

文章编号 1004-924X(2016)增-0400-07

折叠双 S 型 Bimorph 热式 MEMS 微镜

陆安江¹, 张正平¹, 黄子吉¹, 任哲毅¹, 陈巧³, 秦水介^{2*}

1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025;
3. 无锡微奥科技有限公司, 无锡 214135)

摘要: 为了设计具有大角度、大位移、低电压的 MEMS 微镜。采用折叠双 S 型双层梁驱动结构设计了一种能够克服静电驱动缺陷的新型 MEMS 微镜, 利用表硅与 SOI 相结合的 MEMS 微加工工艺来实现双材料电热的差分驱动。不但解决了因环境温度所引起的不稳定性问题, 而且还实现了创记录的大角度、大位移扫描。通过该方法设计的微镜尺寸小于 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, 机械转角大于 5° , 垂直线性位移可达 $425\text{ }\mu\text{m}$, 系统响应时间小于 10 ms 。最后对微镜的电热与机电特性、频率响应、谐振频率等进行了测试与分析, 结果显示 MEMS 微镜性能稳定可靠, 有望得到更多领域的推广应用。

关键词: 电热驱动; MEMS 微镜; SOI 微加工; 折叠双 S 型双层梁结构; 垂直线性大位移

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0400

MEMS micro-mirror of folded double S-shaped bimorph electro-thermal actuator

LU An-jiang¹, ZHANG Zheng-ping¹, HUANG Zi-ji¹, REN Zhe-yi¹, CHEN Qiao³, QING Shui-jie^{2*}

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Application, Guiyang, 550025, China;

3. WiO Technologies Co., Ltd. WuXi, 214135, P. R. China)

* Corresponding author, E-mail: shuijie_qin@sina.com

Abstract: Purpose: to design a MEMS micromirror with wide angle, large displacement and low voltage. Method: design a new-type MEMS micromirror capable of overcoming electrostatic drive by adopting the folded dual-S double-layer beam driving structure, and achieve the electrothermal differential drive of bi-materials by adopting the MEMS micromachining process combining surface silicon with SOI, which not only solved the problem of instability caused by ambient temperature, but also achieved the record-breaking wide-angle and large-displacement scanning; micromirror designed by adopting this method is smaller than $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, the mechanical angle is greater than 5° , the vertical linear displacement can reach $425\text{ }\mu\text{m}$, and the system response time is shorter than 10 ms ; finally, test and analyze the electrothermal and electromechanical performance, frequency response and resonant frequency of the micromirror. It indicates that the MEMS micromirror, with stable and reliable performance, has a broad prospect in wider promotion and application.

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-06-30.

基金项目: 国际合作研究资助项目 (No. 2014DFA00670); 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2015BAD28B02)

Key words: electrothermal drive; MEMS micromirror; SOI micromachining; folded dual-S double-layer beam structure; vertical linear large displacement

1 引言

在微电子基础上发展起来的微机电系统 (MEMS) 是多领域的前沿交叉学科,通过 50 多年的研究, MEMS 技术在设计方法、功能集成、加工技术、信号处理、工艺兼容性等方面取得了巨大突破并不断走向成熟。MEMS 的常见产品主要包括加速度计、陀螺仪、微马达、MEMS 光学传感器和压力传感器、温湿度传感器、MEMS 气体传感器等。MEMS 微镜作为 MEMS 传感器中重要的光学器件,其依靠机械形变来驱动镜面。根据驱动器运动的不同机理,微镜驱动主要分为压电式^[1]、电磁式^[2]、静电式^[3]和电热式^[4]。其中,静电式和电热式具有较好的工艺兼容性,易于实现批量生产,电热驱动与静电驱动相比,具有转动角度大、驱动电压低、扫描范围大、芯片体积小等优势。但大量从事电热驱动的研究者在解决镜面静态倾角、光学对准、环境温度影响等技术时遇到了难题,因此基于电热驱动原理的 MEMS 微镜一直未能得到很好的应用与推广。

本文针对电热式驱动微镜,采用折叠式双 S 型双层梁 (Folded-double-S-shaped Bimorph, FDSB) 驱动结构,利用表硅与 SOI 相结合的 MEMS 微加工工艺,实现双材料电热驱动的差分驱动,不仅解决了因环境温度所引起的不稳定性问题,还能实现大角度、大位移扫描,更高的谐振频率等。使其可广泛应用于医学成像、3D 扫描仪、微型光谱仪和全光通讯等领域。

2 电热 Bimorph 结构与原理

Bimorph 结构如图 1 所示,图 1(a)所示为 Bimorph 的三维视图,图 1(b)所示为 Bimorph 横截面示意图。

电热式 Bimorph 驱动结构是由两种具有不同热膨胀系数 Al 和 SiO₂ 薄膜材料复合而成,主要通过焦耳热效应来驱动微镜,其焦耳热效应为:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{in} + \Delta \varepsilon_{ex-p} + \Delta \varepsilon_{ex-j}, \quad (1)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为驱动臂应力,包含内部应力 $\Delta \varepsilon_{in}$ 和外

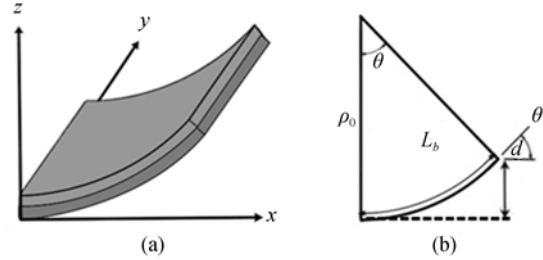


图 1 Bimorph 结构三维视图

Fig. 1 Three-dimensional view of structure of bimorph

部应力 $\Delta \varepsilon_{ex}$, $\Delta \varepsilon_{in}$ 由驱动臂自身因素决定^[5], $\Delta \varepsilon_{ex}$ 由薄膜材料的物理应变和外部温度变化产生,包含环境温度下的应力 $\Delta \varepsilon_{ex-j}$ 和焦耳热效应的应力 $\Delta \varepsilon_{ex-p}$ 。由于 $\Delta \varepsilon_{ex-j}$ 和 $\Delta \varepsilon_{ex-p}$ 都是由于热引起的,给出 Bimorph 的结构参数,则 $\Delta \varepsilon_{ex}$ 为:

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{\beta_b}{t_{Al} + t_{SiO_2}} \Delta \varepsilon_{ex}, \quad (2)$$

ρ_0 是梁的曲率半径, t_{Al} 和 t_{SiO_2} 分别是 Al 和 SiO₂ 薄膜材料的厚度, β_b 称为 Bimorph 曲率系数^[6]。因 $\Delta \varepsilon$ 包含内部应力和外部应力,所以 Bimorph 驱动结构的切向偏转角 θ 亦包含 θ_{in} 和 θ_{ex} :

$$\theta = \frac{l_b}{\rho_0} = \frac{\beta_b}{t_{Al} + t_{SiO_2}} \cdot \Delta \varepsilon \cdot l_b, \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_{ex-j}$ 表示不同热膨胀材料的薄膜受热膨胀产生的应力差,假设经过加热后温度升高 ΔT_j , α_1 和 α_2 代表 Bimorph 上下两种不同的薄膜热膨胀系数,则由焦耳热效应引起的压力差可以表达为:

$$\Delta \varepsilon_{ex-j} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T_j, \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),则可得到由于焦耳热所产生的角:

$$\begin{aligned} \theta_{ex-j} &= \frac{l_b}{\rho_{ex-j}} = \frac{\beta_b}{t_{Al} + t_{SiO_2}} \cdot \Delta \varepsilon_{ex-j} \cdot l_b \\ &= \frac{\beta_b l_b}{t_{Al} + t_{SiO_2}} (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T_j, \end{aligned} \quad (5)$$

综合式(1)~(5),可知 Bimorph 在垂直方向上的位移为:

$$d = \rho_0 (1 - \cos(\theta)) = \rho_0 \left[1 - \cos \left(\frac{l_b}{\rho_0} \right) \right], \quad (6)$$

通过上述过程可知, MEMS 微镜的偏转角度

特性与微镜驱动臂的组成材料特性、大小及形状有直接关系,通过合理设计驱动臂的结构可以提高微镜镜面位移量与偏转角度。

3 MEMS 微镜设计与仿真

3.1 材料选择

任何旋转驱动设计最直接的解析表达式是驱动的角响应率,即在一定输入激励下的转动角度。Bimorph 的角驱动原理已由式(5)得出。其中, ΔT_j 为输入激励,表示焦耳热引起的平均温度变化,因此,由焦耳热产生的驱动角响应率 S_T 为:

$$S_T = \frac{\theta_{th,j}}{\Delta T_j} = \frac{\beta_b l_b}{t_1 + t_2} (\alpha_1 - \alpha_2), \quad (7)$$

为了通过尽可能低的输入达到期望的扫描角度,或达到最大扫描角度, S_T 必须最大程度地优化。通过式(7)得到如下信息:

(1) S_T 是 Bimorph 热膨胀系数之间差异的比例量。 $S_T \propto (\alpha_1 - \alpha_2)$

(2) S_T 是 Bimorph 的曲率系数的比例梁。 $S_T \propto \beta_b$

(3) S_T 是 Bimorph 悬臂梁长度的比例量。 $S_T \propto l_b$

(4) S_T 是膜总厚度的反比量。 $S_T \propto (t_1 + t_2)^{-1}$

综上所述,增加 Bimorph 的长厚比 $l_b/(t_1 + t_2)$,能明显地增加 S_T 。同时,Bimorph 尺寸的比值也是 Bimorph 驱动机械特性的关键参数,如悬臂梁刚度,并因此受到其约束。第 1 点和第 2 点是在不牺牲机械性能的基础上提供最大化 S_T 的方法。从第 1 项中,知道通过大的热膨胀系数差选择材料会增加驱动的响应率。表 1 总结了常用微机械材料的热机械性能^[7]。

从表 1 中发现高分子聚合材料具有很大的热膨胀系数^[8]。但是,它们的杨氏模量值极低,并且它们的机械性能高度依赖于温度,这限制了其在电热 Bimorph 驱动中的应用^[9]。在表 1 列出的其它材料中,Al 和 SiO₂ 这两种材料具有最大的热膨胀系数差^[10],同时,他们是两种最常见的微机械材料。除了它能提供的高响应驱动外,Al 和 SiO₂ 可以通过成熟的、低成本的沉积技术来制造。

表 1 常用微机械材料的热机械性能

Tab. 1 Thermomechanical properties of common micro-mechanical material

材料	热膨胀系数 $10^{-6}/K$	杨氏模量 (GPa)	泊松比	导热系数 $w/m \cdot K$
Si	3.0	179	0.27	150.0
SiO ₂	0.4	70	0.17	1.4
Si ₃ N ₄	3.3	310	0.24	30.0
Poly-Si	1.6	160	0.22	—
Al	23.6	70	0.35	237.0
Au	14.5	78	0.44	318.0
Cu	16.9	120	0.34	401.0
Cr	5.0	279	0.21	93.9
Pt	8.9	168	0.38	71.6
Ti	8.6	116	0.32	21.9
Ni	12.8	200	0.31	90.9
SU8	52	4	0.22	0.2
PDMS	310	0.000 75	0.5	0.15

3.2 结构设计

基于电热式 Bimorph 驱动的 MEMS 微镜采用折叠双 S 型双层梁 (Folded Double S shaped Bimorph, FDSB) 结构,如图 2(a) 所示,Bimorph 由 Al 和 SiO₂ 两种不同材料组成。因为 Al 和 SiO₂ 的热膨胀系数不同,所以致使 Bimorph 结构发生弯曲程度不同,当 Bimorph 一端固定时,另一端就实现了偏转运动,从而达到致动的效果。在 Al 和 SiO₂ 之间嵌入一层薄而窄的金属 Pt 作为 Bimorph 的加热器,当给 Pt 两端通电时,Pt 开始发热,并将热量提供给 Al 和 SiO₂^[11-12]。

利用 FDSB 结构设计的微镜如图 2(b) 所示,采用两段薄膜材料倒置的双层梁相接结构形成,并与另一组同样的 S 形结构再折叠相接来达到驱动器末端横向位移的补偿。两种驱动器可采用相同的四点支撑对称结构来实现二维横向扫描和无横向位移的纵向垂直扫描。该对称 FDSB 结构能使两个转动轴之间的串扰更小,线性范围更大,并因紧凑的驱动器结构和布局大大提高了镜面占空比^[13-14]。

3.3 仿真分析

利用 FDSB 驱动结构,选择合适参数设计微镜,通过 COVENTOR 仿真,结果如图 3 所示。

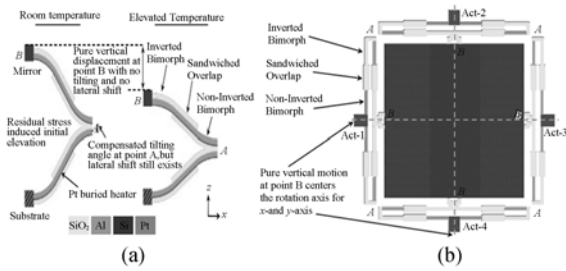
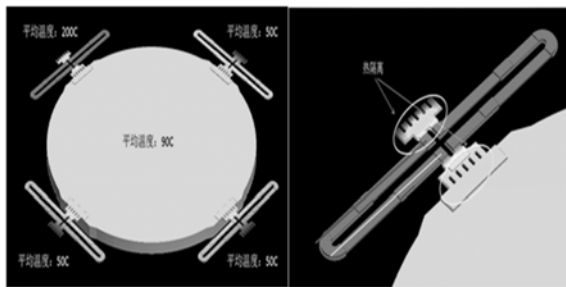
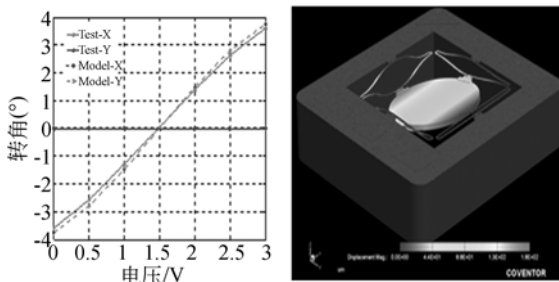


图 2 FDSB 驱动结构微镜

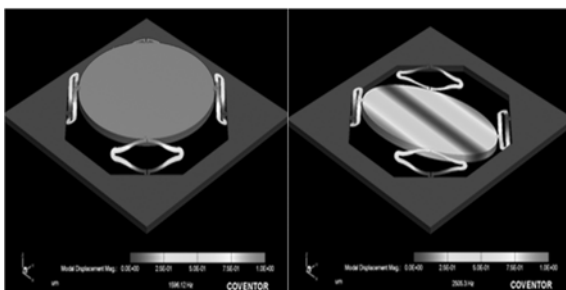
Fig. 2 Micromirror of FDSB drive structure



(a)单臂0~3 V电压驱动时温度分布图
(a) Temperature distribution between drive arm and mirror at voltage of 0~3 V



(b)单臂0~3 V电压驱动时测量值与模型数据对比图
(b) Comparison Chart between measured value and the model data at voltage of 0~3 V



(c)一阶模态、二阶模态
(c) First mode and second mode

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation result

4 MEMS 微镜工艺及实现

MEMS 微镜的制造采用表硅与 SOI 相结合的 MEMS 微加工工艺。如图 4 所示,采用 SOI 硅片,双 Bimorph 使用氧化硅和铝薄膜再加上氧化硅,其中的薄膜加热器由 Pt 制成。硅片首先被热氧化(a),之后 Pt 电阻层(b),并由淀积 PECVD 氧化硅和刻蚀镜面区域氧化硅(c),而后铝被溅射形成双层梁结构并同时对面镀膜(d)。之后采用氧化硅干法刻蚀以露出体硅为器件正面释放做准备(e),这时再将硅片从背面经氧化硅干法刻蚀和体硅的深层反应离子刻蚀直至 SOI 硅片的氧化硅掩埋层,并进一步刻蚀去除氧化硅掩埋层(f)。之后,器件即可从正面经各向异性(g)和各向同性(h)的硅刻蚀进行最后释放。

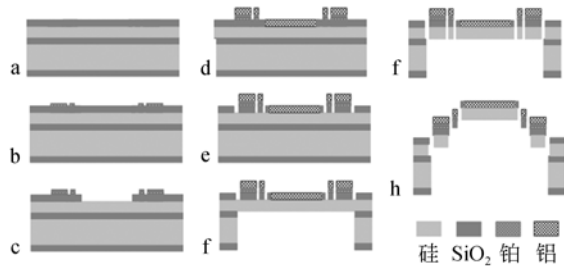


图 4 微镜工艺步骤

Fig. 4 Process of crafts of micromirror

释放后 MEMS 微镜如图 5 所示。图 5 中(a)为 SEM 扫描图,(b)为 TO 封装图。

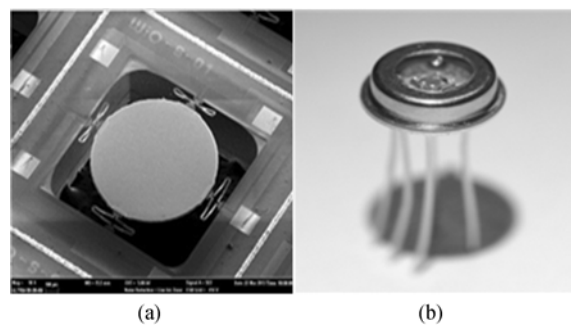


图 5 MEMS 微镜器件图

Fig. 5 FIG of device of MEMS micromirror

其中每组 FDSB 驱动器都可以独立驱动。当 4 组驱动器同时施加同样电压信号时,镜面产生

垂直方向的 Z 轴位移。而在相对的两组驱动器施加反相差分电压信号时, MEMS 镜面产生 X 或 Y 轴的转动。此结构与别的设计相比, 具有较高的镜面填充率, 较大的扫描角度和垂直运动距离, 同时还能确保旋转时不产生侧向移位。另外, 由于是差分驱动, 其转动扫描受环境温度的影响小。环境温度扰动对镜面转动只是一个共模信号, 在差分驱动下被自动消除。

5 结果与分析

5.1 电-热特性

当相对两组驱动臂施加一对反相差分电压时, MEMS 镜面以 X 轴或 Y 轴转动。通过测试, MEMS 微镜驱动电压与机械转动角度、电压与功率间的关系如图 6 所示。电压与转角线性度较好, 在 8 V 电压驱动下机械转动可以达到 8.5°, 5 V 电压时角度约为 5°, 通过电压与功耗的关系曲线显示电压与电流间的关系线性度也具有较好的趋势。

5.2 系统响应特性

利用图 7(a) 所示光路图, 采用单脚驱动方式, 加入 10 Hz 幅值为 2 V 的方波信号进行 MEMS 微镜动态特性测试, 动态响应结果如图 7(b) 所示: MEMS 微镜的动态响应时间约为 1.7 ms, 驱动臂加压后达期望值 90% 用时 68.5 ms, 110 ms 后进入期望值区间, 进入期望区间 25 ms 后 MEMS 微镜热-机械震荡趋于平稳。

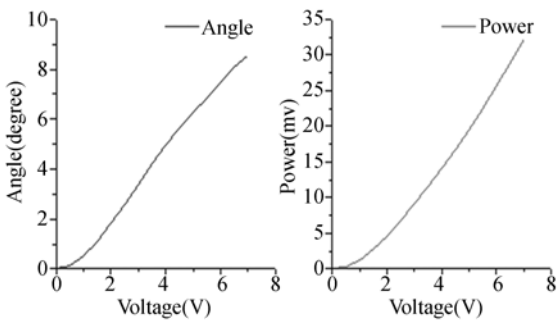


图 6 电压与角度、功率关系

Fig. 6 Relations of voltage and angle , power

5.3 表面形貌

在 AFM 原子力显微镜上采用接触模式的工作模式, 以 3 Hz 的扫描频率对样品进行形貌表

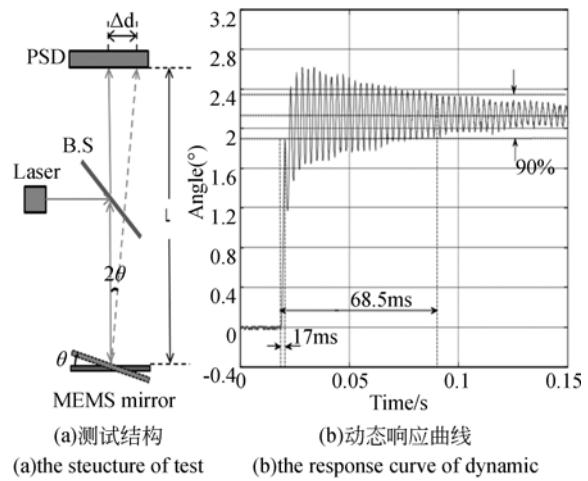


图 7 微镜动态响应

Fig. 7 The dynamic response of micromirror

征。首先, 选取在样品表面上的一个点, 进行大范围扫描, 10 000 nm × 10 000 nm, 扫描图片, 结果如图 8 所示。

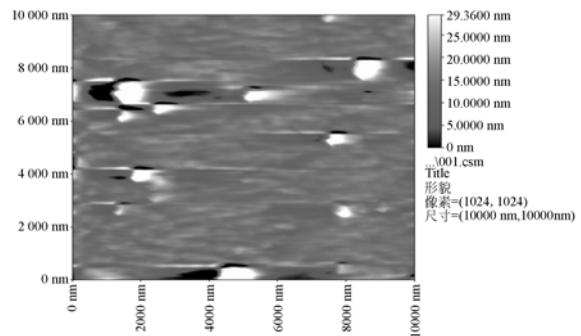


图 8 大范围表面形貌扫描图

Fig. 8 FIG of scan of a wide range of surface topography

图 8 中, 白色代表样品表面的最高点, 黑色代表样品表面的最低点。样品表面基本平整, 没有较大的起伏。缩小扫描范围, 选取图 8 上 4 404 nm × 4 404 nm 的范围进行扫描, 结果如图 9。

结果显示样品表面最大起伏高度可达 14 nm, 样品表面基本平整, 局部会出现凹槽。为了精确表征样品表面形貌, 对图 9 进行高度分析, 结果如图 10。

由图 10 可知, 样品表面平均高度在 15 nm 附近可达 80% 以上。

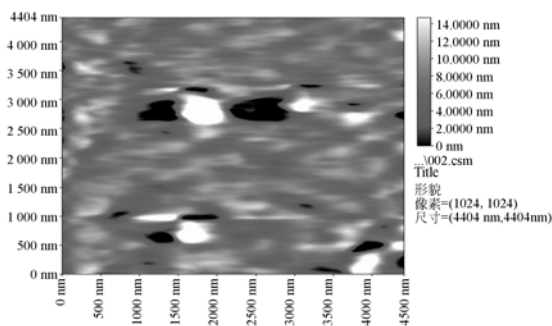


图 9 小范围表面形貌扫描图

Fig. 9 FIG of scan of a small range of surface topography

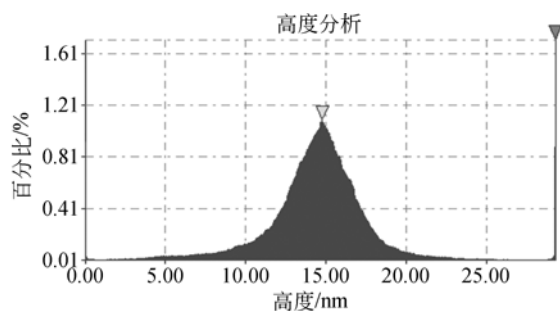


图 10 表面形貌表面凸起高度分析图

Fig. 10 Analysis chart of surface projection height of surface morphology

参考文献:

- [1] JIANG T Y, NG T Y, LAM K Y. Optimization of a Piezoelectric ceramic actuator [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, 84:81-94.
- [2] GARNIER A, BOUROUINA T, ORSIER E. A fast, Sample, and robust 2-D Micro-optical Scanner Based on Contactless magnetostrictive Actuation [J]. *Microelectromechanical Systems*, 2000: 715-720.
- [3] TANG W C, NGUYRN T C, JUDY M W. Electrostatic-comb Drive of Lateral Polysilicon resonators [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21(23): 328-331.
- [4] QUE L, PARK J, GIANCHANDANI Y. Bent-beam electrothermal actuator-part 1: Signal beam and cascaded devices [J]. *Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(2):247-254.
- [5] FREUND L B, SURESH S. Thin film materials: stress, defect formation, and surface evolution[J]. *Aiaa Journal*, 2003, 43.
- [6] TODD S T. Electro-thermomechanical modeling of a 1-D electrothermal MEMS Micromirror [D]. *Master Thesis*, 2005.
- [7] PAL S, XIE H. Analysis and Fabrication of Curved Multimorph Transducers that Undergo Bending and Twisting [J]. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1241-1251.
- [8] GOVINDARAJU A, CHAKRABORTY A, LUO C. Reinforcement of PDMS masters using SU-8 truss structures [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2005, 15(6):1303-1309.
- [9] SHARPE W N, YUAN B, VAIDYANATHAN R, et al.. Measurements of Young's modulus, Poisson's ratio, and tensile strength of polysilicon[C]. *IEEE*, 1997:424-429.
- [10] GEISBERGER A A, SARKAR N, ELLIS M, et al.. Electrothermal Properties and Modeling of Polysilicon Microthermal Actuators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12: 513-523.
- [11] PAL S, XIE H. Analysis and fabrication of curved multimorph transducers that undergo bending and twisting[J]. *IEEE/ASME Journal of Microelec-*

6 结 论

本文采用 FDSB 结构设计了一种新型的 MEMS 微镜芯片, 芯片尺寸小于 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 机械转角大于 5° 。垂直线性位移达 $425 \mu\text{m}$, 响应速度小于 10 ms 。在取得高镜面填充、大转角、大位移、低电压的同时还实现了高稳定性和高可靠性。通过 FDSB 驱动结构, 不仅双 S 的顶部位移加倍, 同时消除了侧向位移, 将四个大位移 FDSB 驱动器对称放置在镜面的四个边, 每个边的高度可以受其中一个 FDSB 驱动器独立控制, 所以镜面可以转向扫描范围内的任一角度。此结构与以前的设计相比, 运动距离大, 同时还能确保旋转时不产生侧向移位, 并能实现对环境温度不敏感的差分驱动。该工艺通过结合表硅与 SOI 加工技术, 从衬底背面形成空腔, 再从正面进行干法释放, 整个工艺流程可在圆片级完成, 无需硅-硅键合, 也无高精度对准、高深宽比等要求, 使驱动和传感一体化集成, 简化了工艺, 降低了难度, 促使工艺费用得到大幅度的降低。

- tromechanical Systems*, 2012, 21(5):1241-1251.
- [12] PALS, XIE H. A curved multimorph based electrothermal micromirror with large scan range and low drive voltage [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2012, 170(2):156-163.
- [13] JIA K, SAMUELSON S, XIE H. High fill-factor micromirror array with hidden bimorph actuators and tip-tilt-piston capability [J]. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 20(9): 573-582.
- [14] JIA K M, XIE H K. Low voltage, an electrothermal tip-tilt-piston micromirror based on folded dual s-shaped bimorphs [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(5):231-233.

作者简介:



陆安江(1978—),男,贵州人,博士,副教授,2006年于贵州大学获硕士学位,现主要从事光电技术应用方面的研究。E-mail:39146565@qq.com



秦水介(1963年-),女,广西人,博士,教授,博士生导师,2002年于香港中文大学获博士学位,现主要从事光电激光方面的研究。E-mail:shuijie_qin@sina.com