

# 具有多运动自由度的新型多功能微镜

余洪斌 陈海清

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 基于多层硅表面微加工技术,设计并制造了一种全新的微镜结构,它由底电极层、支撑层和镜面层构成. 支撑层采用对称布置的双 T 型梁结构,能提供垂直方向的平动和绕两水平轴的转动,从而实现微镜对入射光的强度调制和相位调制功能. 测试结果表明,微镜能获得最大  $2\mu\text{m}$  的平动范围,同时其绕两水平轴的转动角度分别为  $\pm 2.3^\circ$  和  $\pm 1.45^\circ$ . 此外,通过进一步增大牺牲层的厚度,可以很容易地使微镜获得更大的变形范围.

**关键词:** 微机电系统; 微镜; 相位调制; 强度调制; T 型梁

EEACC: 4180

中图分类号: TN303 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)04-0816-05

## 1 引言

近年来,基于硅微加工技术的微机电系统(MEMS)在光学领域的应用研究越来越受到重视. 其内的组成器件通常具有与光波波长可比拟的尺寸,且能充分利用现有的半导体加工设备和成熟的加工工艺,以较低的成本进行批量生产. 此外,由于各组成部件具有较小的惯性(这是由较小的质量决定的),因而可以对其实现精确的定位.

微镜是其中最典型的一个代表,近来已有很多研究机构相继提出了不同类型的微镜结构,用以实现光学显示、激光扫描、光开关、光互连和自适应光学校正等功能<sup>[1~9]</sup>,如文献[10]中利用微镜在垂直方向上的活塞式运动对入射光进行相位调制,而德州仪器公司生产的数字微镜器件(DMD)则是利用镜面的转动来实现强度调制的<sup>[1]</sup>. 但一个显著的特点是,这些微镜通常只具有某一方向上的自由度,因而只能实现单一的功能,这就极大地限制了它的应用范围.

正是基于此种考虑,本文提出了一种全新的基于多层表面微加工技术的微镜结构,它兼有垂直方向的平动和绕两水平方向的微小转动功能,预期能满足多种应用场合的需求.

## 2 结构设计和分析

本设计的微镜结构如图 1 所示. 它有三层结构:最上层为镜面主体,为提高反射率,通常还会溅射一层 Au;中间为支撑层,由两个对称分布的 T 型梁结构(图 2 所示)所构成,其中沿  $x$  方向放置的梁的两端与镜面相连,起到支撑作用,而垂直梁一端则固定在支撑柱上,并通过其与衬底相连;最底层为驱动电极,通过控制通电电极的数目、布局及施加电压的大小,可获得特定的镜面运动形式.

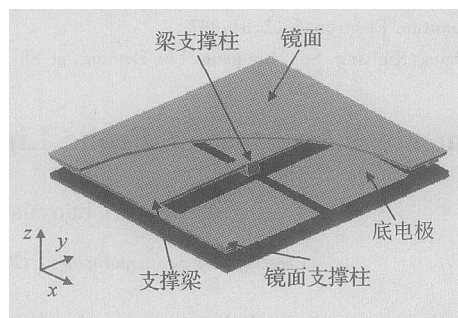


图 1 微镜结构示意图

Fig. 1 Schematic of designed micromirror

此微镜结构的一个显著特点就是兼有沿  $z$  轴方向平动以及绕  $x$  和  $y$  方向转动的能力. 下面从力学

余洪斌 男,1977 年出生,博士研究生,主要从事 MEMS 工艺及相关器件的研究.

陈海清 男,1947 年出生,博士生导师,主要从事光信息存储技术及微光学器件的理论研究.

2004-04-20 收到,2004-07-14 定稿

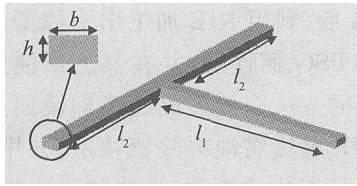


图 2 T 形梁结构示意图

Fig. 2 Schematic of T shape beam

的角度分别对微镜的三种运动情况进行分析。

对于镜面沿  $z$  轴方向运动时的情况而言,由于镜面与其下方的 T 型支撑梁相比具有较大的刚度,因而当镜面受到静电力作用时,T 型梁将更容易发生变形.虽然镜面并非严格意义上的刚体,其自身也会发生形变,但同梁的变形相比显得微不足道,且通常微镜上光学作用的有效区域较小,因而可将微镜近似看成为沿  $z$  轴方向的“平动”,这可从后续 ANSYS 模拟结果中得到验证.由于镜面通过支撑柱与梁相连,因而其向下的变形即为平行于  $x$  轴向的梁顶端的变形.假设镜面中心受到一  $z$  轴向的集中力  $F$  作用,此时梁顶端的变形由两部分梁自身的弯曲变形即  $\delta_1$  和  $\delta_2$  组成.由于每个支撑点上的受力均为  $\frac{1}{4} F$ ,则可知,

$$\delta_1 = \frac{Fl_1^3}{Ebh^3}, \quad \delta_2 = \frac{2Fl_2^3}{Ebh^3}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{F}{Ebh^3} (2l_1^3 + l_2^3)$$

此时在运动模式下,微镜系统的等效弹性系数为:

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{Ebh^3}{2l_1^3 + l_2^3} \quad (1)$$

利用相似的分析方法,可以得到在单位转距的作用

下镜面绕  $x$  和  $y$  方向的转动角度分别为:

$$\phi_x = Ebh^3 / (2l_1 + \frac{l_2^3}{l_1}) \quad (2)$$

$$\phi_y = bh^3 / (\frac{l_2}{E} + \frac{l_1}{2G}) \quad (3)$$

式中  $E$  为杨氏模量; $G$  为剪变模量; $b$  和  $h$  分别为梁的宽度和厚度; $l_1, l_2$  则为对应的长度;为与梁截面形状有关的扭转系数.

本设计中的相关参数见表 1.

表 1 结构设计尺寸

Table 1 Parameters of designed structure

名称	尺寸
镜面	80 $\mu$ m $\times$ 80 $\mu$ m $\times$ 2 $\mu$ m
支撑梁	$l_1 = 33\mu$ m, $l_2 = 39\mu$ m, $b = 2\mu$ m, $h = 1\mu$ m
镜面与梁的距离	2 $\mu$ m
梁与底电极间的距离	2 $\mu$ m

将表中的结构参数及材料的杨氏模量  $E$  和剪变模量  $G$  (对多晶硅而言,  $E = 155$  GPa,  $G = 64$  GPa) 分别代入 (1), (2) 和 (3) 式中,可求得  $k = 2.363$  N/m,  $a_x = 0.449 \times 10^{-10}$  N  $\cdot$  m/rad,  $a_y = 0.314 \times 10^{-10}$  N  $\cdot$  m/rad. 由此可清楚地看到,镜面绕  $y$  方向的转动比绕  $x$  方向的转动要容易,其中的一个重要原因是,在绕  $x$  方向转动时,所有的梁都处于弯曲状态,而在绕  $y$  方向转动过程中,只有沿  $x$  轴排列的梁发生弯曲,而沿  $y$  轴排列的梁将发生扭转.由相关知识可知,对于表 1 所示的梁结构而言,其扭转要比弯曲更容易.图 3 给出的是利用 ANSYS 软件对处于不同工作模式下的微镜及 T 型梁的变形情况进行模拟的结果.

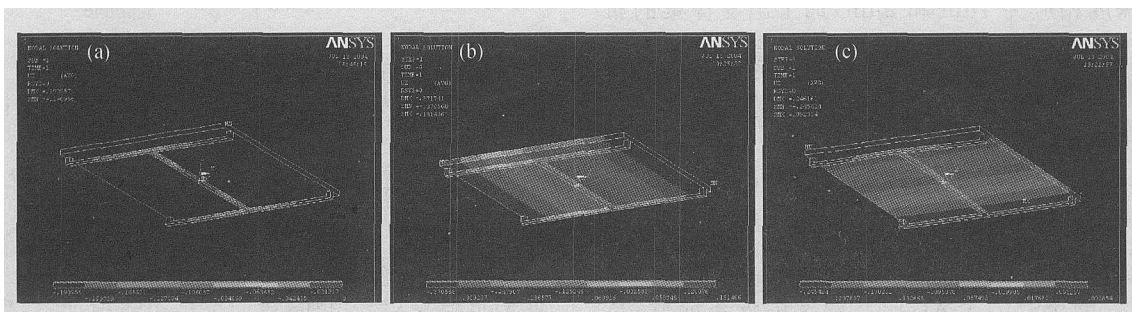


图 3 微镜变形的 ANSYS 模拟 (a) 沿  $z$  轴平动; (b) 沿  $y$  轴转动; (c) 沿  $x$  轴转动

Fig. 3 Results of ANSYS simulation (a) Piston movement along  $z$ -axis; (b) Rotation around  $y$ -axis; (c) Rotation around  $x$ -axis

模态分析的结果显示:微镜的前三阶振动模态分别为绕  $y$  方向的转动、沿  $z$  方向的平动和绕  $x$  方向的转动,对应的频率分别为 49.06, 65.56 和 80.08kHz. 从此结果可看到各模态之间具有明显的差别(因为最接近的振动频率之间仍相差 15kHz),从而排除了由于相邻模态过于接近所引起的结构运动失稳现象的发生,这也从侧面反应出本设计具有较好的稳定性. 同时这三个振动模态也正是我们希望获得的镜面运动形式.

### 3 加工

微镜的加工流程见图 4. 首先淀积一层氧化硅和氮化硅,其中氧化硅充当缓冲层用于减少氮化硅与衬底之间热膨胀系数不匹配问题,而氮化硅则用于器件之间的隔离. 利用 LPCVD 方法淀积第一层多晶硅作为底电极层,并通过扩磷提高其电导率,对其进行光刻和 RIE 刻蚀加工出电极布局. 淀积一层

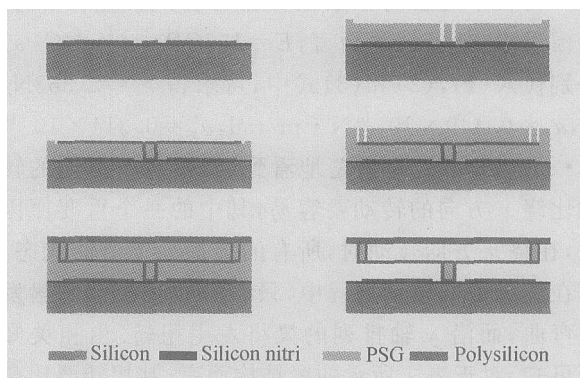


图 4 加工工艺流程图

Fig. 4 Fabrication process

PSG 作为第一层牺牲层,分别进行两次 RIE 刻蚀(腐蚀深度相应为 1 $\mu$ m 和 2 $\mu$ m)加工出支撑梁的布局和锚孔. 在 PSG 中刻蚀出梁的布局是为了改善后续镜面层淀积过程中表面平坦化的问题. 出于相同目的考虑,锚孔的宽度也控制在 1.5 $\mu$ m,这是因为有研究表明,当切口宽度仅为 1.5 $\mu$ m 时,后续淀积的材料表面可获得较好的平整度,但此宽度的支撑柱不足以获得稳定的支撑. 为此我们采用夹层结构,即支撑柱的中心为 PSG,而其四壁则为多晶硅,从而兼顾这两方面的性能. 在 610 $^{\circ}$  下淀积多晶硅 1 后,紧接着在其上生长一层 PSG 并在 1000 $^{\circ}$  下退火,从两面同时对多晶硅 1 进行对称扩散掺杂,这样可在多晶硅内获得较小的残余应力. 用 HF 溶液去

除上层 PSG 后,利用 RIE 加工出支撑梁结构. 随后淀积第二层 PSG 牺牲层,并在其上刻蚀出锚孔. 采用上述相同的方法完成多晶硅 2 即镜面层的加工,最后使用 HF 湿法腐蚀去除牺牲层,并用去离子水和异丙醇进行充分的漂洗. 最终加工出的反射镜如图 5 所示.

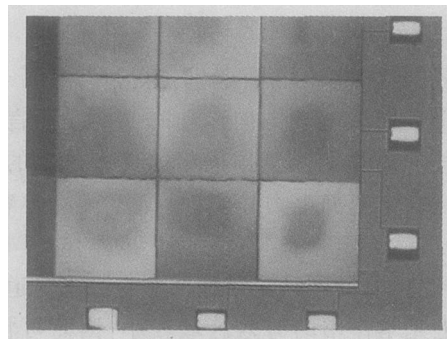


图 5 加工好的微镜照片

Fig. 5 Photograph of fabricated mirror

### 4 测试

我们采用图 6 所示的一套光学测试系统对反射镜三种运动状态下的静态性能进行测量<sup>[11]</sup>. 它主要由 He-Ne 激光器、xyz 三向位移台、对位移敏感的 pin 光电二极管以及其他相关的仪器所构成.

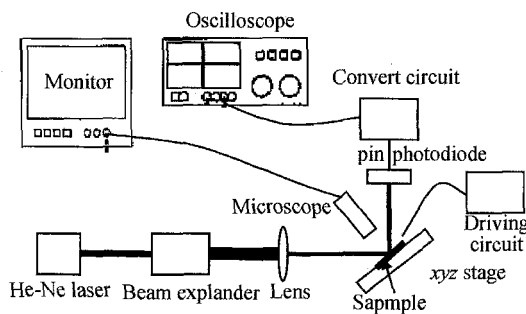


图 6 光学测试系统结构示意图

Fig. 6 Schematic of optical measurement system

首先对各个电极上同时施加相同电压时,镜面沿  $z$  轴方向的变形情况进行测试,结果如图 7 所示. 其中当电压为 78V 时,镜面的变形达到最大 2 $\mu$ m. 此后进一步增大电压,镜面变形不再增加,这种现象是由微镜的结构所产生的. 当镜面运动到 post 处时,由于它的阻挡作用,镜面不可能进一步向下运动. 而它们之间的距离是由第二层牺牲层的厚度所决定的. 图 8 所示为两种转动情况下,微镜的转角随

外加电压的变化关系. 从图中可清楚地看到在相同条件下, 镜面绕  $y$  轴的变形要远大于其绕  $x$  轴时的变形情况, 这与文章第 2 部分中的理论分析一致. 对于绕  $y$  轴转动而言, 当外加电压增加到 63V 时, 镜面将获得最大 2.3 的转动角度; 而绕  $x$  轴转动时, 类似的现象则出现在外加电压为 92V 时, 且最大值降为 1.45°. 同样从微镜结构出发, 可清楚地看到, 其转动角度主要受限于支撑梁与衬底之间的距离, 这是因为当转动到一定角度时, 支撑梁的顶端将首先与衬底发生接触, 从而阻止了镜面的进一步运动.

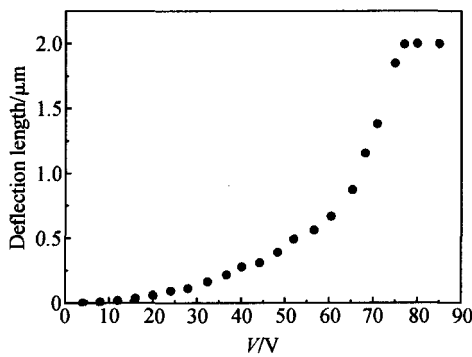


图 7 变形与电压关系的测试结果

Fig. 7 Measured deflection length as a function of applied voltage

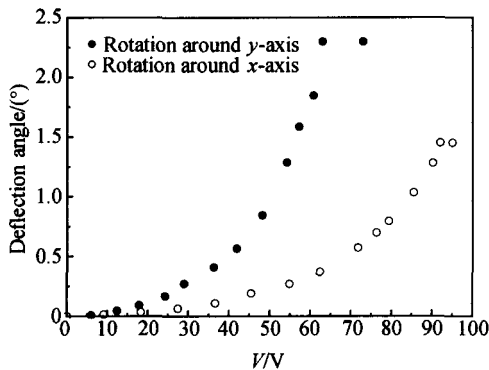


图 8 转角与电压关系的测试结果

Fig. 8 Rotation angle as a function of applied voltage

综上所述, 可以预见, 通过简单地增加牺牲层的厚度, 并相应增大驱动电压, 微镜将获得更大的变形范围.

