

# 新型分立倾斜式微变形镜研究

汪为民 陶逢刚 颜胜美 张建飞 姚军\*

(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** 基于微机电系统(MEMS)技术微加工工艺,提出了一种新型分立倾斜式变形镜(DM)设计,并加工制作了 $3\times 4$ 变形镜阵列。该结构每个镜面单元对应一个驱动器,实现了连续面形的分立驱动,并且可有效释放工艺过程中产生的残余应力,从而降低镜面的翘曲。基于弹性理论对该变形镜的电压位移关系以及谐振频率进行了数值计算,并利用有限元软件对其进行了仿真,同时采用光学轮廓仪对样品进行了测试。实验结果表明,所制作的变形镜阵列可实现平移和倾斜运动,在3.75 V电压下可达到 $0.76\ \mu\text{m}$ 的行程,与理论分析和模拟仿真结果一致。与传统分立倾斜式变形镜相比,该新型分立倾斜式变形镜具有较低的驱动电压、较少的驱动器数量,适用于集成度高且与集成电路(IC)单片集成的变形镜设计。

**关键词** 光学器件;变形镜;微机电系统;分立倾斜式;驱动器;表面微加工工艺

**中图分类号** TP211<sup>+</sup>.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0716002

## Study on a Novel Segmented Micro-deformable Mirror with Tip-Tilt Motion

Wang Weimin Tao Fenggang Yan Shengmei Zhang Jianfei Yao Jun

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

**Abstract** A new segmented tip-tilt deformable mirror (DM) based on surface micromachining process is proposed, a mirror array with  $3\times 4$  elements is fabricated. In this new structure every mirror surface has one only actuator so that the mirror array has a continuous surface topography, and the residual stress in the fabrication process can be effectively released with a result that the curl of the surface is reduced. The resonance frequency and the relationship between displacement and voltage are calculated based on the theory of elasticity and simulated based on a finite elements analysis (FEA) software. Then the fabricated device is tested by an optical profiler. Experimental results indicate that the actuated array has a piston-tip-tilt (PTT) motion, and the mirror has a stroke of approximately  $0.76\ \mu\text{m}$  under 3.75 V driving voltage, which is coincident with the theoretical analysis. Compared with previous reported segmented tip-tilt DM, this new structure has a lower working voltage and a fewer amount of actuators, and provides a possibility of integrating a large-actuator-count DM with integrated circuit (IC) on one chip.

**Key words** optical devices; deformable mirror; microelectromechanical system; segmented tip-tilt mirror; actuator; surface micromachining process

**OCIS codes** 230.6120; 220.1080; 230.4685; 230.3990; 230.4040

## 1 引言

波前校正器能够实时校正波前相差,是自适应光学系统的重要组成部分,它的性能直接决定了自适应光学系统的性能。传统的多单元分立或连续式

压电变形镜(DM)波前校正器由于驱动电压高、制作工艺复杂、集成度低等问题,应用范围受到极大限制。目前陆续开发出了液晶空间光调制器<sup>[1]</sup>、双压电片变形反射镜<sup>[2]</sup>、微机械薄膜变形镜<sup>[3]</sup>等多种新

收稿日期: 2011-01-12; 收到修改稿日期: 2011-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(60978051)资助课题。

作者简介: 汪为民(1981—),男,硕士,研究实习员,主要从事微机电系统设计与测试等方面的研究。

E-mail: weiminwang@qq.com

\* 通信联系人。E-mail: junyao@ioe.ac.cn

型变形镜,其中基于微机电系统(MEMS)技术的变形镜因其体积小、能耗低、响应速度快、集成度高等优势受到了广泛关注<sup>[4]</sup>,成为一种非常有潜力的波前校正器,在天文望远镜以及人眼等各种自适应光学系统中具有广泛的应用。

MEMS 变形镜一般分为连续镜面和分立镜面两种<sup>[5]</sup>。分立式变形镜的镜面由分立的多个单元镜面组成,各镜面之间没有互相耦合,因此控制算法较为简单,而且由于单块镜面面积大大减小,可有效降低加工过程中残余应力引起的翘曲<sup>[6~8]</sup>。但是,它却存在着镜面不连续、填充比较小、有衍射效应发生等问题。分立倾斜式变形镜是一种解决方案。在设计上,分立倾斜式变形镜的填充比相对连续镜面变形镜只降低约 1%,能够满足大多数自适应光学系统的需要<sup>[9]</sup>。同时,它采用多个驱动器同时控制一个镜面的方法,可使镜面同时进行平移运动和倾斜运动,能够以分立的镜面制造出连续的相位校正效果,且大大缩小了相邻镜面间的空隙,降低了分立变形镜的衍射效应,因此已成为目前发展较快的一种变形镜结构形式。

在天文望远镜自适应光学系统应用领域,美国波士顿微机械公司于 2007 年制造了 331 单元分立倾斜式变形镜阵列,共有驱动器 993 个,单个镜面可平移和倾斜,平移行程 1  $\mu\text{m}$ ,倾斜角度最大为  $\pm 3 \text{ mrad}$ ,驱动电压 140 V<sup>[10]</sup>。Iris AO 公司制作的 163 单元分立倾斜式变形镜有 489 个驱动器,填充比大于 98.5%,行程可达 5~10  $\mu\text{m}$ ,驱动电压小于 200 V<sup>[11]</sup>。

在人眼自适应光学系统应用领域,Doble 等<sup>[12]</sup>也指出无论在运用于校正所需变形镜的行程还是镜面单元数方面,分立倾斜式变形镜对人眼像差的针对性甚至好于连续镜面变形镜。

小到应用于人眼、大到应用于极大天文望远镜,自适应光学系统对变形镜的要求是不一样的<sup>[13]</sup>。一般来说,越小的自适应光学系统要求的变形镜单元数越少,对镜面质量要求越低,同时成本也要求低些,而应用于极大天文望远镜自适应光学系统的变形镜一般要求单元数在 10,000 以上,行程要达到约 5  $\mu\text{m}$ ,这也是未来 MEMS 变形镜发展的目标。

然而,随着驱动器数目的增多,有两个本来并不突出的问题成为了影响变形镜工作的本质问题,即加工中的成品率和电路设计<sup>[14]</sup>。当驱动器数目较多时,加工完成后很难免会有个别驱动器无法正常工作,而驱动电路随着需要控制的驱动器数目的增

多也变得更加复杂,且集成在变形镜阵列中的内部电路走线也更加难以设计,为此波士顿微机械公司采用额外多加一层结构层和一层绝缘层的方法来单独安排线路,使 3 层表面硅工艺变成了 4 层,既增大了工艺中不可控的失败率又提高了成本<sup>[15]</sup>。可见驱动器数目即集成度成为了 MEMS 变形镜进一步发展的障碍。在分立倾斜式变形镜工作时,为了让镜面能够在两个正交的方向倾斜,目前的设计最少需要同时用 3 个驱动器控制一个镜面,这样的方案又大大增加了驱动器数目,使得集成度很难提高。

本文提出了一种新型的分立倾斜式变形镜设计,通过采用连续式驱动器结构,实现单个驱动器控制单个镜面来实现镜面倾斜的方法,这极大地减少了驱动器数目,降低了电路设计的难度,从而有利于提高集成度。同时,由于减少了驱动器数量,单个驱动器的面积大大增加,因而提高了驱动力,降低了驱动电压,这也有利于降低功耗并与电路集成。

## 2 理论分析和结构设计

表 1 为自适应光学中人眼像差对于波前校正器的需求,采用了 Rochester 大学和 Indiana 大学关于人眼像差的两个人群统计结果<sup>[12]</sup>,瞳孔直径都取 7.5 mm。从表 1 可看出分立式、连续式和分立倾斜式 3 种结构形式用于校正人眼像差时所需的瞳孔直径上镜面单元数目。分立式变形镜由于镜面不连续导致需求的单元数远远大于连续式变形镜和分立倾斜式变形镜,而分立倾斜式变形镜校正时所需的单元数甚至要少于连续式变形镜。

表 1 分立式、连续式和分立倾斜式变形镜应用于校正人眼像差时的仿真结果

Table 1 Simulation results of ocular aberration correction using segmented, continuous, segmented tip-tilt MEMS DMs

	Number of elements across the pupil diameter(80% Strehl)		
	Segmented	Continuous	Segmented tip-tilt
Rochester University	95	14	12~19
Indiana University	50~90	11~14	9~10

图 1(a)~(c)是常见的分立式、连续式和分立倾斜式变形镜设计。将图 1(c)与(a),(b)对比可以看出,分立倾斜式变形镜可实现分立镜面的连续面型,同时拥有分立式和连续式变形镜的优点。由

图 1(c)可知,这种一维分立倾斜式变形镜的一个镜面下有两个驱动器,控制镜面进行平移或倾斜,若为二维倾斜,则至少需要 3 个驱动器,这样既增加了系统的复杂性同时也对控制算法提出了更高的要求。文中所设计的分立倾斜式变形镜结构,每个镜面下方对应一个驱动器,相邻两个驱动器共用一个弹性梁,如图 1(d)所示,若中间的驱动器被加电吸引时,它所连接的弹性梁发生形变,带动相邻的驱动器发生倾斜,从而达到了镜面连续的效果。这种结构与传统分立倾斜式变形镜[图 1(c)]相比,大大减少了驱动器的数目,提高了驱动器的工作效率。而且,由图 1(d)和(c)对比可见,文中设计的驱动器下电极面积大大增加,提高了驱动力,有效地降低了变形镜的工作电压。

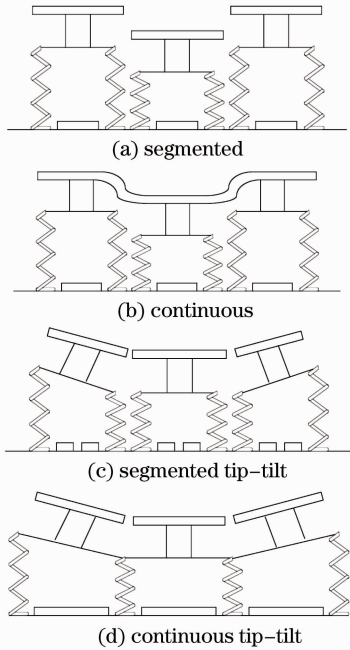


图 1 镜面的不同分立类型

Fig. 1 Different types of mirror array

图 2(a)为所设计的分立倾斜式变形镜 3 个相邻单元的三维效果图。每个单元由驱动器、弹性支撑梁和高反射镜面组成。驱动器为静电吸引型平行板电容驱动器,相对于目前新发展出的静电排斥型驱动器,具有驱动力大、填充因子高、镜面连续等优势<sup>[16]</sup>。采用静电驱动方式从工作机理上可避免压电驱动器常见的滞后现象,达到零滞后。而且无论对于压电还是静电驱动的驱动器来说,形变的非线性都是存在的,一般通过控制算法都能较好地解决。所设计的驱动器结构具有相对较大的几何尺寸,下电极边长为  $400\ \mu\text{m}$ ,这有效地增大了驱动力,降低了驱动电压。弹性支撑梁采用双端固支结构,相对

于常见的各种 L 型、O 型、蛇型梁等更加稳定,通过增加梁长减小梁宽来降低弹性系数以降低驱动电压。所设计的梁长  $430\ \mu\text{m}$ ,宽  $10\ \mu\text{m}$ ,厚  $2\ \mu\text{m}$ ,长宽比较大。镜面由多晶硅制成,边长  $410\ \mu\text{m}$ ,并镀金以增大对可见光的反射率,提高了变形镜对光能的利用效率。一个完整的变形镜单元边长为  $438\ \mu\text{m}$ 。同时,图 2(a)中也显示出各单元之间的连接方式,即在相邻两个单元之间,它们的镜面是分离的,驱动器的下电极也不相连,而只是共用驱动器的上电极的一根支撑梁,这样就可达到如图 1(d)所示的变形效果。最终设计的 12 单元变形镜阵列版图如图 2(b)所示。整个变形镜阵列的边长达到  $1762\ \mu\text{m}$ 。

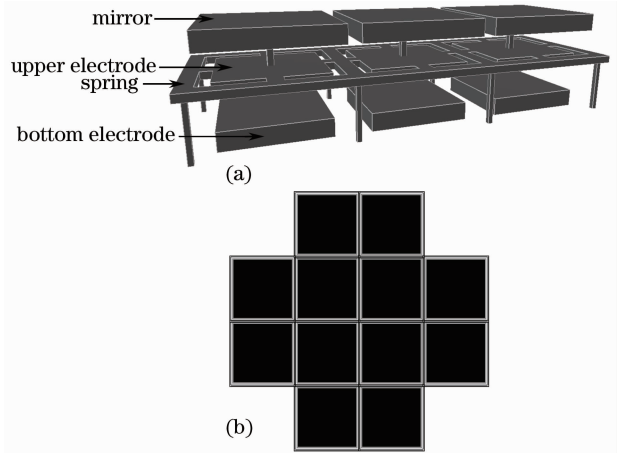


图 2 (a)三个相连变形镜 3D 示意图;(b)12 单元阵列

Fig. 2 (a) 3D schematic diagram of three conjoined DMs; (b) 12 elements array

基于设计尺寸,利用材料力学中的弹性形变理论对变形镜驱动器的电压与位移关系进行理论分析<sup>[17]</sup>。驱动器受到平行板电容的静电驱动力和双端固支梁的回复力同时作用,由二力平衡条件,可以得到

$$F_{\text{mechanical}} = \frac{64E\omega t^3 x}{l^3} = F_{\text{electrical}} = \frac{\epsilon_0 U^2 S}{2(g_0 - x)^2}, \quad (1)$$

式中  $F_{\text{mechanical}}$  为梁的机械回复力, $E$  为材料的杨氏模量, $\omega$  为梁宽, $t$  为梁厚, $l$  为梁长, $F_{\text{electrical}}$  为电容器上下极板间的静电力, $U$  为电容器的电压, $S$  为上下极板之间正对的面积, $g_0$  为电容器原始间距, $x$  为可动极板移动的位移。由(1)式解出的施加电压与上电极位移之间的关系如图 3 中实线所示。

利用有限元软件对这一变形镜结构进行了模拟仿真,得到的电压-位移曲线如图 3 中菱形所示。

微变形镜在很多应用中都需要考虑工作时的动态特性,谐振频率是动态特性中非常重要的参数之

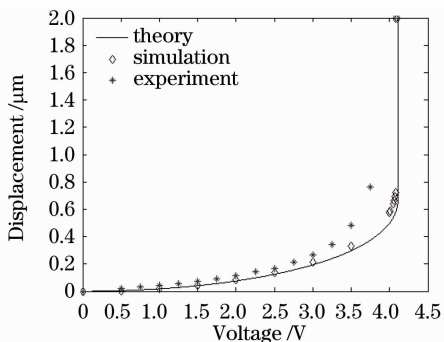


图3 理论计算、软件仿真和实验测试得到的变形镜电压位移关系

Fig. 3 Deflection versus applied voltages results of theory, simulation and measurement

一。同样,根据中心加负载  $F$  的双端固支梁自然频率公式

$$f = \frac{13.86}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{Fl^3}}, \quad (2)$$

式中  $I$  为惯性矩,  $g$  为重力加速度。可算出谐振频率为 18.4 kHz,而采用有限元软件计算得到的一阶模态谐振频率为 17.1 kHz,二者基本一致。同时这样的谐振频率数值已可以满足绝大多数应用的需求。

### 3 加工工艺流程

表面硅工艺是目前采用较多的一种 MEMS 制作工艺,与体硅工艺不同的是,表面硅工艺是一种“加法”工艺,通过在硅基底表面反复沉积不同图案的结构层和牺牲层来形成各种不同功能的器件。基于 PolyMUMPs<sup>[18]</sup> 工艺制作变形镜的主要流程(图4)为:

1) 在厚度为 400  $\mu\text{m}$  的硅基底上沉积一层 0.6  $\mu\text{m}$  厚的氮化硅作为绝缘层,然后在氮化硅上继续沉积一层 0.5  $\mu\text{m}$  厚的多晶硅并刻蚀,形成下电极,如图 4(a),(b)所示,此时各个单元的下电极是分立的;

2) 继续沉积 2  $\mu\text{m}$  厚的二氧化硅作为牺牲层,刻蚀牺牲层形成上电极锚点,如图 4(c)所示;

3) 沉积 2  $\mu\text{m}$  厚的多晶硅并刻蚀,形成驱动器的上电极及支撑梁,如图 4(d)所示,在这一步中,各单元的上电极通过共用的一根支撑梁相连,从而达到了互相联动;

4) 沉积 0.75  $\mu\text{m}$  厚的氧化硅作为牺牲层,刻蚀牺牲层形成镜面的支点,如图 4(e)所示;

5) 沉积 1.5  $\mu\text{m}$  厚的多晶硅并刻蚀作为镜面,

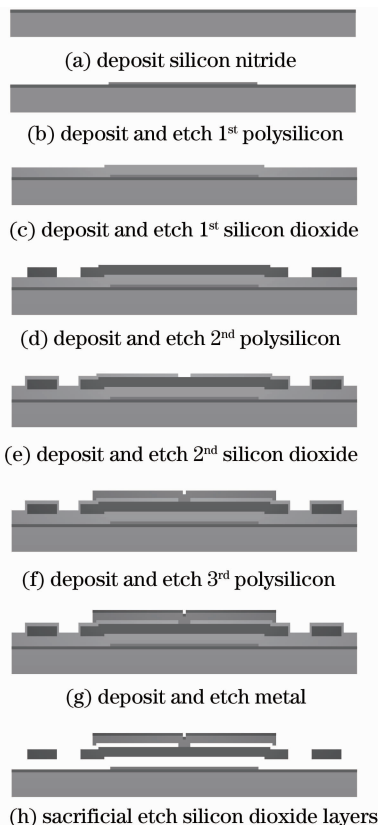


图4 工艺流程图

Fig. 4 Fabrication flow

如图 4(f)所示,各单元的镜面并不相连,仍然是分立的,有利于减少因残余应力引起的翘曲;

6) 采用 lift-off 工艺沉积 0.5  $\mu\text{m}$  厚的金层作为反射层,如图 4(g)所示;

7) 将器件放入 49% 的 HF 溶液中,进行二氧化硅湿法腐蚀释放结构,最后干燥,如图 4(h)所示。图 5 为加工最后得到的变形镜阵列的 SEM 照片。

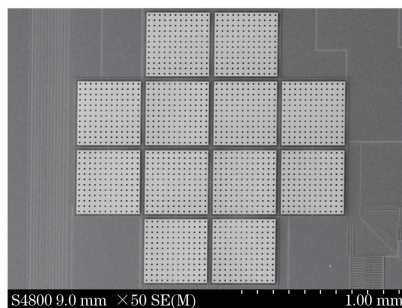


图5 加工完成器件扫描电镜照片

Fig. 5 SEM image of the DM

### 4 测试实验

#### 4.1 实验系统

实验测试所采用的是购自美国 Zygo 公司的三维表面轮廓仪 NewView7300,图 6 为其原理图。从

白光光源发出的光通过分束器进入到显微物镜中，物镜中内置了一个 Mirau 式干涉仪，即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，就可显微放大成像并同时具有干涉条纹。MEMS 变形镜表面的水平二维轮廓可以通过显微镜放大到 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。

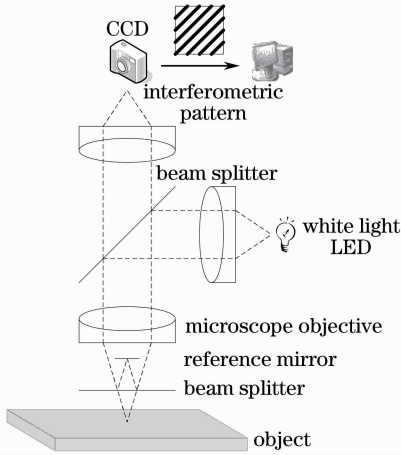


图 6 测试系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test system

实验中，通过对某一个单元的驱动器加电压，测量其在某一电压下此单元以及周围单元的变形情况，即纵向位移，可得到相邻镜面交连情况。通过测量不同驱动电压下此单元的纵向位移，可得到电压与行程的关系曲线。

#### 4.2 交连影响测试

在 12 单元变形镜阵列中任选一个单元，如图 7 中的方框部分，设为单元 A，进行交连测试。对单元 A 的驱动器施加 3.75 V 电压，观察周围单元 B、单元 C、单元 D 以及单元 E 的形变情况。

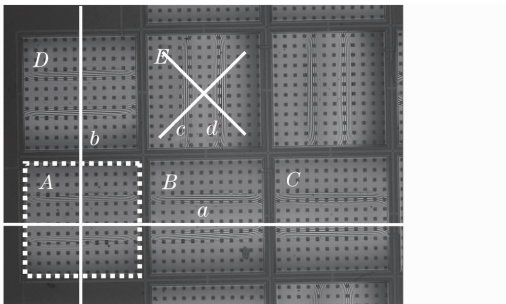
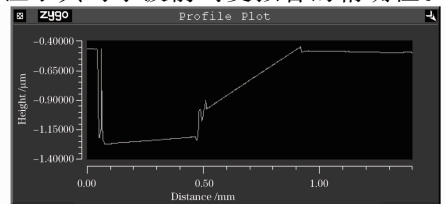


图 7 测试单元的选取，虚线方框为被驱动的单元

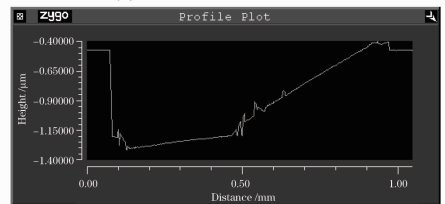
Fig. 7 Selection of tested cell, mirror cell in dotted square was driven

图 8(a) 为图 7 中截面 *a* 所处的镜面在电压驱动下的形变情况。整个曲线可分为 3 段，由左往右

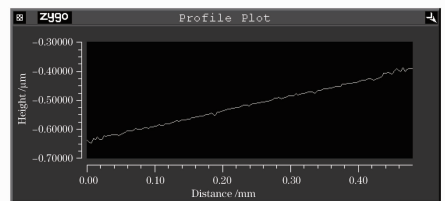
分别代表单元 A、单元 B 以及单元 C 的形变。可见，被直接驱动的单元 A 发生了整体向下平移，相邻的单元 B 由于受到左侧弹性梁的拉动，发生了整体的向左倾斜。而与 B 相邻的 C 单元仍然保持在初始的高度，没有发生任何形变。同样，截面 *b* 所处的镜面在电压驱动下的形变情况如图 8(b) 所示，单元 A 在电压的驱动下发生了整体向下平移，而相邻的单元 D 在一边弹性梁的拉动下发生了整体倾斜。图 8(c) 和 (d) 则是单元 E 的两个斜的对角线部分的表面面形，图中可看出一条对角线倾斜而另一条水平，因此可知单元 E 发生了倾斜，但倾斜方向不是水平也不是竖直，而是斜 45°，向着被驱动单元 A 的方向发生了倾斜。由此可见，当对 12 单元新型分立倾斜式变形镜阵列中的某一个单元进行驱动时，可以完成此单元整体下移、相邻 8 个（周围的 4 条边上 4 个，4 个角上 4 个）单元整体倾斜以及不相邻单元不被影响的目标，达到了分立镜面实现近似连续面形的目的，且整体面形的变化完全类似于连续面形变形镜，这也保证了其对于波前畸变拟合的精确性。同时也



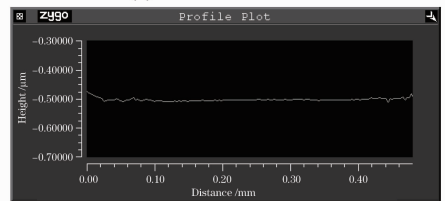
(a) cross section of line *a*



(b) cross section of line *b*



(c) cross section of line *c*



(d) cross section of line *d*

图 8 测试面型倾斜结果

Fig. 8 Tip-tilt test results of DM



可看出,此时只驱动了一个驱动器,若是传统的分立倾斜式变形镜设计,要达到与图 8 相同的效果,至少需要驱动 11 个驱动器(中间镜面平移向下需 3 个驱动器,周围 8 个驱动器靠中间一侧倾斜,各需驱动一个驱动器),由此可见本设计确实可大大减少所需驱动的驱动器数量,简化了驱动电路。

#### 4.3 行程分析与测试

实验中,从 12 单元变形镜阵列中任选一个单元,测试其不同电压下的平移情况,共 15 组数据,如图 3 中星形所示。由图可见,在 3.75 V 直流电压驱动下,变形镜单元可达到 0.76  $\mu\text{m}$  的行程。同时,对比理论计算结果、仿真结果与实验结果,它们的一致性比较好,尤其是在低驱动电压时。所设计的分立倾斜式变形镜,在较低驱动电压下实现了相对较大的位移,因此具有较低的功耗、更为简单的驱动器排列,为进一步的集成电路(IC)控制与器件单片集成创造了条件。

## 5 结 论

设计并制作了一种低电压驱动的 12 单元新型分立倾斜式变形镜阵列,并进行了理论分析和有限元仿真。实验表明在 3.75 V 直流电压下行程达到 0.76  $\mu\text{m}$ ,较好地符合了理论预期。因为采用驱动器连续的分立倾斜式结构,驱动器和镜面一一对应,相对常见的分立倾斜式结构减少了驱动器数量,降低了驱动电压,并获得了良好的实验结果。

### 参 考 文 献

- 1 Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 285~291  
蔡冬梅,姚 军,姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 285~291
- 2 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin *et al.*. Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437~1442  
周 虹,宁 禹,官春林等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1437~1442
- 3 Li Bangming, Liao Wenhe, Shen Jianxin *et al.*. Wavefront control algorithm research on micromachined membrane

- deformable mirror in the 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像差校正中的波前控制算法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 917~921
- 4 I. W. Jung, Y.-A. Peter, E. Carr *et al.*. Single-crystal-silicon continuous membrane deformable mirror array for adaptive optics in space-based telescopes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(2): 162~167
- 5 N. Devaney, E. Dalimier, T. Farrell *et al.*. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: a comparison of the performance of various deformable mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(35): 6550~6562
- 6 D. J. Dagle, W. D. Cowan, O. B. Spahn *et al.*. Large-stroke MEMS deformable mirrors for adaptive optics [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2006, **15**(3): 572~583
- 7 T. G. Bifano, J. Perreault, R. K. Mali *et al.*. Microelectromechanical deformable mirrors[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(1): 83~89
- 8 M. J. Sinclair. <http://www.memscap.com/mumps/documents/PolyMUMPsNotes>. Microsoft. pdf
- 9 J. A. Perreault, T. G. Bifano, B. M. Levine *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(3): 561~566
- 10 J. B. Stewart, T. G. Bifano, S. Cornelissen *et al.*. Design and development of a 331-segment tip-tilt-piston mirror array for space-based adaptive optics[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **138**(1): 230~238
- 11 M. A. Helmbrecht, M. He, C. J. Kempf *et al.*. The iris AO S163-X, a 489 actuator, 163-piston/tip/tilt-segment MEMS DM [C]. *SPIE*, 2009, **7466**: 74660E
- 12 N. Doble, D. T. Miller, G. Yoon *et al.*. Wavefront corrector requirements for compensation of ocular aberrations in two large populations of normal human eyes [C]. *SPIE*, 2006, **6138**: 61380X
- 13 P. Krulevitch, P. Bierden, T. Bifano *et al.*. MOEMS spatial light modulator development at the center for adaptive optics[C]. *SPIE*, 2003, **4983**: 227~234
- 14 M. A. Helmbrecht, M. He, C. J. Kempf. Scaling of the iris AO segmented MEMS DM to larger arrays[C]. *SPIE*, 2009, **7209**: 72090L
- 15 S. A. Corneissen, P. A. Bierden, T. G. Bifano *et al.*. 4096-element continuous face-sheet MEMS deformable mirror for high-contrast imaging[J]. *J. Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, 2009, **8**(3): 031308
- 16 S. He, R. B. Mrad. Design, modeling, and demonstration of a MEMS repulsive-force out-of-plane electrostatic micro actuator [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2008, **17**(3): 532~547
- 17 C. Liu. Foundations of MEMS[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005
- 18 J. Carter, A. Cowen, B. Hardy *et al.*. PolyMUMPs Design Handbook[M/OL]. [http://www.memscap.com/en\\_mumps.html](http://www.memscap.com/en_mumps.html)