidates. He is engaged in teaching and research on microelectronics and MEMS.

Received 10 June 2004 ,revised manuscript received 2 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics