

# 基于 MEMS 技术的一种新型可变形反射镜

余洪斌<sup>1</sup> 陈海清<sup>1</sup> 竺子民<sup>1</sup> 张大成<sup>2</sup> 李 婷<sup>2</sup>

(1 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

(2 北京大学微电子学研究所 微米/纳米加工技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 给出基于硅微加工技术的一种新型可变形反射镜的设计和加工方法, 并且通过工艺流片制造出有效反射面面积为  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ , 拥有 49 个静电驱动单元的可变形反射镜。测试得到的镜面变形-电压数据显示其与模拟结果具有很好的一致性。

**关键词:** 可变形反射镜; 体微加工; 静电驱动; 响应频率

**EEACC:** 4180

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)09-1154-05

## 1 引言

自 1953 年 Babcock 首先提出自适应光学的基本概念以来, 经过各国科学家的不懈努力, 自适应光学已逐步发展成为一门对波前像差进行实时测量和校正的学科。其主要目的是提高光学成像系统的分辨率和抗环境干扰能力。可变形反射镜(DMs)作为能动单元是自适应光学系统中的核心组成部分之一<sup>[1,2]</sup>。传统的可变形反射镜大都利用材料的压电效应进行驱动, 其驱动电压较高, 响应频率较低, 且体积庞大、成本高昂, 这极大地制约了自适应光学技术应用领域的扩展<sup>[3,4]</sup>。为了能使自适应光学技术在星载相机和其他领域内获得应用, 急待解决的问题是发展小型低能耗的变形反射镜。近年来随着基于硅微加工技术的 MEMS 领域的兴起, 即可找到一个能很好解决上述问题的途径<sup>[5~7]</sup>。近期国外在自适应光学系统微小型化方面的研究已取得相当大的进展。美国 NASA Jet Propulsion 实验室, Boston 大学和荷兰 Delft 大学等先后研究出基于 MEMS 技术的微小型变形镜。例如, Delft 大学已研制成 37 通道, 通光口径 15mm, 面形误差 RMS 达 1/20 波长, 带宽 100Hz, 变形动态范围至  $10\mu\text{m}$  的微小型变形

镜。但是具有更大连续表面的反射镜迄今为止还未见报道, 这极大地限制了整个系统的视场范围。本文针对一种新型的大表面硅基变形反射镜的设计加工进行研究。

## 2 器件原理、设计和仿真

### 2.1 工作原理

随着外界环境(如重力、温度等)的变化, 光路中各精密光学部件的相关参数也会随之改变, 使得经过它们传输的光发生畸变, 自适应光学系统的作用就是对这种畸变进行实时校正。图 1 所示为一个典型的自适应光学系统结构图。

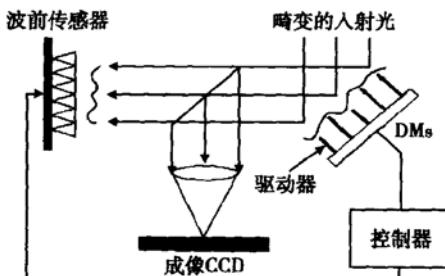


图 1 自适应光学系统结构图

Fig. 1 Configuration of adaptive optics

余洪斌 男, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事 MEMS 工艺及相关器件的研究。

陈海清 男, 1947 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息存储技术及微光学器件的理论研究。

2003-10-19 收到, 2004-04-23 定稿

©2004 中国电子学会

使用一个波前传感器探测入射光的波前畸变, 然后通过一个控制器发出控制信号, 控制各个驱动器进行不同程度的动作, 使镜面发生变形, 当镜面形状与畸变相位满足共轭关系时, 畸变就会被抵消, 从而波前得到恢复, 成像分辨率得到提高.

## 2.2 驱动方式及加工工艺的选取

在 MEMS 领域中有多种驱动方式, 包括热驱、磁驱及静电驱动等, 其中以静电驱动应用最广, 因为其结构实现容易, 能耗较低且响应频率较高<sup>[8]</sup>. 这些特点正是我们在实际应用中所希望得到的, 因而本设计采取静电驱动工作方式. 目前硅基微加工大致可分为两大类: 体加工和表面加工. 由于反射镜是一种光学部件, 这就对作为反射面材料的表面质量提出了很高的要求. 就表面加工而言, 它本质上是一种加法工艺, 即通过在硅上依次淀积不同的材料, 最后通过释放来实现最终结构, 这时结构的主体是由淀积材料构成的, 硅此时充当衬底的作用. 为了使释放能顺利进行, 通常要在结构上预留一些释放孔. 当光入射到表面时, 在这些孔的周围就不可避免的会出现一些干涉现象, 从而使得光学性能变差. 体硅工艺是通过去除硅片的一部分, 来获得所需的结构, 因而它可充分利用硅片良好的表面质量及出色的整体机械性能, 获得高光学性能的器件.

## 2.3 设计及仿真

本设计中变形反射镜的结构如图 2 所示. 其镜面主体是由具有一定厚度的硅膜构成, 为提高镜面的反射率通常溅射一层 Ti/Au. 在硅膜背面有一  $7 \times 7$  阵列的台柱与其相连, 台柱的下方是对应的驱动电极. 当给电极施加电压时, 产生的静电力就会拉动台柱向下运动, 从而带动相应的镜面部分发生变形.

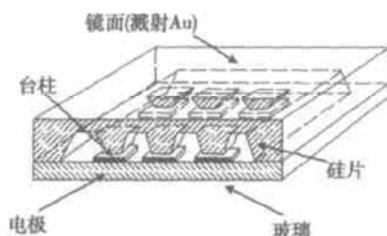


图 2 可变形反射镜结构示意图

Fig. 2 Schematic of deformable mirror

通常用来评价反射镜性能指标的相关参数为: 镜面尺寸、镜面质量、变形范围以及响应频率等. 由反射镜在应用系统光路中所处的位置及对视场的要求, 所设计的有效反光面积被确定为  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ . 而镜面质量是由加工工艺决定的, 因而设计中主要关心的是反射镜的变形范围以及响应频率.

对于此种平板类结构而言, 在其他尺寸一定的情况下, 板的厚度将对整个结构的变形及响应频率产生显著影响, 因而设计的重点是确定硅膜的厚度.

由于此问题涉及静电场与机械力的耦合, 且反射镜结构复杂, 我们很难从理论上对其进行常规分析, 对此采用 ANSYS 软件进行辅助设计. 图 3 是在中心电极施加 30V 电压时, 不同硅膜厚度对应的反射镜最大变形. 硅膜厚度对系统响应频率的影响如图 4 所示.

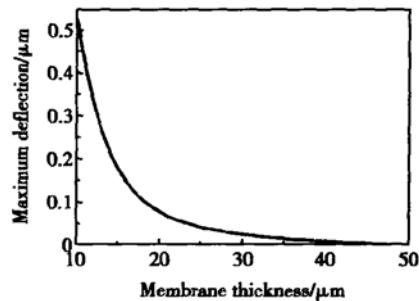


图 3 镜面最大变形与硅膜厚度的关系

Fig. 3 Maximum deflection of mirror as a function of the thickness of silicon membrane

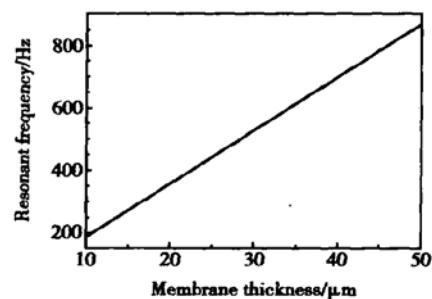


图 4 共振频率与膜厚的关系

Fig. 4 Resonant frequency as a function of the thickness of membrane

由于外界环境是实时变化的, 这就对反射镜的响应频率提出了一定的要求, 如果响应频率太慢, 则起不到实时校正的作用. 通常这种变化是在 200~

400Hz 之间。由图 4 可知只有膜厚大于  $20\mu\text{m}$ , 才能确保满足要求。但是从图 3 中可看到, 在一定驱动力的情况下, 膜越厚, 镜面刚度就越大, 则越不容易产生镜面变形, 相应于反射镜的校正范围也就越小。综合上述两种考虑, 我们将膜厚选定为  $30\mu\text{m}$ 。

最终设计的反射镜的具体结构参数如表 1 所示。

表 1 反射镜设计尺寸

Table 1 Designed dimension for deformable mirror

镜面尺寸	$30\text{mm} \times 30\text{mm}$
硅膜厚度	$30\text{mm} \times 30\text{mm}$
台柱尺寸	下表面边长为 $550\mu\text{m}$ 台柱高为 $345\mu\text{m}$
台柱之间的中心距离	$2.2\text{mm}$
台柱下表面与电极的距离	$5\mu\text{m}$

图 5 为所设计的镜面中心的最大变形量与施加电压之间关系的模拟结果。

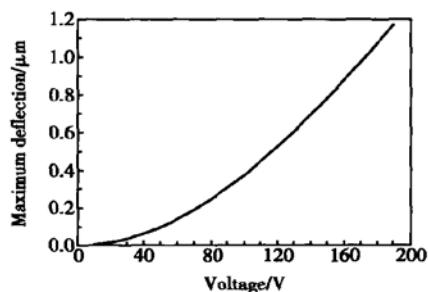


图 5 镜面中心最大变形量与施加电压的关系

Fig. 5 Maximum deflection at the center of mirror as a function of applied voltage

