

文章编号: 0253-2239(2007)07-1271-4

基于微光机电系统的微光学自适应微镜的研究*

吕赛君 裴 旦 白 剑 侯西云 杨国光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 提出了一种利用热应力改变镜面曲率的可调焦微光学自适应微镜。与传统自适应微镜相比,采用该原理制作的微镜具有驱动电压低和驱动力较大的优点,而且制作简单。以硅为基底进行了表面热氧化、光刻显影、HF 酸刻蚀、KOH 湿法刻蚀、溅射铝膜等微加工工艺的研究,获得硅铝双金属可调焦微反射镜 4×4 阵列,单元尺寸 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,单晶硅基底厚 $60 \mu\text{m}$,硅表面溅射的铝膜厚 150 nm 。该微镜的镜面填充率为 100% ,可变形镜面占总镜面面积的 79% 。利用激光波面干涉仪对可调焦微反射镜的动态性能进行了测试。实验表明,该微镜可产生单向连续变形,最大变形量 $15.8 \mu\text{m}$,非线性滞后 27% ,工作电压 $0 \sim 2.5 \text{ V}$,可调焦范围 $\infty \sim 0.036 \text{ m}$ 。

关键词: 自适应光学; 微反射镜; 微光机电系统; 微光学

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Research of an Adaptive Micro-Mirror Based on Micro-Opto-Electro-Mechanical-System

Lü Saijun Pei Dan Bai Jian Hou Xiyun Yang Guoguang

(State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: A novel adjustable focal-length optical adaptive micro-mirror based on bi-metal effect is presented. Compared with traditional deformable micro-mirror, micro-mirror fabricated by this method has the advantage of low driving voltage and large driving force. Besides, it is easy to be fabricated. Micro-machining processes such as oxygenation, photolithography, chemical etching and sputtering are experimented. A 4×4 bi-metal adjustable focal-length micro-mirror arrays have been completed. Each unit has an area of $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ with the thickness of silicon $60 \mu\text{m}$ and aluminum film 150 nm . Deformable mirror area covers 79% of the total mirror area which is 100% . Dynamic performance of adjustable focal-length micro-mirror is tested using laser wave-front interferometer. Experiment results demonstrate that the micro-mirror can produce uni-directional continuous deformation with the maximum deformation of 15.8 and nonlinearity lag of 27% . It can work at $0 \sim 2.5 \text{ V}$ with an adjustable focal length ranging from ∞ to 0.036 m .

Key words: adaptive optics; micro-mirror; micro-opto-electro-mechanical-system (MOEMS); micro-optics

1 引 言

微变形镜以其体积小、成本低、能耗低、响应快及集成度高等传统变形镜不具备的特点,已成为变形镜发展的主流方向。当前国内外发展的微变形镜主要有微机械薄膜变形镜^[1,2]、表面微机械变形镜^[3]、液晶器件^[4]和可调焦变形镜^[5]。前三种微变形镜虽然响应速度快,但驱动电压仍高达几十伏甚

至上百伏,而且结构复杂,制作工艺要求高。可调焦变形镜基于“双金属效应”,利用热应力改变镜面曲率,从而形成变焦^[6]。它具有驱动电压低和驱动力较大的优点,而且制作简单。这对于自适应微变形镜的研究具有非常重要的意义。

本文提出了一种可调焦微光学自适应微反射镜。以硅为基底进行了表面热氧化、光刻显影、HF

* 航天支撑基金资助课题。

作者简介: 吕赛君(1982—),浙江嵊州人,硕士研究生,主要从事微光学及 MOEMS 器件方面的研究。

E-mail: lvsaijun@yahoo.com.cn

导师简介: 白 剑(1967—),男,福建人,教授,主要从事光学相位检测方面的研究。E-mail: bai@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-04-03; 收到修改稿日期: 2006-07-15

酸刻蚀、KOH 湿法刻蚀,溅射铝膜等微加工工艺的研究。制作了硅铝双金属可调焦微反射镜阵列,并对它的动态性能进行了测试。

2 工作原理

可调焦微反射镜利用微光机电系统(MOEMS)加工技术,在硅基底上制作微反射镜阵列,再利用所加的电极供电,加热膜片,膜片由于热应力作用产生位移或改变反射表面的曲率,形成变焦。图 1 为微镜剖视图,金属薄层为镜面,基底为 Si 薄层。图 1(a)为不加电压时微反射镜单元的状态,图 1(b)为施加电压时微反射镜单元的状态。

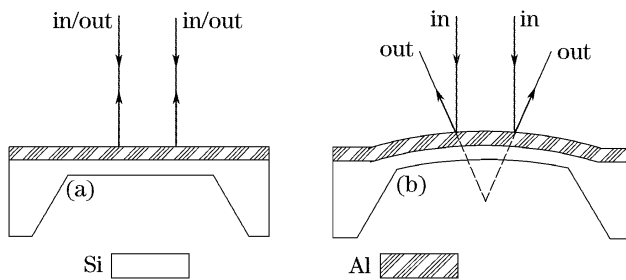


图 1 可调焦微镜工作原理

Fig. 1 Working principle of adjustable focal length micro-mirror

微镜的二维平面热应力 σ 与温度变化 ΔT 的关系可用下式表示:

$$\sigma = \Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_f / (1 - \nu_f), \quad (1)$$

式中 $\Delta\alpha$ 为基底(即硅薄层)与金属薄膜热膨胀系数之差, E_f 为金属薄膜的杨氏模量, ν_f 为金属薄膜的泊松(Poisson)比。

该体系以热传导为主时,热功率 P 与温度变化 ΔT 呈线性关系,可表示为

$$P = \alpha \cdot \Delta T, \quad (2)$$

式中 α 为常量。

微镜的曲率半径 R 由热应力 σ 与金属薄层下面的基底材料的特性决定。由于该体系中铝膜厚度远小于基底厚度,且铝膜与基底杨氏模量近似相等,因此可使用 Stoney 公式^[7]

$$R = \frac{E_s}{1 - \nu_s} \frac{d_s^2}{6d_f} \frac{1}{\sigma}, \quad (3)$$

式中 E_s 为基底材料的杨氏模量, ν_s 为基底的泊松比, d_s 为基底薄膜的厚度。

利用焦距与曲率半径关系的近似公式

$$f = R/2, \quad (4)$$

可得到波面焦距与电功率变化的关系是

$$f(P) = \frac{1}{12} \frac{E_s}{1 - \nu_s} \frac{1 - \nu_f}{E_f} \frac{d_s^2}{d_f} \frac{\alpha}{\Delta\alpha P}, \quad (5)$$

由(5)式可以看出,加电功率可使反射镜产生连续变焦,这样就可以控制光学系统中光束间的光程,实现光束间的相位控制,实现光学成像自适应或控制光束形状。

3 制作工艺

与单晶硅的热膨胀系数相差较大并且所构成的双金属结构的热转换效率较高的金属依次是:铅,铝,金,镍等。铝作为集成电路(IC)工艺中用的最多的布线金属,与硅构成的双金属驱动结构具有非常高的热转换效率。所以我们选用铝和硅作为微反射镜的材料。工艺流程如下:

1) 将一块晶向 $\langle 100 \rangle$ 双面抛光厚 $320 \mu\text{m}$ 的 76.2 mm (3 英寸)硅片用硫酸和双氧水反复清洗,去除各种污质,如图 2(a)所示。

2) 用热氧化法在硅片正反双表面各生成 $1 \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层,如图 2(b)所示。

3) 在生长好 SiO_2 的硅片正面甩光刻胶,并前烘。光刻胶为 AZ4602 正胶,如图 2(c)所示。

4) 利用掩模板曝光,如图 2(d)所示。

5) 显影、定影、后烘,如图 2(e)所示。

6) 重复 3)~5) 工序对硅片反面进行操作,得到的硅片如图 2(f)所示。

7) 用 HF 酸刻蚀液对硅片进行刻蚀,去掉硅片两面暴露部分的 SiO_2 层。并用丙酮溶液洗去残留的光刻胶,如图 2(g)所示。

8) 以 SiO_2 为掩膜,用热 KOH 溶液对单晶硅表面进行刻蚀。利用单晶硅的各向异性,在 $\langle 111 \rangle$ 平面上刻蚀形成梯形槽,且与水平方向的夹角为 54.7° ,如图 2(h)所示。

9) 在硅基底正面溅射一层铝膜,如图 2(i)所示。

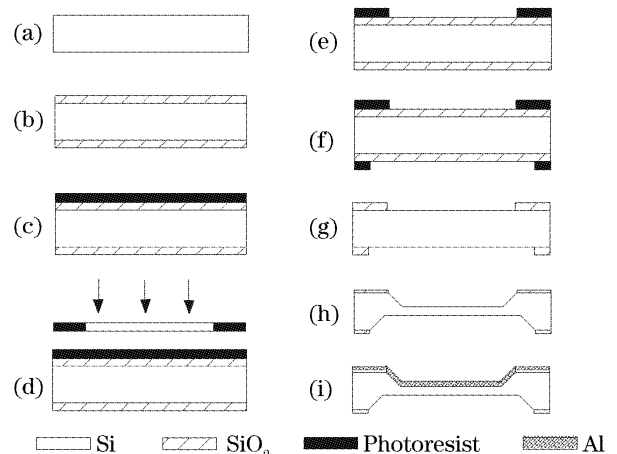


图 2 微镜阵列制作工艺流程

Fig. 2 Micro-machining process of micro-mirror arrays

4 实验结果及分析

经 1)~9) 工艺得到单元尺寸为 3 mm×3 mm 的可调焦微反射镜 4×4 阵列, 单晶硅基底厚 60 μm, 硅表面溅射的铝膜厚 150 nm。镜面填充率 100%, 可变形镜面占总镜面面积的 79%, 如图 3 所示。

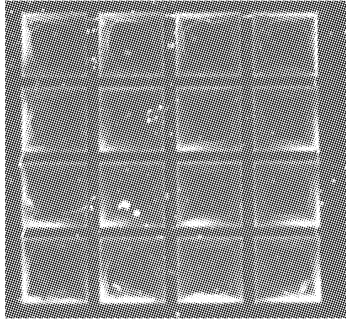


图 3 双金属可调焦微镜 4×4 阵列

Fig. 3 Photograph of 4×4 array bi-metal adjustable focal length micro-mirror

采用激光波面干涉仪对微反射镜动态性能进行了测试。测试方案中光源采用 He-Ne 激光器(λ=632.8 nm), 齐明镜组采用 F/1.64、口径 80 mm 的标准镜头。由于不镀膜的标准镜头表面反射率很低(约 4%)而微反射镜镜面的反射率很高(约 90%), 干涉条纹衬比度很差。实验采用标准镜头前表面 s 的反射光波前与经过标准镜头的微镜表面二次反射光波前发生干涉, 干涉光路如图 4 所示。

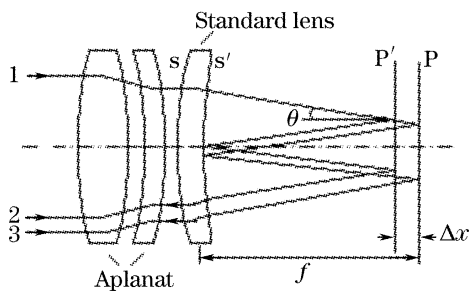


图 4 干涉光路图

Fig. 4 Schematic diagram of interferometric optics

微镜置于标准镜头的焦面 P 处。激光束通过齐明镜组后聚焦在微反射镜中心。对微镜施加电压后, 由于热形变, 微反射镜中心偏移到焦面外 P'。

施加电压前, 光束 1 在微镜表面的二次反射光经过标准镜头与光束 3 在标准镜头前表面 s 的反射光发生干涉。光程差 Δ₁ 表示为

$$\Delta_1 = 4f/\cos \theta, \tag{6}$$

式中 f 为标准镜头焦距, θ 为光束与光轴的夹角。

施加电压后, 光束 1 在标准镜头前表面 s 的二次反射光束与光束 2 在标准镜头前表面 s 的反射光发生干涉。光程差 Δ₂ 表示为

$$\Delta_2 = 4 \frac{f - \Delta x}{\cos \theta}, \tag{7}$$

式中 Δx 为移动一个干涉条纹对应的微反射镜中心偏移量

由光程差

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = 4 \cdot \frac{\Delta x}{\cos \theta} = \lambda, \tag{8}$$

式中 λ 为激光器输出波长, 得

$$\Delta x = \lambda \cos \theta / 4, \tag{9}$$

对于近轴光束, θ ≈ 0, Δx = λ/4, 计算得

$$\Delta x = 158.2 \text{ nm}, \tag{11}$$

综上所述, 干涉图案中心移动一个干涉条纹对应的微反射镜中心偏移量为 158.2 nm。

CCD 获得的干涉图如图 5 所示。实验中, 施加电压时, 可以观察到干涉条纹移动。电压增大时, 条纹外扩。电压减小时, 条纹内缩。施加电压 2.5 V 时, 得到中心条纹最大移动量为 100 个条纹。根据 (11) 式得到的结果计算得到微镜中心最大偏移量为 15.8 μm。根据微镜中心的偏移量和微镜单元尺寸可以计算得到微镜的焦距, 可调焦范围为 ∞~0.036 m。

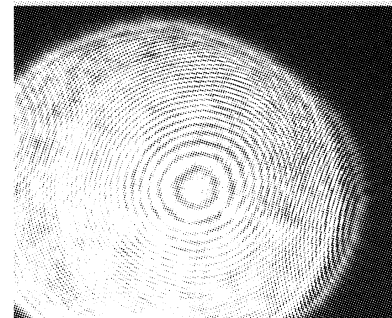


图 5 双金属可调焦微镜单元干涉图

Fig. 5 Interference pattern of an unit of 4×4 array bi-metal adjustable focal length micro-mirror

图 6 为根据实验数据拟合的微镜变形曲线。增加电压时, 变形曲线非线性明显, 减少电压时, 变形曲

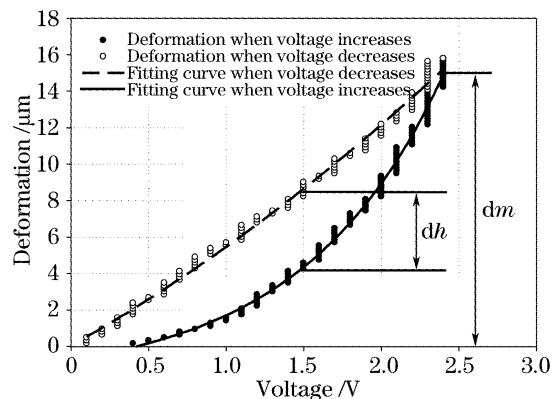


图 6 可调焦微镜单元变形曲线

Fig. 6 Deformation curve of an unit of 4×4 array bi-metal adjustable focal length micro-mirror

线接近线性。非线性滞后 $dh/dm=27\%$, 响应频率约 0~10 Hz。

5 结 论

制得硅铝双金属可调焦微反射镜 4×4 阵列, 单元尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$, 单晶硅基底厚 $60\text{ }\mu\text{m}$, 硅表面溅射的铝膜厚 150 nm 。该微镜的镜面填充率为 100% , 可变形镜镜面占总镜面面积的 79% 。利用激光波面干涉仪对可调焦微反射镜的动态性能进行了测试。实验表明, 该微镜工作电压 $0\sim 2.5\text{ V}$, 最大变形量 $15.8\text{ }\mu\text{m}$, 可调焦范围 $\infty\sim 0.036\text{ m}$ 。虽然工作电压低, 驱动力大, 但也还存在一些缺点, 目前只能产生正变形, 非线性滞后较大, 响应频率还较低。可以应用在校正由温度和重力变形等造成相差变化较慢的系统中。

参 考 文 献

- 1 Vdovin G, Sarro P M, Middelhoek S. Technology and applications of micromachined membrane deformable mirrors [C]. LEOS Summer Topical Meeting, 1998. 97~98
- 2 Bin Tang, Yuxin Leng, Hanlin Peng *et al.*. The deformable mirror method of adaptive phase correction[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1** (7): 432~434
- 3 Bifano Thomas G, Krishnamoorthy Raji. Surface micromachined deformable mirrors[J]. *IEEE ETFA*, 1996, **2**: 393~399
- 4 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686 (in Chinese)
刘永军, 宣 丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 5 Rainer Riesenberger, Johann M. Koehler, Horst Porwol. New micro-optical devices based on micromechanics [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2213**: 70~76
- 6 Wang Daheng. *Modern Instrumentation Technology and Design* [M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
王大珩. 现代仪器仪表技术与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 7 Stoney G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis [C]. *Proc. Roy. Soc. London*, 1909, **9**: 172~175