

微机电系统扭转微镜面驱动器的研制*

李四华^{1,2,†} 刘玉菲^{1,2} 高翔^{1,2} 吴亚明¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 提出了一种新颖的采用键合减薄工艺制作的微机电系统扭转微镜面驱动器, 该种微镜面驱动器工艺制作简便可行. 通过对研制的微镜面驱动器进行测试, 该驱动器在 18V 驱动电压时可以达到 0.3 的扭转角度, 微镜面的频率响应时间小于 1ms. 同时该驱动器具有较大的微反射镜面, 面积达到 600 μm \times 700 μm , 试验结果表明微镜面驱动器将可以应用于光通信领域.

关键词: 微机电系统; 扭转微镜面; 驱动器; 键合减薄

PACC: 4230Q; 4283; 4285D

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)04-0756-05

1 引言

微机电系统(MEMS)是基于微细加工技术发展起来的集机械、电子等多学科交叉的一门新兴学科, 随着微机电系统技术的不断快速发展, 基于微机电系统技术制作的光学器件也得到广泛的应用^[1~3]. 在光通信、光显示等领域需要使用微反射镜面以控制光信号的传输与显示, 例如 MEMS 光开关、光衰减器、光扫描器、数字微镜器件(DMD)显示器等, 其中微镜面驱动器是其关键技术. 采用微机电系统制作的微镜面驱动器具有可大批量生产、微型化、功耗低和易于集成等优点, 因此微机电系统制作的微镜面驱动器也得到了广泛的研究. 现有微镜面驱动器的研究主要分为平动微镜面驱动器和转动微镜面驱动器. 在平动微镜面驱动器中, 微镜面运动方式采用平移方式^[4], 但是由于微镜面通常采用硅深刻蚀制作工艺, 导致镜面粗糙度大, 同时器件的响应时间也较长. 转动微镜面驱动器通常采用静电扭转微镜面运动, 驱动器的驱动电压高低、工艺制作难易、响应时间长短以及功耗大小等是其需要解决的主要问题. 已经研制出的一些转动微镜面器件虽然有较好的光学机械性能, 但是加工制作工艺复杂、成本高昂, 如应用于光显示的 DMD^[5]. 由于驱动器需要较高的驱动电压使得应用范围受到限制^[6~8], 还存在响应时间过长、光学镜面小等不足^[9,10]. 针对现有的这些基于 MEMS 制作的微镜面驱动器存在的一些

问题, 同时考虑光通信中需要应用小扭转角度的微镜面驱动器, 本文提出了一种新颖的采用键合减薄技术来制作一种响应时间短、驱动电压低、制作工艺简单可行的小角度扭转微镜面驱动器. 通过对研制出的器件进行测试, 结果表明该微镜面驱动器具有较好的器件性能. 通过优化改进, 该扭转微镜面驱动器将可以很好地应用于光通信的可调光衰减器模块中, 也可以应用于光通信中的数字光开关器件中.

2 器件设计与工艺制作

考虑到微镜面驱动器的电子机械稳定性、器件功耗以及驱动器的工艺制作, 我们采用了简单的静电驱动的扭转镜面设计. 图 1 所示是我们设计的扭转微镜面驱动器的示意图. 它是由两个微梁结构连

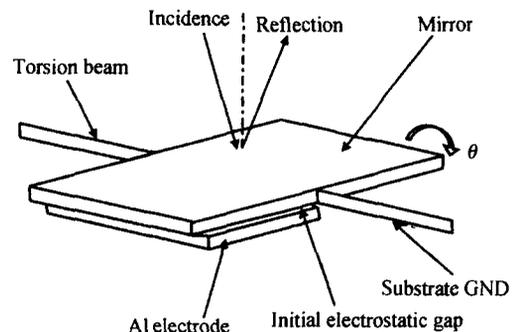


图 1 MEMS 扭转微镜面驱动器示意图

Fig. 1 Principle of torsion micromirror based on MEMS technology

* 上海市科委光科技专项计划资助项目(批准号:046105006)

† 通信作者. Email: lisihua@mail.sim.ac.cn

2005-09-01 收到, 2005-10-16 定稿

接支撑一个微反射镜面. 通过在微镜面和其下方的铝电极之间施加驱动电压, 利用两者产生的静电力驱动微镜面的扭转. 利用静电驱动扭转微镜面驱动器保证了驱动器的快速响应以及较低的功耗, 同时通过精密控制施加的驱动电压来控制扭转角度. 扭转微镜面的驱动电压以及静电力可以通过公式 (1) ~ (4) 进行推导^[11].

$$F_z^E = \frac{1}{2} \epsilon_0 V^2 \cos \theta \iint_{\text{area}} \left[\frac{\sin \theta}{g - d - x \sin \theta} \right]^2 dA \quad (1)$$

$$F_z^M = \frac{192 EI}{(2l)^3} d \quad (2)$$

$$T^E = \frac{1}{2} \epsilon_0 V^2 \iint_{\text{area}} x \left[\frac{\sin \theta}{g - d - x \sin \theta} \right]^2 dA \quad (3)$$

$$T^M = 2 \frac{Gwt^3}{3l} \left[1 - \frac{192}{5} \times \frac{l}{w} \tanh \frac{w}{2t} \right] \quad (4)$$

上式中考虑了扭转梁的弯曲影响, 其中 T^E 为静电扭矩; T^M 为机械扭矩; 静电力为 F_z^E ; 微梁的扭转机械力为 F_z^M ; 真空中的介电常数表示为 ϵ_0 ; 驱动电压为 V ; 上下电极最初的间隙为 g ; 镜面倾斜角度为 θ ; 电极的面积为 dA ; x 为电极到梁中心线的距离; G 为材料的剪切模量; 扭转梁的长、宽、高分别为 l, w, t ; d 为微镜在垂直方向的位移; E 为材料的杨氏模量; I 为扭转梁的瞬态惯量.