### 3 加工及测试

#### 3.1 反射镜制作

反射镜的加工工序如图 6 所示。首先在硅片正反面热氧化生长  $100\text{nm}$  的氧化层, 然后用 LPCVD 方法依次淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 厚度均为  $100\text{nm}$  左右。这种四层堆栈结构能很好地保护作为镜面一侧硅片的表面免受腐蚀液的侵袭, 为后续高反射材料的淀积提供高质量的平整表面。再依次进行两次光刻, 并用 RIE 和 BHF 分别刻蚀氮化硅和氧化硅, 将两次光刻图形转移到相应的掩膜中。接着进行两次 KOH 腐蚀, 对应深度分别为  $345\mu\text{m}$  和

$5\mu\text{m}$ , 并在每一次腐蚀结束后 RIE 去除相应的掩膜, 此时镜面的主体结构已形成。然后通过剥离工艺在玻璃片上制造出电极结构, 利用硅-玻璃阳极键合技术将结构部分与驱动部分结合起来, 并在硅面上溅射  $\text{Ti}/\text{Au}$  以获得所需的反射率, 最后划片形成图 7 所示单个分离的器件(不包括与外界驱动电路的连接部分)。

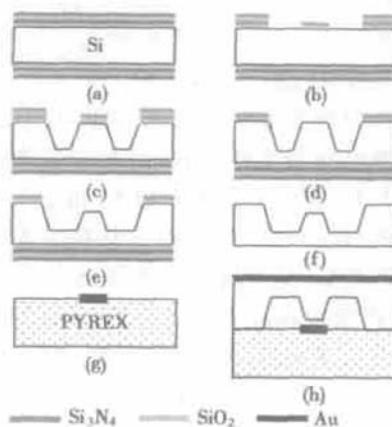


图 6 反射镜加工工艺流程

Fig. 6 Fabrication process of deformable mirror

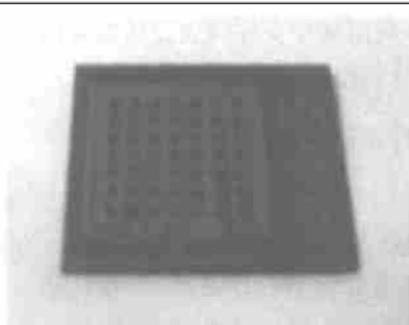


图 7 右边带有三个测试结构的反射镜照片

Fig. 7 Picture of deformable mirror with three test structures on right

#### 3.2 键合工艺的优化

由于硅片中存在相当大的凹腔, 因而键合操作会使得一部分气体残留在其与玻璃形成的密封腔中。一方面, 这些气体会在后续反射镜工作过程中充当阻尼介质, 使反射镜的响应频率下降; 另一方面, 如果键合条件应用不当会出现硅膜破裂的结果。为解决这一问题, 实验中我们采用了一种方法, 不仅实施容易, 而且还能获得很好的效果。其截面图见图 8。



图 8 浅槽结构示意图

Fig. 8 Schematic of shallow trench

具体实施办法是通过 BHF 腐蚀, 在玻璃片上加工出一些贯穿整个器件的浅槽, 使得腔内气体与外界环境保持连通。即使在键合过程中由于阳极电场的作用镜面发生变形, 当键合操作完成后, 镜面也会在自身机械回复力的作用下, 最终恢复平整状态。同时这种结构也起到阻尼孔的作用, 从而消除了空气对反射镜响应频率的负面影响。应用此种方法需要注意的是控制槽的深度, 因为这些槽是贯通键合区的。实验观察发现在键合过程中键合界面会向玻璃内移动。如果槽的深度小于这个移动距离, 则键合操作会将槽阻断, 从而使其丧失作用。多次实验表明, 在上述键合条件下, 这种移动距离为 200nm, 为此我们采用  $1\mu\text{m}$  的槽深。

### 3.3 测试

通过引线键合操作将反射镜与外界控制模块相连, 并使用迈克尔逊干涉仪和精密微动平台对反射镜的静态性能进行测试。在测试反射镜中心位置的变形随中心电极上施加电压的变化趋势时, 随着反射镜的变形, 迈克尔逊干涉仪出来的干涉条纹也将发生移动, 通过控制支撑反射镜的微动平台移动, 使中心处所对应的干涉图像回复到原位, 则此时微动平台的位移量即为镜面中心的变形量。图 9 所示为用上述方法测得的变形-电压数据, 从图中可看到, 这与先前的模拟结果(图 5)非常吻合。

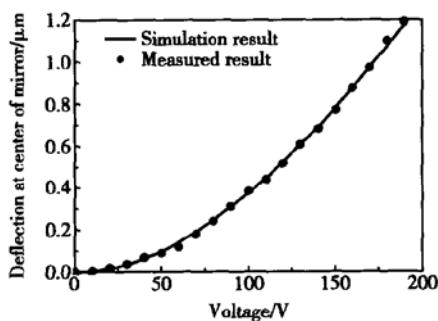


图 9 测试结果与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of the measured results and simulation results

为了获得不同位置的电极对于镜面形貌的贡献, 我们也进行了一些前期的研究, 图 10 给出两个不同位置电极通电后 CCD 采集到的干涉图像, 其圆心处即为所对应的通电电极位置。通过计算机对采集的数据进行后续处理, 就可得到各个电极所对应的影响函数, 这对后续反射镜的闭环控制是非常重要的。

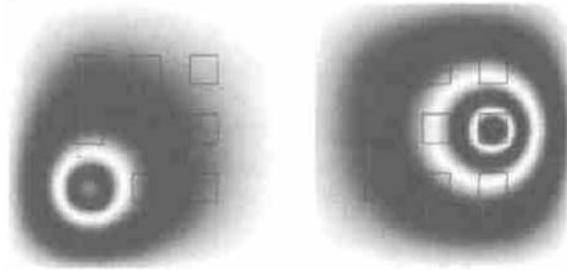


图 10 不同电极通电后测得的镜面干涉图

Fig. 10 Measured interferogram of mirror according to different energized actuators

## 4 结论

本文利用体硅加工和硅-玻璃阳极键合技术成功制造出大连续表面的可变形反射镜。在模拟结果的基础上, 综合考虑响应频率和校正范围的要求, 选定了硅膜厚度为  $30\mu\text{m}$ 。针对键合工序中出现的问题, 提出了相应的解决办法。反射镜的静态测试结果表明其与仿真结果符合的很好。下一步的任务是对反射镜的动态性能进行测试, 并完成闭环控制实验。

## 参考文献

- [1] Tyson R K. Principles of adaptive optics. New York: Academic Press, 1998
- [2] Ealey M A. Active and adaptive optical components: The technology and future trends. Proc SPIE, 1991, 1271: 2
- [3] Thorburn W G, Kaplan L. A low voltage electro-distortive mirror system for wavefront-control. Proc SPIE, 1991, 1543: 52
- [4] Gross R, Fried D L. The membrane mirror as an adaptive optical element. J Opt Soc Am, 1977, 3: 399
- [5] Roggeman M C. Use of micro-electro-mechanical deformable mirrors to control in aberrations in optical systems: theoretical and experimental results. Opt Eng, 1997, 5: 1326
- [6] Mansell J D, Byer R L. Micromachined silicon deformable mirror. Proc SPIE, 1998, 3353: 896
- [7] Vdovin G, Middelhoek S, Sarro P M. Technology and applications of micromachined silicon adaptive mirrors. Opt Eng,

- 1997, 5: 1382
- [ 8 ] Hsu T R. MEMS and microsystems: design and manufacture. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2002
- [ 9 ] Mayer G K, Offereins H L, Sandmeier H, et al. Fabrication of non-underetched convex corners in anisotropic etching of (100)-silicon in aqueous KOH with respect to novel micromechanic elements. *J Electrochem Soc*, 1990, 137: 3947
- [ 10 ] Madou M J. Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2002

## A Novel Deformable Mirror Based on MEMS Technology\*

Yu Hongbin<sup>1</sup>, Chen Haiqing<sup>1</sup>, Zhu Zimin<sup>1</sup>, Zhang Dacheng<sup>2</sup> and Li Ting<sup>2</sup>

(1 Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The design and fabrication of novel deformable mirror based on silicon micromachining technology is presented. A deformable mirror with 900 square of millimeters effective reflecting surface and 49 electrostatic actuators is fabricated successfully. The measured results show that the relationship between the deflection of the mirror and the voltage applied agrees well with the simulation result.

**Key words:** deformable mirror; bulk micromachining; electrostatic actuating; resonant frequency

EEACC: 4180

Article ID: 0253-4177(2004)09-1154-05

Yu Hongbin male, was born in 1977, PhD candidate. He is engaged in fabrication process of MEMS and device.

Chen Haiqing male, was born in 1947, professor. He is engaged in the research on light information storage and micro-optical device.

Received 19 October 2003, revised manuscript received 23 April 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics