

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0078-05

# 基于绝缘体上硅的连续薄膜式微变形镜工艺

乔大勇 苑伟政 田 力

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 绝缘体上硅(SOI)提供了一种“Si/SiO<sub>2</sub>/Si”三层结构,采用深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺,利用其中的二氧化硅绝缘层作为刻蚀自停止层,可以有效控制深硅刻蚀的深度,从而得到厚度均匀、无残余应力的体硅薄膜。利用这层体硅薄膜作为微变形镜的镜面,对 DRIE 工艺和硅/玻阳极键合工艺等进行了深入研究,研制了基于 SOI 的薄膜式微变形镜的加工工艺,获得了微变形镜样件并进行了初步测试。该微变形镜采用静电力驱动,具有 69 个驱动单元,通光孔径为 10 mm。经测试,其表面质量在 7.6 mm×7.6 mm 测试区域内波峰-波谷(PV)值约为 1.2 μm,均方根(RMS)值约为 193 nm;局部表面质量达到 PV 值约为 8.3 nm,RMS 值约为 1.2 nm;在施加 120 V 电压时,镜面中心最大变形量达到 4.25 μm 以上。

**关键词** 光学制造;微变形镜;绝缘体上硅;自适应光学

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0078

## Process of Continuous Membrane Micro-Deformable Mirror Based on SOI Wafer

Qiao Dayong Yuan Weizheng Tian Li

(Micro/Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** Silicon on insulator (SOI) provides a three-layer structure of Si/SiO<sub>2</sub>/Si, and makes it possible to achieve continuous membrane micro-deformable mirror based on deep reactive ion etching (DRIE). By using the SiO<sub>2</sub> as the self-stop layer of dry etching, a single crystal silicon reflective mirror membrane can be readily realized with uniform and precisely controlled thickness. A process based on DRIE and anodic bonding of SOI wafer/Pyrex 7740 glass was presented, and a micro-deformable mirror with 69 actuators was fabricated and tested. The micro-deformable mirror, with an aperture of 10 mm, exhibits a working range of 4.25 μm, a PV flatness of 1.2 μm and a RMS roughness of 193 nm.

**Key words** optical fabrication; micro-deformable mirror; silicon on insulator; adaptive optics

## 1 引 言

自适应光学系统的广泛应用对变形镜提出了多样化的要求。需要孔径介于几个到数百毫米,驱动器数量介于数十到数十万个,驱动器间距介于数百到数千微米的变形镜,而传统技术却无法覆盖如此种类繁多变形镜的制造要求<sup>[1]</sup>。微机电系统(MEMS)技术在微小型变形镜制造方面为传统技术提供了一种有益的补充,用 MEMS 技术制造的微变形镜具有体积小、响应快及集成度高等特点,可以

通过成熟的半导体工艺技术实现批量生产,制造成本低、性能一致性好,很好地弥补了传统技术变形镜制造复杂,只能单件生产且依赖于人工技巧的不足,使变形镜技术进入到了一个全新的发展阶段<sup>[2~4]</sup>。

目前得到实际应用的微变形镜都是薄膜式微变形镜。荷兰 Delft 大学<sup>[5]</sup>,美国 Stanford 大学<sup>[6]</sup>,美国 Boston 大学<sup>[7]</sup>,美国 Lucent 科技 Bell 实验室联合加州大学 Berkeley 分校和 Rochester 大学,美国喷气推进实验室,法国 LAAS-CNRS 实验室和国内

基金项目: 国家自然科学基金(50805123)资助课题。

作者简介: 乔大勇(1977—),男,副教授,博士,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: dyqiao@nwpu.edu.cn

的华中科技大学<sup>[8]</sup>,浙江大学<sup>[9]</sup>,中国科技大学和北京理工大学都对薄膜式微变形镜展开了研究。薄膜式微变形镜的镜面是由一个完整的反射表面构成,它与由多个单元拼接而成的分立式镜面相比具有光学效率高、校正效果好等显著特点。反射镜面的光学质量是薄膜式微变形镜的一项重要指标。由于具有低应力和高平整度的优点,单晶硅是制备微反射镜面的优良材料。Mansell等<sup>[6]</sup>使用体硅湿法腐蚀的方法制备单晶硅微镜面时,为了精确控制镜面的厚度,需要对单晶硅薄膜进行浓硼扩散以实现自停止腐蚀,而浓硼扩散引入的应力又会导致微镜面翘曲变形。绝缘体上硅(SOI)技术为实现单晶硅镜面提供了另一条可行的途径。使用深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺,可以比较容易地实现厚度精确控制的单晶硅微镜面。本文提出了一种SOI片DRIE刻蚀和硅玻阳极键合相结合来制备薄膜式微变形镜的新方法,并对一种69个驱动单元的薄膜式微变形镜进行了加工和初步测试。

## 2 结构版图设计

基于SOI的薄膜式微变形镜结构和各参数如图1所示。微变形镜的结构设计涉及到镜面的形状和尺寸、镜面厚度、镜面与驱动电极的间距、驱动电极的数量和排布、驱动电极的大小和间距等。为避免“拉入”现象的发生,微变形镜的最大变形量只能占到上下极板初始间距的1/3。即最大变形量满足

$$\Delta d_{\max} = g_0/3, \quad (1)$$

式中 $g_0$ 为上下极板间的初始距离,即所能调制的最大波长。当需要的最大变形量为 $2\ \mu\text{m}$ 时,则极板间的初始间距至少应为 $6\ \mu\text{m}$ 才不会产生“拉入”现象。为了增强变形镜的调制能力,应尽量加大镜面至电极的间距,但过大的间距会导致变形镜的实际工作电压过高。另外,镜面的厚度 $t$ 也是一个对工

作电压影响较大的参数。减小镜面厚度可以减小镜面的刚度以降低工作电压,但同时又会降低其谐振频率。综合考虑波长调制范围、驱动电压和谐振频率的因素,将微变形镜镜面的厚度 $t$ 设为 $5\ \mu\text{m}$ ,镜面至电极的间距 $g_0$ 设为 $15\ \mu\text{m}$ ,考虑静电“拉入”的影响,该变形镜具有 $5\ \mu\text{m}$ 左右的最大变形量,可以满足大部分场合的应用需要。

为了易于加工及方便布线,微变形镜的驱动器采用直径 $d$ 为 $500\ \mu\text{m}$ 的圆形电极,材料为铝,相邻两个单元中心距 $s$ 为 $1000\ \mu\text{m}$ ,按照 $9\times 9$ 方形排布,并且去掉12个单元(四个角各去掉3个单元),共69个驱动电极,如图2所示。

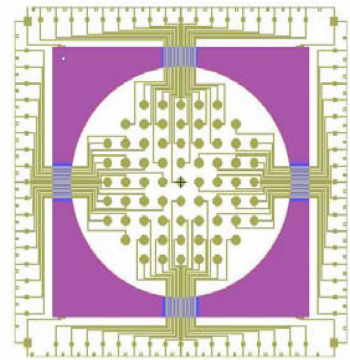


图2 驱动电极排布

Fig. 2 Distribution of actuators

微变形镜镜面和电极阵列之间的间隙是由SOI片的顶层硅和Pyrex7740玻璃之间通过硅/玻阳极键合工艺实现的。硅/玻阳极键合通常在键合片上施加很大的电压(500~1000 V),因为刻蚀好的镜面柔性较大,其与玻璃上的驱动电极之间会因高电压形成强大的静电吸引力,使镜面吸合到基底上导致失效。制版时将各驱动电极的焊盘利用回形导线连接到一起,如图3所示。回形导线通过齿状电极在键合时与镜面所在的顶层硅连接在一起,如图4所示。保证镜面与驱动电极形成一个整体而处于等电势,避免键合时

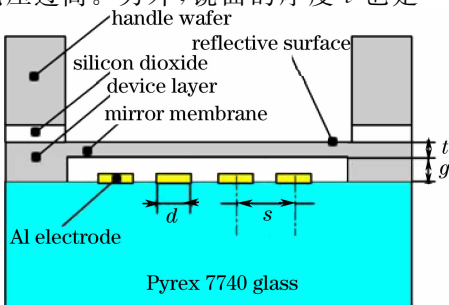


图1 基于SOI的薄膜式微变形镜结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the micro-deformable mirror based on SOI

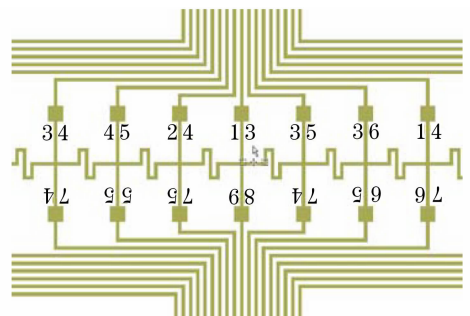


图3 单元间回形连线

Fig. 3 Z-shaped lines connecting the bonding pads

静电力引起的镜面吸合问题。同时,回形导线还可以作为划片标记,划片后回形线被切断,各个电极同时被分离开来,对其驱动功能没有影响。

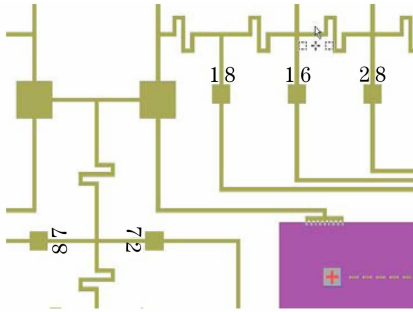


图4 齿状电极连接示意图

Fig. 4 Layout of the comb electrode

### 3 加工工艺

图5给出了基于SOI的薄膜式微变形镜加工工

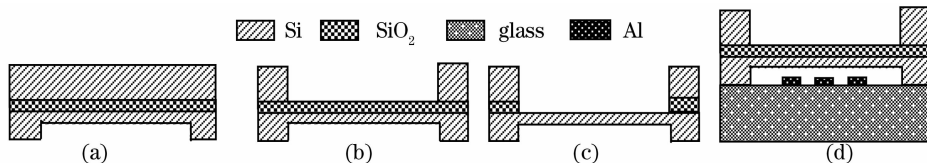


图5 基于SOI的连续薄膜式微变形镜工艺流程。(a)刻蚀顶层硅定义镜面;(b)刻蚀底层硅释放镜面;(c)去除二氧化硅暴露反射面;(d)硅/玻键合形成静电间隙

Fig. 5 Process flow of the SOI based micro deformable mirror. (a) etching firstly the upper layer of the SOI by DRIE to form the mirror membrane; (b) etching secondly the backside deep trench by DRIE to remove the handle layer above the mirror surface; (c) etching thirdly the insulator layer by hydrofluoric acid wet etching to expose the mirror reflective surface; (d) bonding finally the SOI wafer to a glass wafer with patterned Al to form the electrostatic air gap

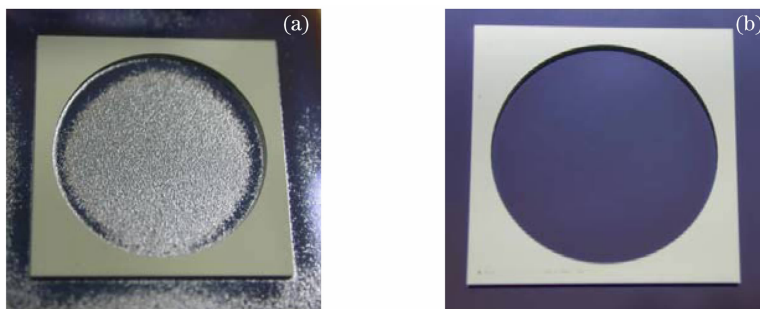


图6 底层硅的DRIE刻蚀效果。(a)绝缘层上有部分底层硅残留;(b)底层硅完全刻蚀干净,暴露出绝缘层

Fig. 6 Etching of the handle wafer layer by DRIE. (a) with part of the handle wafer layer remained;

(b) with all the handle wafer layer completely removed

电极是由淀积在玻璃基底上的金属层经过刻蚀完成。电极金属为铝,采用湿法刻蚀实现图形化,刻蚀溶液为磷酸+硝酸溶液。电极形状为圆形。镜面和电极的组装通过硅/玻静电键合实现。键合电压为500 V,键合温度为350 ℃。键合用的玻璃基底选用Pyrex7740硅酸盐玻璃,此种玻璃中含有足够的碱金属离子,其热膨胀系数与硅比较接近,能够保

证键合过程的顺利完成。其加工包括微镜面制备和驱动电极制备两部分。镜面是由一张SOI硅片经过3次刻蚀完成,依次包括顶层硅刻蚀、底层硅刻蚀及绝缘层刻蚀。SOI硅片各层厚度可根据需要定制,顶层硅厚度应为镜面和驱动电极间隙的高度与镜面厚度之和,绝缘层厚度应该能够抵抗底层硅DRIE刻蚀过程中的过刻蚀,以保证其下方的顶层硅不被破坏。选用SOI硅片规格为4英寸(1英寸=25.4 mm),总厚度为400 μm,其中顶层硅厚度为20 μm,绝缘层厚0.3 μm。顶层硅的刻蚀深度,即镜面与驱动电极间隙的高度为15 μm,底层硅的刻蚀深度为380 μm。绝缘层刻蚀采用氢氟酸溶液湿法腐蚀实现。图6展示了底层硅DRIE刻蚀的效果。当底层硅完全刻蚀干净之后,由顶层硅形成的镜面位于绝缘层的保护之下,不会在DRIE刻蚀中受到任何损伤,而当使用湿法腐蚀去除绝缘层后,则会露出保护完好的镜面反射层。

证键合过程的顺利完成。

### 4 微变形镜测试

加工完成的微变形镜样件如图7(a)所示。微变形镜测试包括不加电情况下的表面形貌测试及施加电压后的变形量测试。由于镜面面积较大,无法采用标准封装管壳进行封装,而是直接将器件焊

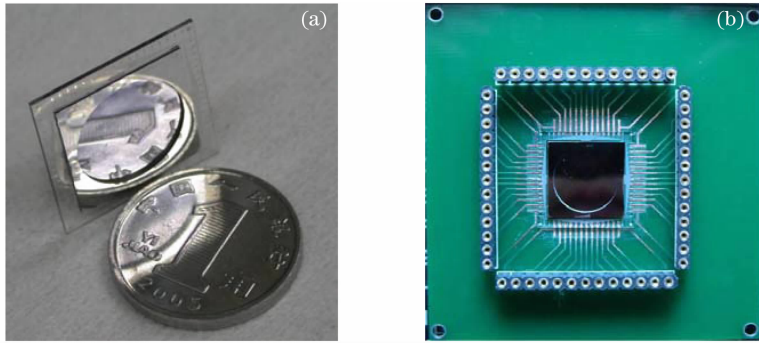


图 7 加工完成的微变形镜样件。(a)未打线;(b)打线到 PCB 板上

Fig.7 Fabricated micro deformable mirror. (a) before wire bonding; (b) after wire bonding

接在测试电路板上,如图 7(b)所示。

#### 4.1 不加电测试

镜面的表面质量关系到变形镜的光学效率并将最终影响自适应光学系统的校正质量,但是由于材料残余应力的影响,镜面在未施加电压的时候就存在一个初始变形,不加电测试主要就是为了掌握镜面在残余应力下的变形情况。采用 Zygo 表面轮廓仪测得的镜面表面形貌如图 8 所示。在  $7.6\text{ mm} \times 7.6\text{ mm}$  的测试区域内,镜面表面波峰-波谷(PV)值约为  $1.2\text{ }\mu\text{m}$ ,均方根(RMS)值约为  $193\text{ nm}$ ,基本能够满足自适应光学系统的要求。

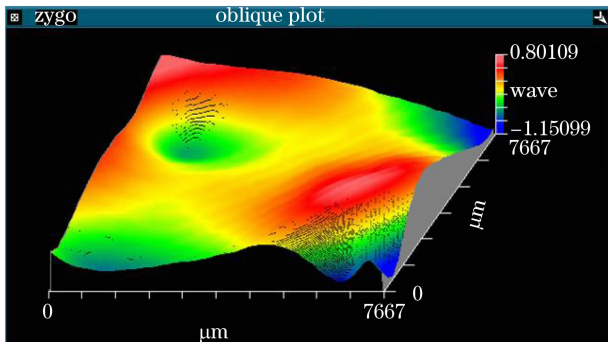


图 8 表面轮廓仪测得的三维形貌图

Fig.8 Surface profile of the mirror

#### 4.2 加电测试

微变形镜镜面的最大变形量决定了变形镜所能调制光波波长的范围,加电测试主要为了掌握镜面变形与所施加静电电压的关系曲线。测试采用 Zygo 表面轮廓仪及 ADJ300-2 直流电源(电压范围  $0\sim 300\text{ V}$ ,电流范围  $0\sim 2\text{ A}$ ),选取中心电极施加不同电压,得到的镜面变形-电压关系曲线如图 9 所示。

施加较小电压时,镜面变形量基本成线性增长,随着电压加大,变形量的非线性增长明显增强。当施加  $120\text{ V}$  电压时,镜面变形达到  $4.25\text{ }\mu\text{m}$ 。若继续加大电压则镜面变形量会急剧增大至十几微米,

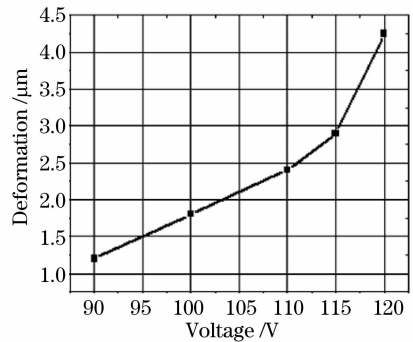


图 9 薄膜式微变形镜镜面电压-变形曲线

Fig.9 Deformation of the mirror center as a function of the applied voltage between the mirror surface and the central electrode

此时镜面已接触到电极,发生“拉入”,导致该电极短路烧毁。为避免静电“拉入”发生,其极限工作电压应设为  $120\text{ V}$ ,极限变形量为  $4.25\text{ }\mu\text{m}$ ,约为镜面与电极之间距离的  $1/3$ 。

## 5 结 论

利用 SOI 所提供的“Si/SiO<sub>2</sub>/Si”三层结构和 SOI 顶层硅表面质量好、残余应力小的优点,设计制造出具有较好表面质量和较宽调制范围的薄膜式微变形镜。所制造的微变形镜具有 69 个驱动单元,有效通光孔径为  $10\text{ mm}$ 。经测试,其表面 PV 值约为  $1.2\text{ }\mu\text{m}$ ,RMS 值约为  $193\text{ nm}$ ,镜面中心最大变形量达到  $4.25\text{ }\mu\text{m}$  以上。微变形镜的最大变形量基本满足可见光波段自适应光学系统的要求,但是由于残余应力引起的初始变形还是偏大,尚需要进一步改进。

## 参 考 文 献

1 F. Zamkotsian, A. Liotard, P. Lanzoni *et al.*. Electrostatic micro-deformable mirror for adaptive optics [C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 627222  
 2 P. Kurczynski, J. A. Tyson, B. Sadoulet *et al.*. Membrane

- mirrors for vision science adaptive optics [C]. *SPIE*, 2001, **4561**: 147~162
- 3 J. A. Perreault, T. G. Bifano, B. M. LeVince *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(3): 561~566
- 4 Xiang Dong, Wang Qingling, Zhang Guangyong *et al.*. Recent progress and application for deformable mirrors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 659~663  
向 东, 王青玲, 张光勇 等. 可变形反射镜的研究进展及应用 [J]. *半导体光电*, 2006, **27**(6): 659~663
- 5 G. Vdovin, L. Sarro. Flexible reflecting membranes micromachined in silicon [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1994, **9**: 1570~1572
- 6 J. D. Mansell, R. L. Byer. Micromachined high reflectance deformable mirror [P]. USA: 6108121, 2000-08-22
- 7 S. F. Nee, L. F. Desandre, T. Bifano *et al.*. Optical characterization of MEMS deformable mirror array structures [C]. *SPIE*, 2001, **4447**: 65~76
- 8 Wang Chao, Yu Hongbin, Chen Haiqing. Novel deformable mirror based on MEMS technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4): 89~92  
汪 超, 余洪斌, 陈海清. 基于 MEMS 技术的新型变形反射镜 [J]. *光电工程*, 2005, **32**(4): 89~92
- 9 Zhang Wei, Lou Di, Ye Hui *et al.*. Technical study of micro-mirror based on PZT films in adaptive optics [J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(3): 81~85  
张 巍, 娄 迪, 叶 辉 等. 微光学自适应技术中基于 PZT 薄膜的微反射镜工艺研究 [J]. *光学仪器*, 2006, **28**(3): 81~85