### 5 结论

基于多层表面微加工工艺, 设计了一种新型的

微镜结构, 其支撑层是由一双 T 型梁构成, 其显著特点是, 能给微镜提供三种形式的运动, 即沿  $z$  轴方向平动以及绕  $x$  轴和  $y$  轴转动, 从而能满足不同应用场合的需要 (如相位调制、强度调制). 有限元分析表明, 各模态之间具有明显的差别, 从而保证了微镜运动中的稳定性. 测试结果表明, 在  $z$  方向上, 微镜的最大变形为  $2\mu\text{m}$ , 对于 He-Ne 激光器所发出的 633nm 激光而言, 相应于 12 的相位调制. 而其绕  $x$  轴和  $y$  轴的转动角度分别为  $\pm 1.45^{\circ}$  和  $\pm 2.3^{\circ}$ .

### 参考文献

- [ 1 ] Younse J M. Projection display systems based on the digital micromirror device (DMD). SPIE, 1995, 2641 : 64
- [ 2 ] Kiang M H, Solgaard O, Lau K Y, et al. Electrostatic comb-drive-actuated micromirrors for laser-beam scanning and positioning. J Microelectromech Syst, 1998, 7(1) : 27
- [ 3 ] Toshiyoshi H, Fujita H. Electrostatic microtorsion mirrors for an optical switch matrix. J Microelectromech Syst, 1996, 5 (4) : 231
- [ 4 ] Miller R A, Tai Y C, Xu G, et al. An electromagnetic MEMS  $2 \times 2$  fiber optic bypass switch. Transducers 97, Chicago, 1997 : 89
- [ 5 ] Pearson J E, Hansen S. Experimental studies of a deformable-mirror adaptive optical system. J Opt Soc Am, 1997, 67(3) : 325
- [ 6 ] Horenstein M N, Bifano T G, Pappas S, et al. Real-time optical correction using electrostatically actuated MEMS devices. J Electrostat, 1999, 46 : 91
- [ 7 ] Bifano T, Perreault J, Mali R K, et al. Microelectromechanical deformable mirrors. J Sel Topics Quantum Electron, 1999, 5 (1) : 83
- [ 8 ] Zhang Long, Dong Wei, Zhang Xindong, et al. Fabrication technique of bulk-silicon micro-optical switch in (110) silicon. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25 (1) : 99 (in Chinese) [张龙, 董玮, 张歆东, 等. 利用(110)硅片制作体硅微光开关的工艺研究. 半导体学报, 2004, 25(1) : 99]
- [ 9 ] Yu Hongbin, Chen Haiqing, Zhu Zimin, et al. Some novel deformable mirrors used in adaptive optics. Semiconductor Technology, 2004, 29(5) : 64 (in Chinese) [余洪斌, 陈海清, 竺子民, 等. 用于自适应光学系统几种新型可变形反射镜. 半导体技术, 2004, 29(5) : 64]
- [ 10 ] Min Y H, Kim Y K. Modeling, design, fabrication and measurement of a single layer polysilicon micromirror with initial curvature compensation. Sensors and Actuators, 1999, 78 : 8
- [ 11 ] Chung S W, Shin J W, Kim Y K, et al. Characteristics measurements of the  $100 \times 100$  fabricated micromirror. Dig IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings, Optical MEMS and Their Application, Keystone, CO, 1996 : 3

## A Novel Versatile Micromirror with Multi-Movement Mode

Yu Hongbin and Chen Haiqing

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract :** A novel micromirror is designed and successfully fabricated with multi-layer silicon surface micromachining technology using PSG as a sacrificial layer and polysilicon as a structural layer. It is composed of bottom electrode, support part and mirror plate, in which a double T type beam structure is used to support the mirror plate. It can provide mirror with the vertical movement and the rotation around two horizontal axes, thus enabling phase modulation and amplitude modulation for the incident light. The test results show that the maximum deflection length along the vertical direction of the mirror plate is  $2\mu\text{m}$ , while the rotation angle around  $x$  and  $y$  axis is  $\pm 2.3^\circ$  and  $\pm 1.45^\circ$  respectively. An even larger deflection magnitude can be obtained simply through the thickness of sacrificial layers increased.

**Key words :** MEMS; micromirror; phase modulation; amplitude modulation; T type beam

**EEACC :** 4180

**Article ID :** 0253-4177(2005)04-0816-05

---

Yu Hongbin male, was born in 1977, PhD candidate. He is engaged in research on fabrication process of MEMS and devices.

Chen Haiqing male, was born in 1947, professor. He is engaged in research on light information storage and micro-optical devices.

Received 20 April 2004, revised manuscript received 14 July 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics