

# 静电驱动连续面形微机电系统变形镜的制作

胡放荣<sup>1</sup> 马文英<sup>2</sup> 汪为民<sup>3</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

<sup>2</sup>成都信息工程学院通信工程学院, 四川 成都 610225

<sup>3</sup>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

**摘要** 基于三层多晶硅表面加工工艺和自适应光学经验公式,设计并制作了一种静电驱动的 16 单元连续面形微机电系统(MEMS)变形镜(DM),并用 ZygoNewView7300 白光干涉仪对样片的静态特性和动态响应特性进行了测试。静态测试结果表明,器件在 150 V 电压下的最大形变量为  $0.667 \mu\text{m}$ ,相邻单元之间的交联值为 9%,镜面位置重复性为 10%。动态测试结果表明,器件对正弦驱动信号的响应时间小于  $30 \mu\text{s}$ ,响应曲线近似为一条余弦曲线,谐振频率为 36 kHz。该变形镜可用于自由空间光通信、激光光束整形、波前畸变校正、投影显示、生物医学成像和入眼视差校正等重要领域。

**关键词** 光学器件;微机电系统;变形镜;静电驱动;表面微加工;光束整形

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1016001

## Fabrication of Electrostatically Actuated MEMS Deformable Mirror with Continuous Surface

Hu Fangrong<sup>1</sup> Ma Wenying<sup>2</sup> Wang Weimin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronics and Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

<sup>2</sup>College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** Based on a three-layer polysilicon surface micromachining process and some experience formulas of adaptive optics, an electrostatically actuated microelectromechanical systems (MEMS) deformable mirror (DM) with 16 actuators and continuous surface is designed and fabricated. Both static and dynamic characteristics of the prototype are tested using a scanning white light interferometer ZygoNewView7300. The result from the static test shows that the displacement of the actuator is  $0.667 \mu\text{m}$  at 150 V, the interaction between the neighboring actuator is 9%, and the position repeatability of the surface of DM is 10%. At the same time, the result from the dynamic test shows that the response time of the prototype is less than  $30 \mu\text{s}$  and a cosine curve is observed under a sine driving signal. The resonance frequency of the actuator is about 36 kHz. This type of DM can be used for free space optical communication, laser beam shaping, wavefront correction, projection, biomedical imaging and human eye aberration correction.

**Key words** optical devices; microelectromechanical systems; deformable mirror; electrostatically actuated; surface micromachining; beam shaping

**OCIS codes** 230.4685; 220.1080; 120.4610

收稿日期: 2011-05-17; 收到修改稿日期: 2011-06-08

基金项目: 桂林电子科技大学博士科研启动基金(UF10029Y)资助课题。

作者简介: 胡放荣(1973—),男,博士,副教授,主要从事微机电系统及其应用等方面的研究。

E-mail: hufangrong@sina.com

# 1 引 言

变形镜(DM)是自适应光学系统中用来实时校正畸变波前的一个核心器件,可以用于半导体激光抽运固体激光器热畸变补偿<sup>[1]</sup>、波前畸变校正<sup>[2,3]</sup>、人眼视差校正<sup>[4]</sup>和视网膜成像<sup>[5]</sup>等领域,其发展水平从某种意义上代表了自适应光学技术的发展水平。为了满足大口径天文望远镜波前畸变校正和人眼视网膜成像系统中大幅度高阶像差校正的需要,变形镜不仅要有小体积、大行程,而且还要有很高的驱动单元密度。与其他类型的变形镜比较,基于机电系统(MEMS)技术的静电驱动变形镜<sup>[6,7]</sup>以其体积小、能耗低、单元密度高、响应速度快以及与集成电路兼容性好等优点而成为变形镜的一个重要发展方向。

根据表面是否连续,变形镜有分立表面和连续表面两类<sup>[8]</sup>。分立表面 MEMS 变形镜相邻单元之间的空隙较大,存在很大的光衍射损耗。连续表面 MEMS 变形镜是在一块薄反射镜下面连接各种类型的 MEMS 驱动器,通过对驱动器的控制使镜面产生局部变形,从而实现反射光束波前的控制。连续表面 MEMS 变形镜具有波前拟合误差小、光能损失少、能够保持相位连续等优点,在许多自适应光学系统中倍受青睐。其制作工艺主要有表面工艺、体硅工艺和 LIGA 工艺,本文将基于表面工艺设计并制作连续表面 16 单元 MEMS 变形镜。

# 2 器件设计

变形镜设计时,主要考虑其光学性能参数和工艺线的实际加工能力。光学性能参数主要包括驱动器数目、驱动器行程、交连值、镜面自然频率、影响函数和控制带宽等。对于天文观测系统来说,这些参数需要结合实际应用中所要达到的斯特列尔比(SR)、工作波长  $\lambda$ 、光学湍流和光学系统的口径,并利用一些经验公式来估算。对于校正大气湍流的天文成像系统来说,所需的变形镜数目可估算为<sup>[9]</sup>

$$N_a = \left[ \frac{\kappa k^2 z C_n^2 D^{5/3}}{2.9 \ln(1/S)} \right]^{6/5}, \quad (1)$$

式中  $\kappa$  为 Kolmogorov 拟合常数,  $k$  为入射的波数,  $z$  为纬度或传输距离,  $C_n^2$  为大气结构常数,  $D$  为光学系统的通光口径,  $S$  为系统所需要的 SR。

驱动器的行程,是指驱动器稳定工作所能够达到的最大位移量或形变量,由系统需要校正的波前像差的大小来决定。对于大气湍流校正的成像光

学系统来说,系统需要的最大相移量可以近似为<sup>[10]</sup>

$$(\Delta\phi)_{\max} = 0.57k \sqrt{z C_n^2 D^{5/3}}, \quad (2)$$

而根据光程与相移量的关系,最大相移量又可以表示为

$$(\Delta\phi)_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda} f_{\text{stroke}}, \quad (3)$$

由(2)和(3)式可知,驱动器的行程可以表示为

$$f_{\text{stroke}} = \frac{0.57\lambda k}{4\pi} \sqrt{z C_n^2 D^{5/3}}. \quad (4)$$

交连值是指相邻驱动器镜面的变形量与施加电压的驱动器对应镜面的变形量之比。交连值过小,变形曲线波及的区域也小,会造成两个相邻驱动器产生的镜面变形不能互相衔接,变形镜变形后会形成许多孤立点而不能构成连续表面,继而引入高阶像差。交连值过大,变形曲线波及的区域过宽,会使相邻驱动器之间的相互叠加影响过大,这会给面形控制带来很大困难。当仅有一个驱动器被驱动时整个镜面面形叫作变形镜的面形影响函数,简称影响函数,它是连续表面变形镜所特有的一个重要参数,连续表面变形镜的整个面形是各个驱动器上的影响函数叠加的结果。影响函数可以近似看作一个高斯函数<sup>[11]</sup>

$$f(r) = \exp[-(|r|/\omega)^\alpha], \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为高斯指数,  $\omega$  为影响函数的特征宽度,  $r$  为变形镜镜面上各点的坐标,坐标原点在驱动器的中心。 $\omega$  的大小由驱动器的间距、镜面的刚度、镜面支撑点的形状和尺寸等因素共同决定。

工艺线的实际加工能力决定了各层材料的厚度,目前,制作 MEMS 变形镜最常用的工艺是表面工艺和体硅工艺,表面工艺是一种“加法”工艺,通过沉积多层薄膜制作而成;体硅工艺是一种“减法”工艺,通过湿法或干法刻蚀方法从基底上去除某些部分,还有可能采用键合工艺进行结构连接。根据表面工艺的实际加工能力,设计了 16 单元 MEMS 变形镜,器件结构如图 1 所示,单元间距  $d=200 \mu\text{m}$ 。各层厚度见工艺流程图(图 2)。

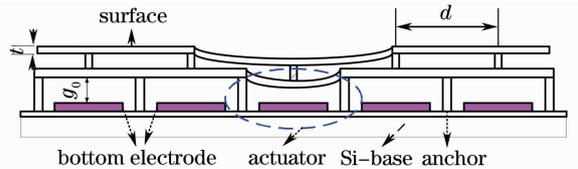


图 1 连续表面 MEMS 变形镜结构示意图

Fig. 1 Schematic of continuous surface MEMS DM

### 3 工艺流程

采用表面工艺制作图 1 所示的变形镜<sup>[12]</sup>主要

包括基底选择、薄膜沉积、光刻、刻蚀和湿法腐蚀等步骤,具体工艺流程如图 2 所示。

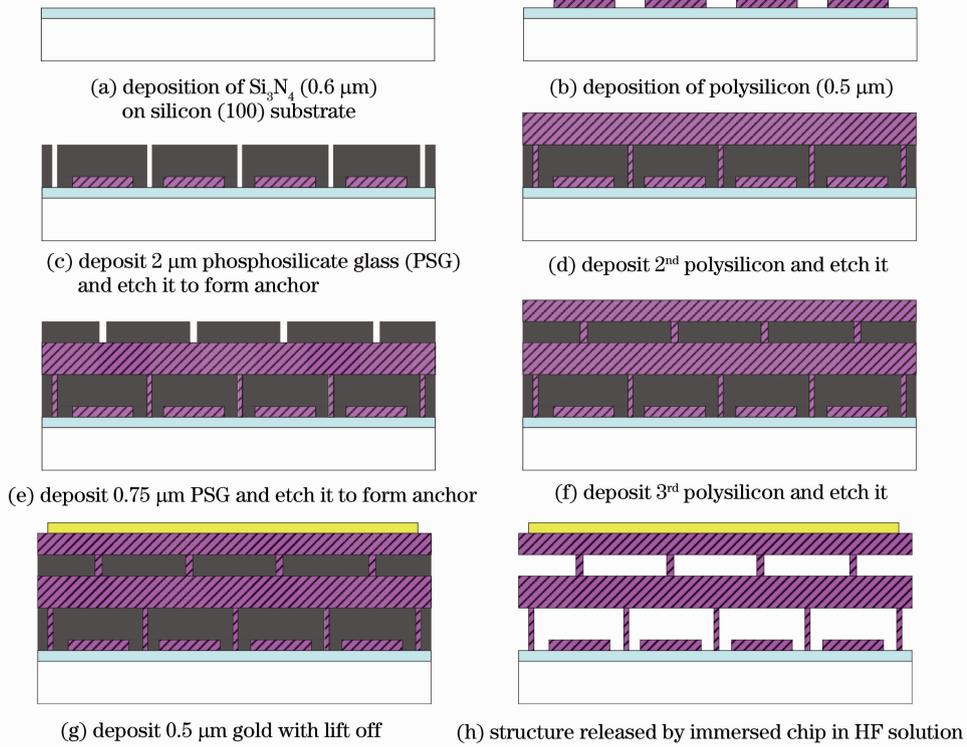


图 2 工艺流程图

Fig. 2 Fabrication flow

在最后一步采用湿法腐蚀释放结构时,首先将器件浸入质量分数为 49% 的 HF 溶液中,1.5~2 min 后将器件取出并放入去离子水中 3~5 min;再从去离子水中取出放入乙醇溶液中浸泡 2~4 min;最后从乙醇溶液中取出放入 110 °C 的烘烤箱中烤 10 min 左右。

该表面工艺的关键是如何有效防止结构释放时出现的静态粘连问题,防止静态粘连的方法可分两类<sup>[13]</sup>:一类是在制作过程中,阻止结构层与基底之间物理连接的方法,如在结构层下面设计一些小凸起,干燥过程中采用冷干燥、临界干燥或干腐蚀技术等;另一类是通过缩减表面能量来实现,如借助表面碰撞作用减少接触面积的表面处理以及降低表面粗糙度等方法。最终制作出来的变形镜显微镜照片如图 3 所示,表面的许多释放孔是便于 HF 溶液进入牺牲层进行湿法腐蚀,以释放结构层。

### 4 静态特性测试

静态测试时被测量是静止不变的,即测量仪器的输入量为常量。对器件进行静态测试时,保持输入电压  $u$  为一系列稳定值,然后利用 ZygoNewView7300

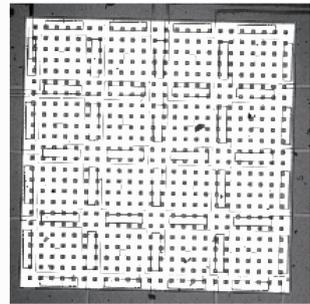


图 3 16 单元连续表面变形镜显微照片

Fig. 3 Micrograph of continuous surface MEMS DM with 16 actuators

扫描白光干涉仪对器件的影响函数、交联值和镜面位置重复性进行了测试。

#### 4.1 影响函数与交联值

当变形镜仅有一个中心驱动器施加 150 V 电压时,局部镜面的面形影响函数曲线如图 4 所示。将相邻驱动器上的镜面形变量  $\delta_n$  与施加电压的中心驱动器的形变量  $\delta_a$  相比可得交联值

$$J = \frac{\delta_n}{\delta_a} = \frac{0.067}{0.72} \times 100\% = 9\%, \quad (6)$$

该交联值符合 Pearson 经验所定义的理想交联值范围<sup>[14]</sup>(5%~12%)。

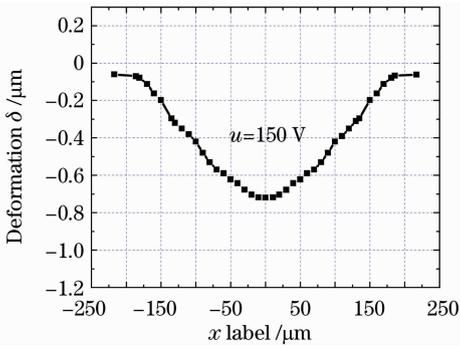


图 4 影响函数

Fig. 4 Influence function

#### 4.2 位置重复性

在同一驱动电压下镜面位置的重复性是一项反映变形镜性能好坏的重要参数,对器件升压和降压过程的镜面位置重复性测试结果如图 5 所示。

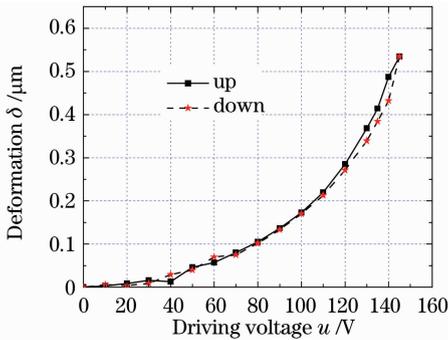


图 5 位置重复性

Fig. 5 Position repeatability

由图 5 可知,低电压区域的重复性较好,随着电压的增加,位置偏差也会增大。根据重复性的定义<sup>[15]</sup>,各个测试点升、降压过程位置偏差的最大值  $\delta_m$  与最大形变量  $y_m$  之比,可由图 5 的数据求得镜面位置重复性为

$$\delta_R = \frac{|\delta_m|}{y_m} \times 100\% = \frac{0.055}{0.537} \times 100\% = 10\% \quad (7)$$

#### 5 动态特性测试

动态测试时被测量是随时间或空间变化的,仪器的输入量与测试结果(数据或信号)也是随时间变化的。动态特性是反映器件对动态信号的响应特性,因为自适应光学系统是一个实时校正过程,入射波前在实时地变化,MEMS 变形镜也必须随波前的变化作相应的变形或运动,对器件的控制就是一个动态过程。为了衡量器件的动态特性,对器件中的一个驱动单元施加正弦激励信号进行动态测试。测试时,首先由波形发生器产生正弦信号,其中一路通

过高压放大器放大后去驱动待测的器件,另一路作为频闪灯的同步触发脉冲。闪光瞬间拍下的器件表面干涉条纹输入到计算机中,经过快速处理后即可获得器件的位移或表面高度随动态信号的变化规律。实验过程中,可以根据实际器件的本征频率以及测试需要来确定驱动信号的频率和幅值。

#### 5.1 对正弦信号的响应

当器件施加 0~25 V 的直流偏置和频率为 4 kHz、峰值为 100 V 的正弦驱动信号时,对其在 0~720°范围内进行相位扫描,扫描步长为 10°,所得的动态响应曲线如图 6 所示。

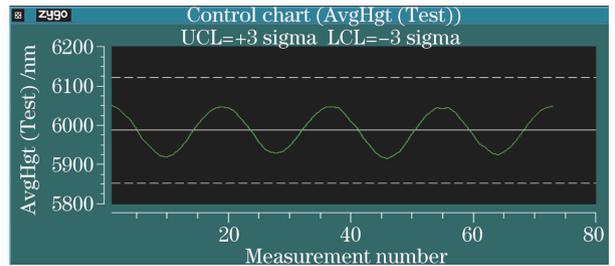


图 6 器件对正弦信号的响应

Fig. 6 Response of device to sine wave

由图 6 可知,镜面位置对正弦驱动信号响应曲线近似为余弦曲线,这与实际情况相符,因为驱动信号的电压有效值越大,镜面位置越低,响应曲线的峰值位置正好对应的驱动信号为零。由图还可以看出器件对正弦驱动信号的响应时间小于 1/8 周期(约为 30  $\mu$ s)。

#### 5.2 谐振频率

自适应光学中单元器件的谐振频率是限制系统带宽的一个重要参数,为了避免在谐振频率处出现激振,自适应光学系统驱动信号的频率必须避开系统中任何一个单元器件的谐振频率。通常系统带宽为最低的单元器件谐振频率的 1/10。当在变形镜上施加 0~25 V 的直流偏置和一个峰值 100 V 的正弦驱动信号时,对其在 10~95 kHz 范围内进行频率扫描,所得的第一阶模态镜面高度对频率响应曲

