

文章编号 1004-924X(2011)08-1845-07

非正交二维 MEMS 倾斜镜的研制

庄须叶^{1*}, 汪为民¹, 陶逢刚^{1,2}, 姚 军¹, 高福华³

- (1. 中国科学院 光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;
3. 四川大学 物理学院 高能量密度物理与技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064)

摘要:为提高传统二维倾斜镜在非正交方向上的光转换效率,设计并加工了一种转轴非正交二维 MEMS 倾斜镜。倾斜镜上电极非对称地固定在基底上,通过控制上、下电极的加电方式实现倾斜镜在两个非正交轴上的偏转变形。采用三层膜的结构设计,消除了上电极应力变形对镜面平整度的影响。通过在上电极加工微小突起,减小上下电极的重叠面积,避免了倾斜镜的吸合失效;另外,上、下电极仅在其边缘处重叠,确保了静电力的有效利用。研制的倾斜镜驱动电压低,在 3.5 V 的电压下可实现绕水平 X 轴 0.16°、绕倾斜 Y 轴 0.03°的偏转, Y 轴与 X 轴成 145.37°夹角。倾斜镜结构简单,可实现绕两个非正交转轴的偏转,空间适应性好,且有效避免了静电吸合对镜子的损坏。

关键词:转轴非正交倾斜镜; 二维倾斜镜; 微机电系统(MEMS)

中图分类号: TN703; TN366 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1845

Development of non-perpendicular 2D MEMS tilt mirrors

ZHUANG Xu-ye^{1*}, WANG Wei-min¹, TAO Feng-gang^{1,2}, YAO Jun¹, GAO Fuhua³

(1. State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Key Laboratory for High Energy Density Physics and Technology of the Ministry of Education, College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

* Corresponding author, E-mail: zxye888@hotmail.com

Abstract: To improve the efficiency of optical conversion and spatial adaptability of conventional 2D tilt mirrors, non-perpendicular 2D MEMS tilt mirrors were presented in this paper. The designed mirrors were fabricated by PolyMUMPS process and their upper electrodes were asymmetrically fixed on a substrate. The deformation of mirrors tilted around two non-perpendicular axes were controlled by applying voltages. By constructing mirrors with three-layer membranes, effects of the upper electrode's deformation on the flatness of the mirror surfaces were eliminated. By fabricating dimples on the upper electrode and reducing the overlapped area of mirrors' electrodes on the edges of the upper electrode, the damage caused by the pull-in effect was eliminated. Furthermore, the designed elec-

收稿日期: 2010-12-07; 修订日期: 2011-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60978051); 四川省百人计划资助项目; 西部三光博工资助项目(No. A11K011)

trodes made sure that forces produced by the applied voltages would produce large moments. The developed mirrors lower the working voltages, their tilting angles around X - and Y - axes are 0.16° and 0.03° at 3.5 V, respectively, and the angle between X axis and Y axis is 145.37° . It concludes that the mirrors can rotate around two non-perpendicular axes independently, and its advantages are simple structures and good spatial adaptability.

Key words: non-perpendicular tilt mirror; 2D tilt mirrors; Micro-electro-mechanical System(MEMS)

1 引言

光学倾斜镜在光通讯、投影显示、光学成像等系统中具有重要的应用价值。MEMS 倾斜镜具有可批量生产、成本低、能耗小、动态响应快等优点,因此得到了科研工作者的广泛关注^[1-5]。目前,用于光开关领域中的倾斜镜多是一维倾斜镜,为实现两个方向的光路转换需要倾斜镜的阵列组合,系统结构复杂、体积大,空间适应性弱,且驱动程序、控制系统繁杂、苛刻^[6]。二维倾斜镜可在一个器件上实现两个方向的光路转换,空间占用体积小,工作效率高。传统的二维倾斜镜的转轴是正交的,当转换光路有特殊要求时,如在一个受限空间内实现非正交方向上的两光路的相互转换时,则需要两次高精度的镜面偏转,不仅效率低,而且还可能因空间局限性而无法完成预定目标。

若倾斜镜的转轴是非正交的,则镜子在实现绕其非正交轴方向上的光路转换时,偏转一次即可完成,相对效率高。因此,在所转换光路呈非正交状态排布时,非正交二维 MEMS 倾斜镜具有独特的优势。本文基于硅表面加工工艺设计并制作了非正交的二维 MEMS 倾斜镜,镜面可以实现绕两个非正交转轴的倾斜偏转,倾斜镜的结构简单、驱动电压低,并能有效地防止静电吸合失效。

2 工作原理

转轴正交的二维 MEMS 倾斜镜的结构如图 1 所示, X, Y 轴是转轴。二维倾斜镜的光路转换原理如图 2 所示,假定某二维倾斜镜安装在原点 O 处,其可以沿正交的 X 轴和 Z 轴偏转。欲将光源 P 发出的光线 PO ,从光路 OA 输出时,只需要倾斜镜沿 Z 轴旋转一定角度即可。同理,若要其从光路 OB 输出,则镜面只需沿 X 轴旋转即可。当需要把光线沿光路 OC 输出时,镜面则需要先

沿 Z 轴旋转角度 ϕ ,将光路转移至 OC' ,然后再沿 X 轴旋转角度 θ ,最终将光路转移到 OC ,分两步完成预定要求。这种方案不仅费时、效率低,而且镜面的两次偏转都有严格的控制要求,当光路转换发生问题时,很难找出产生问题的根源,难以纠正。另外,若 C 处严禁光照或倾斜镜在某轴上的偏转角度受限,系统则无法完成预定目标。若原点处的倾斜镜是二维非正交,假设 X 轴、 U 轴是转轴,则镜面只要沿 X 轴和 U 轴各偏转一次即实现光路从 PO 到 OB, OC 的转换,操作简单,工作效率高。基于此,本文设计了转轴非正交的二维 MEMS 倾斜镜,倾斜镜的结构如图 3 所示。

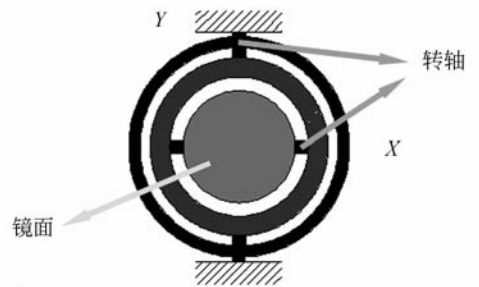


图 1 二维正交 MEMS 倾斜镜的结构示意图

Fig. 1 Configuration of perpendicular 2D MEMS tilt mirrors

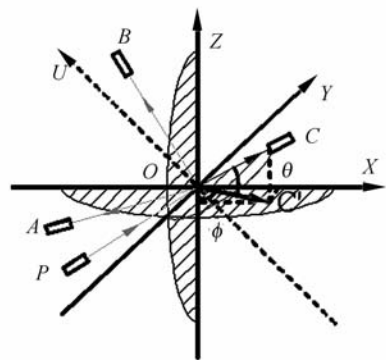


图 2 二维倾斜镜光路转换示意图

Fig. 2 Sketch of optical path conversion of 2D tilt mirrors

图 3 中的下图是倾斜镜的截面示意图。倾斜镜面由一根梁非对称地固定在基底上,此梁起到支撑镜面和转轴的作用。倾斜镜的上下驱动电极成插齿状分布,二者在垂直方向上有着 $2\ \mu\text{m}$ 的行程间隙,且在二者边缘处有 $35\ \mu\text{m} \times 305\ \mu\text{m}$ 的重叠区,当上下电极间存在一个电压差时,重叠区产生静电力,带动镜面偏转。若在镜面左右两边的下电极同时加电,则在对称静电力的作用下,镜面产生绕 X 轴方向的倾斜变形。若只在其一边下电极加电,则镜面会产生沿 Y 轴的倾斜变形。如图 3 所示,在镜面右边下电极加电时,静电力产生的力矩可分解为两个绕相互正交的 X 轴、 Y' 轴的分力矩 M_1 和 M_2 ,将 M_1 和 M_2 进行合成,再根据 M 的角度关系即可确定倾斜镜的实际 Y 轴的位置。

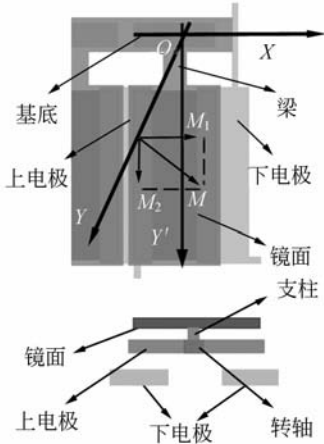


图 3 非正交二维倾斜镜的结构示意图

Fig. 3 Configuration of non-perpendicular 2D MEMS tilt mirrors

镜面平整度是影响倾斜镜性能的重要因素。如果镜面的平整度差,不仅会增加系统的插入损耗,而且还会导致系统偏转光路的实际方向与设计方向产生误差,直接导致开关失效,如图 4 所示。

用于成像领域的倾斜镜对镜面平整度的要求更高,当镜面不平整度达到其反射光束的波长量级时,经过倾斜镜反射后的光束会产生波前相差,降低成像系统的光学分辨率。根据瑞利判据,当镜面不平整度 $\delta \leq \lambda/8$ 时,系统可达到光学分辨率的衍射极限,其中 λ 为镜面反射光束的最小波长^[7]。

倾斜镜采用图 3 所示的三层膜结构,上电极

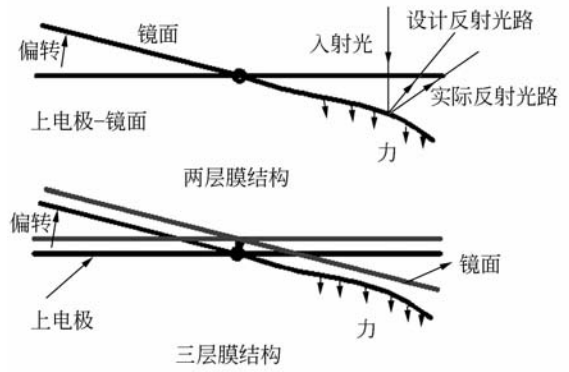


图 4 镜面结构对镜面平整度的影响示意图

Fig. 4 Effects of mirrors' constructions on their surface flatness

不直接作镜面使用,利用一支柱结构将第三层膜(镜面)固定在上电极上,由上电极的偏转运动带动镜面倾斜偏转。这种结构可有效防止镜面动态偏转对镜面平整度的影响,作用机理如图 4 所示。在静电力的作用下,上电极产生偏转的同时还会因内应力的作用产生应变变形,在三层膜结构中,应变变形没有传递到镜面,镜面的平整度高。

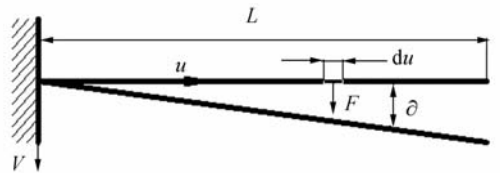


图 5 倾斜镜绕 X 轴偏转角度示意图

Fig. 5 Principle of mirror tilting around X axis

假设上下电极间的电压差为 V ,倾斜镜在 du 处绕 X 轴的偏转角度为 θ ,在图 5 所示的坐标系中静电力产生的绕 X 轴的总力矩为:

$$M_x(u) = - \int_{u_0}^L \frac{\epsilon_r \epsilon_0 u H V^2}{(d - u \sin \theta)^2} \cos \theta du, \quad (1)$$

式中: L 和 H 分别是倾斜镜上下电极重叠区域的长度和宽度; u_0 是重叠区的初始 u 坐标; ϵ_r, ϵ_0 分别是相对和绝对介电常数; d 是上下电极间重叠区的初始间距。

在小角度偏转下,公式(1)中偏转角度 θ 的正弦值近似为零,余弦值近似为 1。根据材料力学, θ 与力矩 M_x 有以下关系成立^[8],

$$\theta(u) = - \int_0^L \frac{M_x(u)}{EI_x} du + C, \quad (2)$$

式中, E 是弹性模量; I_x 是镜子相对 X 轴的转动

惯量; C 是常数, 由倾斜镜的初始条件确定。根据公式(1)、(2)即可确定 $\partial(u)$, 取 $\partial(u_1)$ 作为倾斜镜的偏转角度, u_1 是镜面支撑柱的 u 坐标。

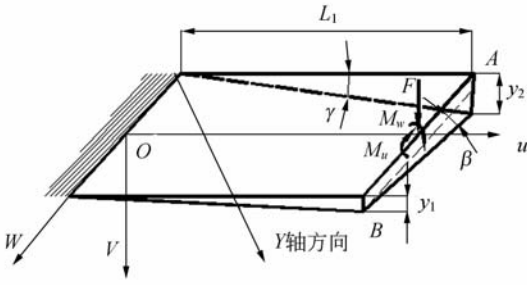


图 6 倾斜镜绕 Y 轴偏转原理图

Fig. 6 Principle of mirror tilting around Y axis

图 6 是倾斜镜沿 Y 轴偏转的原理示意图。将作用在上下电极重叠区的静电力等效为作用在镜子梁上的一个集中力 F 和两个力矩 M_w, M_u , 如图 6 所示。小角度偏转近似下, 集中力 F 及两个力矩 M_w, M_u , 可用以下公式计算:

$$F = -\frac{1}{2} \int_{u_0}^L \frac{\epsilon_r \epsilon_0 H V^2}{d^2} du, \quad (3)$$

$$M_w(u) = -\frac{1}{2} \int_{u_0}^L \frac{\epsilon_r \epsilon_0 u H V^2}{d^2} du, \quad (4)$$

$$M_u(\omega) = -\frac{1}{2} \int_{\omega_0}^H \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \omega H V^2}{d^2} d\omega. \quad (5)$$

ω_0 为重叠区 W 的初始坐标。A, B 两点的位移为 y_1 和 y_2 , 分别是以上 3 个因子的作用和, 写作:

$$y_1 = \frac{FL_1^3}{3EI} + \frac{M_w L_1^2}{2EI} - \frac{M_u L_1^2}{GI_p}, \quad (6)$$

$$y_2 = \frac{FL_1^3}{3EI} + \frac{M_w L_1^2}{2EI} + \frac{M_u L_1^2}{GI_p}, \quad (7)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{y_2 - y_1}{H_1}\right) = \arcsin\left(\frac{2M_u L_1^2}{GI_p}\right), \quad (8)$$

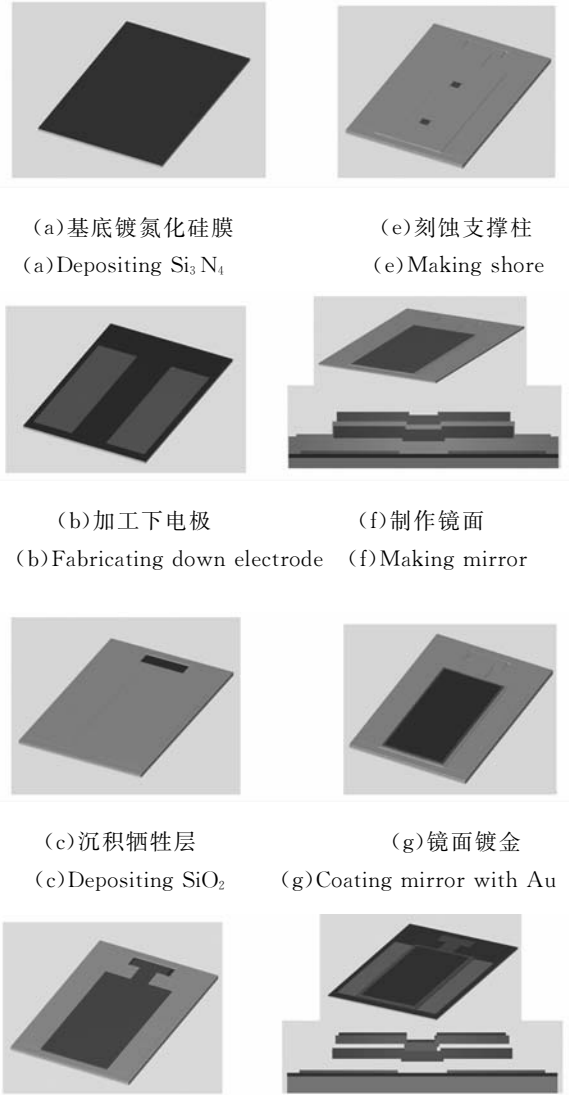
式中, G 是剪切弹性模量; I_p 是镜子的相对极惯性矩; 由式(8)可知镜子绕 Y 轴的偏转角度的大小取决于 M_u , 而 Y 轴的位置则由 M_w 和 M_u 共同决定。

3 试验研究

3.1 加工工艺

应用表硅 PolyMUMPS 工艺对设计的倾斜镜进行了加工, 主要加工工艺过程如图 7 所示:

- (a) 首先在硅基底上镀氮化硅绝缘层;
- (b) 在绝缘层上镀多晶硅, 并刻蚀出下电极;
- (c) 沉积二氧化硅牺牲层, 厚度为 $2 \mu\text{m}$, 作为倾斜镜的行程, 并刻蚀出锚点;
- (d) 沉积第二层多晶硅, 刻蚀出上电极;
- (e) 沉积第二层牺牲层, 并刻蚀出支撑柱结构;
- (f) 沉积第三层多晶硅, 并刻蚀出镜面结构, 图中下图是截面图, 最上层是多晶硅制成的镜面。
- (g) 镜面镀金膜;
- (h) 腐蚀牺牲层, 释放镜面, 释放后的截面图如图 7(h) 所示。



(a) 基底镀氮化硅膜 (a) Depositing Si_3N_4 (e) 刻蚀支撑柱 (e) Making shore

(b) 加工下电极 (b) Fabricating down electrode (f) 制作镜面 (f) Making mirror

(c) 沉积牺牲层 (c) Depositing SiO_2 (g) 镜面镀金 (g) Coating mirror with Au

(d) 制作上电极 (d) Fabricating upper electrode (h) 结构释放 (h) Releasing mirror

图 7 倾斜镜加工工艺示意图

Fig. 7 Fabrication process of mirror

图 8 是加工完成后的倾斜镜显微镜照片,镜面尺寸 $150\ \mu\text{m} \times 310\ \mu\text{m}$ 。图中镜面上的黑色小方块是释放孔,两个较大的白色方块是镜面支撑柱的结构。由于工艺中采用保形沉积镀膜,以上结构在镜面上留下了工艺残痕。

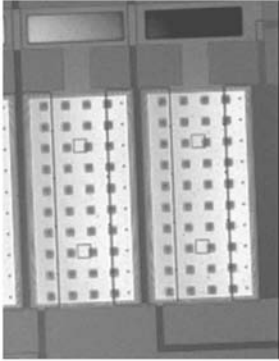


图 8 倾斜镜 SEM 照片
Fig. 8 SEM photo of mirrors

基于静电吸引型的驱动器,当其位移达到总行程的 $1/3$ 时,常会发生静电吸合现象,造成上下电极紧密粘连在一起,且去电后仍然无法分离,造成镜子的损坏^[9-10]。为防止静电吸合现象的发生,采取了以下两个措施:

(1)减小上下电极间的重叠面积。倾斜镜上电极的面积为 $160\ \mu\text{m} \times 314\ \mu\text{m}$,而上下电极的重叠区域面积仅为 $35\ \mu\text{m} \times 305\ \mu\text{m}$,占上电极总面积的 21.25% ,减去上电极释放孔的面积,二者的实际接触面积仅占上电极总面积的 20% 左右,即使两下电极同时加电也只有 40% 左右。由公式(4)、(5)可知,只有作用在电极外边缘处的静电力才会产生较大的力矩。如图 3 所示,上下电极间仅在其外边缘处重叠的设计有效地利用了静电力,既可产生大的转动力矩,又缩小了吸合时两电极间的接触面积,减小了释放阻力;

(2)在上电极的下表面加工小突起结构。在上电极和下电极接触时,小突起可起缓冲带的作用,有效防止静电吸合^[11]。

试验证明,以上措施很好地避免了静电吸合失效的发生。当发生静电吸合后,去电,上电极在其内应力的作用下可自行抬起,回复初始状态。

3.2 性能分析

用 Zygo 轮廓仪对加工的倾斜镜的性能进行了测试,图 9 是所用轮廓仪的原理图。白光光源发出的光通过分束器进入显微物镜,物镜中内置

一个 Mirau 式干涉仪,通过分束器将光分为两束,一束从样品表面反射回来,另一束射到物镜中的参考面上反射回来,这两束光在 CCD 上发生干涉,可得到倾斜镜的带干涉条纹的显微成像。倾斜镜的表面二维轮廓通过显微镜放大,在 CCD 上测量得到,纵向轮廓即表面的高低起伏则通过干涉方式获得。

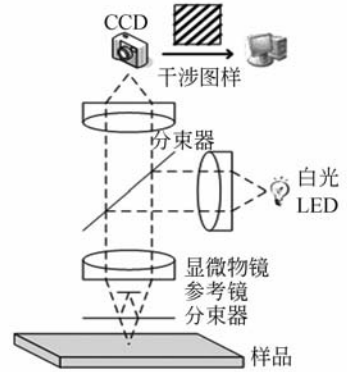


图 9 测试系统原理图
Fig. 9 Principle of detecting system

实验中,首先在无电压作用时测量倾斜镜的形貌并作为参考面。然后对倾斜镜的某下电极加电,测量镜面在此电压下的变形情况,并将此变形情况与参考面做比较即可得到镜面的实际偏转角度。

倾斜镜镜面沿两非正交轴的实际偏转测量结果如图 10、图 11 所示。图 10 中倾斜镜上电极接地,两下电极同时加电,在对称静电力的作用下,镜面绕 X 轴偏转。图 11 中,只在镜子的右下电极加电,镜子产生绕 Y 轴的偏转, Y 轴与水平 X 轴的夹角为 145.37° 。

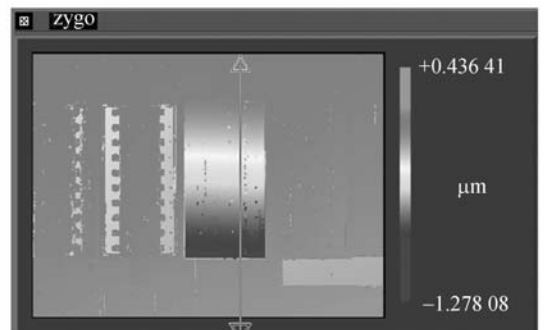


图 10 偏转镜沿 X 轴偏转测量图
Fig. 10 Experimental photo of mirror tilting around X axis

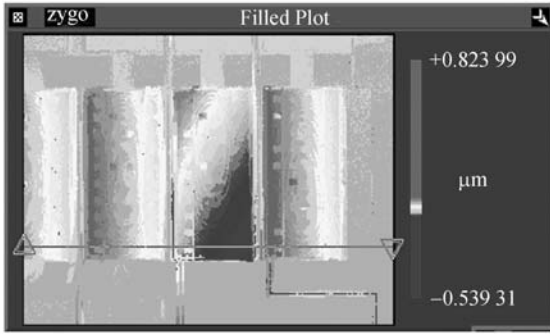


图 11 偏转镜沿 Y 轴偏转测量图

Fig. 11 Experimental photo of mirror tilting around Y axis

倾斜镜的电压-偏转角度测试特性曲线如图 12 所示。在双下电极加电压 3.5 V 时,倾斜镜可实现绕 X 轴的 0.16° 的倾斜偏转,达到设计的最大

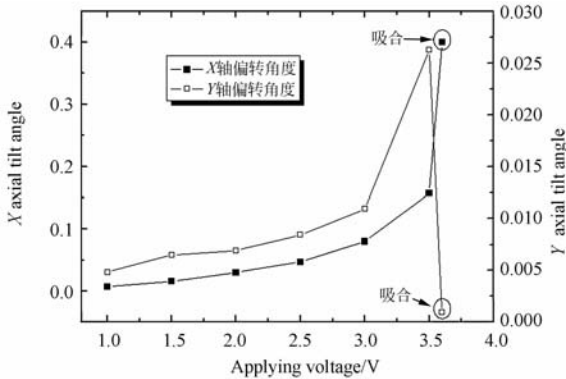


图 12 倾斜镜电压-偏转角度测试曲线

Fig. 12 Experimental tilt angles versus applying voltages

参考文献:

- [1] JUSTIN D M, SUPRIYO S, ROBERT L. BYER, *et al.*. Deformable mirror development at stanford university [J]. *SPIE*, 2002, 4493: 1-12.
- [2] 李加东, 张平, 吴一辉, 等. 用于微镜制作的叠层光刻胶工艺及残余应力控制 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2204-2208.
LI J D, ZHANG P, WU Y H, *et al.*. Laminated photoresist layer technology and residual stress control for micromirror fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2204-2208. (in Chinese)
- [3] BIFANO T, CORNELISSEN S, BIERDEN P. MEMS deformable mirrors in astronomical adaptive optica [J]. *1st AO4ELT conference*, 2010: 06003.
- [4] 李四华, 刘玉菲, 高翔, 等. 微机电系统扭转微镜面驱动器的研制 [J]. *半导体学报*, 2006, 27(4):

756-760.

大值。只在右下电极加电压 3.5 V 时,倾斜镜产生绕 Y 轴的 0.03° 的偏转后,因镜面在垂直方向达到静电吸合而停止。倾斜镜沿 X 轴偏转的线性区间为 $0 \sim 0.16^\circ$,驱动电压为 1.0~3.5 V;沿 Y 轴偏转角度的线性区间为 $0 \sim 0.01^\circ$,驱动电压为 1~3 V。

4 结 论

本文设计并加工了非正交的二维 MEMS 倾斜镜,倾斜镜结构简单、镜面可以实现绕两个非正交转轴的偏转。倾斜镜的驱动电压低,在 3.5 V 的电压下即可实现绕水平 X 轴 0.16° ,绕倾斜 Y 轴 0.03° 的偏转,达到设计要求的最大值。采用三层膜的结构形式消除了上电极传递给镜面的变形,有效提高了镜面平整度。通过在上电极上加工小突起,减小上下电极的重叠面积,避免了倾斜镜的吸合失效,且上下电极只在其边缘处重叠的电极布置,提高了静电力的有效利用率。

但是,由于大镜面和大角度偏转是表面硅加工工艺制作 MEMS 倾斜镜难以同时兼顾的两项指标^[12],制作的倾斜镜存在着偏转角度低的不足,通过增加驱动器的行程或加工小镜面、多单元的镜面矩阵,可在保证大反射面积的情况下提高倾斜镜的偏转角度。

- [5] 张昱, 潘武. 折叠弹簧式 MEMS 水平扭转微镜的设计与分析 [J]. *光学精密工程*, 2005, Z1: 81-85.
ZHANG Y, PAN W. Design and analysis of a MEMS horizontal torsion micro mirror with folded springs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, Z1: 81-85. (in Chinese)
- [6] 马文英, 姚军, 任豪, 等. MEMS 二维静电驱动扫描镜设计和分析 [J]. *微纳电子技术*, 2009, 46(5): 296-300.
MA W Y, YAO J, REN H, *et al.*. Design and analysis of MEMS 2D electrostatic scanning mirrors [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2009, 46

(5):296-300. (in Chinese)

- [7] 穆参军,赵本刚,吴亚明. 高速 MEMS 扫描微镜动态变形特性研究[J]. 传感技术学报,2008,21(4):640-643.

MU C J, ZHAO B G, WU Y M. Study on dynamic deformations of high speed MEMS scanning micro-mirror [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008,21(4):640-643. (in Chinese)

- [8] 范钦珊,孙汝劼. 工程力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

FAN Q SH, SUN R J. *Engineering Mechanics* [M]. Beijing: High Education Press, 1999. (in Chinese)

- [9] DEGANI O, SOCHER E, LIPSON A, *et al.*. Pull-in study of an electrostatic torsion microactuator

[J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 1998,7(4):373-379.

- [10] NEMIROVSKY Y, BOCHOBZA-DEGANI O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2001,10(4):601-615.

- [11] 胡放容. 自适应光学系统中 MEMS 空间光调制器的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2009.

HU F R. *Study on microelectromechanical system based spatial light modulator for adaptive optics* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences,2009. (in Chinese)

- [12] TSAI J, WU M C. Gimbal-less MEMS two-axis optical scanner array with high fill-factor [J]. *IEEE J. MEMS*, 2005,14(6):1323-1328.

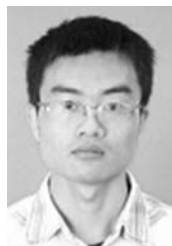
作者简介:



庄须叶(1981—),男,山东日照人,博士,助理研究员,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事自适应光学、MEMS 变形镜等方面的研究。E-mail: zxye8888@hotmail.com



汪为民(1981—),男,安徽安庆人,硕士,研究实习员,2009年于清华大学获得硕士学位,主要从事微机电系统(MEMS)的设计与检测方面的研究。E-mail: wangweimin06@tsinghua.org.cn



陶逢刚(1986—),男,甘肃民勤人,硕士研究生,2009年于中国科技大学获学士学位,主要研究方向为 MEMS 变形镜。E-mail: tfg86@mail.ustc.edu.cn



姚军(1973—),男,贵州安顺人,博士,研究员,2001年于四川大学获得博士学位,2001年9月至2007年5月期间,先后在英国 Strathclyde University, Durham University 和 College Lodon 从事 MEMS、微光学和自适应光学等领域的研究,现主要从事激光技术、自适应光学、MEMS 及其应用等方面的研究。Email: junyao@ioe.ac.cn



高福华(1975—),男,四川雅安人,博士,教授,博士生导师,2003年于四川大学获得博士学位,主要从事强激光技术、衍射光学设计、微细加工光学技术以及波前工程等方面的研究。Email: gaofuhua@scu.edu.cn