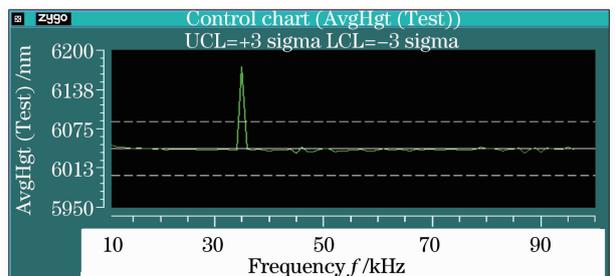


图 7 频率响应

Fig. 7 Frequency response

线如图 7 所示。由图可知, 镜面第一阶模态的谐振频率约为 36 kHz, 若系统的闭环工作带宽是镜面自然频率的 1/10, 则由此器件所组成的系统带宽可达 3.6 kHz, 能够满足大多数自适应光学系统对变形镜本征频率和带宽的要求。

## 6 结 论

详细介绍了一种静电驱动的 16 单元连续表面 MEMS 变形镜的设计原理和制作工艺, 并加工出了变形镜样片。利用白光扫描干涉仪对器件的静态和动态性能进行了测试, 在 150 V 电压下, 镜面的最大形变量为 0.667  $\mu\text{m}$ , 交联值为 9%, 升压与降压过程的位置重复性为 10%。器件谐振频率约为 36 kHz, 对正弦驱动信号的响应时间小于 30  $\mu\text{s}$ , 响应曲线近似为一条余弦曲线。该变形镜的制作方法对于多单元数连续表面 MEMS 变形镜的研制具有参考价值。

**致谢** 感谢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姚军研究员及其课题组的大力支持和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Tan Youjun, Chen Haiqing, Kang Jingran *et al.*. Design of MEMS deformable micro-mirror for compensating thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 853~858  
谭佑军, 陈海清, 康竟然等. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的 MEMS 微变形镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 853~858
- 2 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of cavity deformable mirror in patawatt facility with U-turn reverser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2920~2923  
代万俊, 胡东霞, 周 维等. 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2920~2923
- 3 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong *et al.*. Experimental research on spatial fitting capability to Zernike aberrations of 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1756~1760

- 4 Li Bangming, Liao Wenhe, Shen Jianxin *et al.*. Wavefront control algorithm research on micromachined membrane deformable mirror in human eye aberration correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 917~921  
李邦明, 廖文和, 沈建新等. 微机械薄膜变形镜在人眼视差校正中的波前控制算法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 917~921
- 5 Shen Jianxin, Niu Saisai. Retina imaging based on micromachined membrane deformable mirror[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2010, **29**(1): 111~116  
沈建新, 钮赛赛. 基于微机械薄膜变形镜的人眼视网膜成像研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2010, **29**(1): 111~116
- 6 Thomas Bifano. Mems deformable mirrors [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(1): 21~23
- 7 S. A. Cormelissen, P. A. Bierden, T. G. Bifano *et al.*. 4096-element continuous face-sheet MEMS deformable mirror for high-contrast[J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2009, **8**(3): imaging 031308~031310
- 8 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Yu Xin. Adaptive Optics[M]. Beijing, National Defence Industry Press, 1996. 112~118  
周仁忠, 阎吉祥, 俞 信. 自适应光学[M]. 北京, 国防工业出版社, 1996. 112~118
- 9 J. E. Pearson, S. Hansen. Experimental studies of a deformable mirror adaptive optical system[J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1977, **67**(3): 325~333
- 10 Raji Krishnamoorthy Mali. MEMS Deformable Mirror for Adaptive Optics[D]. Boston; Boston University, 1999. 17
- 11 Rao Xuejun, Ling Ning, Jiang Wenhan. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10): 1447~1451  
饶学军, 凌 宁, 姜文汉. 用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(10): 1447~1451
- 12 Hu Fangrong, Yao Jun. A MEMS deformable mirror actuator based on electrostatic repulsive force[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 41~44  
胡放荣, 姚 军. 静电排斥型微电子机械变形镜驱动器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(1): 41~44
- 13 M. Elwenspoek, H. Jansen. Silicon Micromachining [M]. London; Cambridge University Press, 2004. 132~133
- 14 Ling Ning, Guan Chunlin. The development of deformable mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(1): 14~22  
凌 宁, 官春林. 变形反射镜的发展[J]. *光电工程*, 1995, **22**(1): 14~22
- 15 Dong Yonggui. Microsensors[M]. Beijing, Tsinghua University Press, 2007. 43  
董永贵. 微型传感器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 43