扭转镜面的响应频率是驱动器应用的一项重要指标, 驱动器的响应频率可以用 (5), (6) 式推导^[12].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (5)$$

$$K = \frac{2 GK_l wt^3}{l} \quad (6)$$

$$I = \frac{1}{12} BtL^3 \quad (7)$$

其中 扭转梁长、宽、高分别为 l, w, t ; 微镜面的长、宽分别为 B, L ; 器件材料密度为 ρ ; G 为扭转梁的剪切模量; f 为器件响应频率.

我们采用 MEMS Coventorware 软件对扭转微镜面结构进行了三维模拟计算. 考虑到驱动器的工艺制作以及高的响应时间等使用要求, 我们设计了镜面大小为平行扭转梁方向长 $600\mu\text{m}$, 垂直扭转梁方向宽 $700\mu\text{m}$, 扭转梁宽为 $3\mu\text{m}$, 长为 $300\mu\text{m}$, 厚为 $30\mu\text{m}$, 微镜面和其下铝电极的最初间距为 $9\mu\text{m}$ 的扭转微镜面驱动器.

为了实现扭转微镜面驱动器的工艺制作, 同时为了避免采用复杂的表面加工工艺技术. 本文设计了一种新颖、简单的键合减薄体硅加工工艺. 键合技术是指通过化学和物理作用将硅片与硅片、硅片与玻璃或其他材料紧密地结合起来的方法. 通常用在 MEMS 加工工艺中的硅片键合技术包括金硅共熔键合、硅/玻璃阳极键合、硅/硅直接键合以及玻璃焊料烧结等^[12]. 我们设计的微镜面驱动器在工艺上采用硅/玻璃阳极键合技术. 为了使硅片达到器件预期的厚度, 经常会采用减薄工艺对硅片进行减薄处理. 在半导体工业中通常采用机械化学减薄抛光 (CMP) 的方法把硅片厚度减少到需要的厚度, 还有一些采用硅深刻蚀的方法对硅片进行整体减薄. 在设计的微镜面驱动器的工艺制作中, 我们提出的键合减薄工艺就是采用先键合后减薄的体硅加工来实现微镜面驱动器的制作. 其具体的实现步骤如图 2 所示.

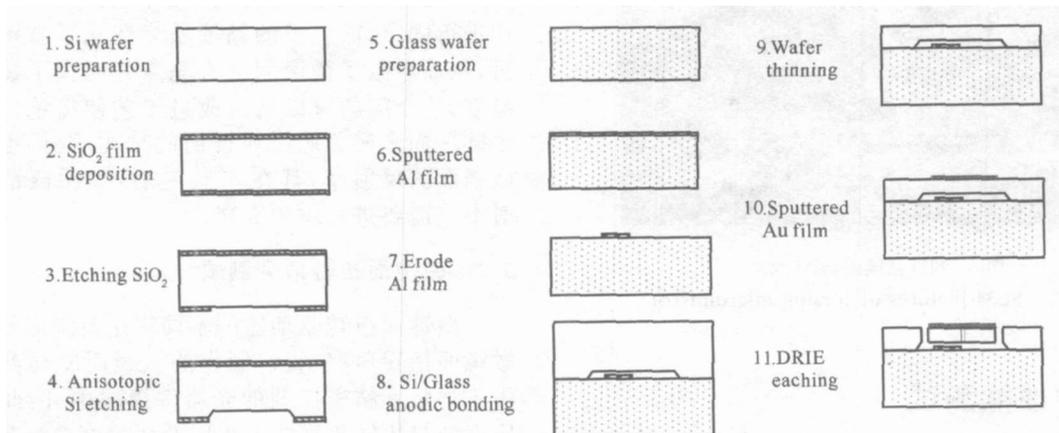


图 2 MEMS 扭转微镜面驱动器制作过程

Fig. 2 Fabrication processes of the torsion micromirror actuator

步骤 1: 硅片准备; 步骤 2: 在硅片上通过氧化工艺制作一层厚约 300nm 的 SiO_2 薄膜; 步骤 3: 使用

光刻、 SiO_2 腐蚀工艺定义出扭转镜面背部区域; 步骤 4: 使用 KOH 的各向异性腐蚀溶液制作出扭转镜

面上下电极的最初间距,约 $10\mu\text{m}$;步骤 5:准备 Pyrex7740 键合用玻璃;步骤 6:在 Pyrex7740 玻璃上通过溅射工艺制作一层厚度约 $1\mu\text{m}$ 的 Al 薄膜;步骤 7:通过光刻、Al 腐蚀工艺制作出扭转镜面的 Al 电极;步骤 8:通过硅/玻璃的阳极键合工艺把加工好的硅片和制作好下电极的玻璃进行键合;步骤 9:通过减薄工艺把硅片厚度减少到 $40\mu\text{m}$;步骤 10:在减薄后的硅表面上溅射一层厚为 300nm 的 Ti/Au 作为扭转镜面的反射面和上电极的引线区;步骤 11:使用深反应离子刻蚀(DRIE)工艺释放出扭转镜面结构完成制作。

图 3 为本文制作的扭转微镜面驱动器的扫描电子显微镜(SEM)照片。由图可见,微镜面驱动器的悬空结构以及微梁制作获得了良好的结果。

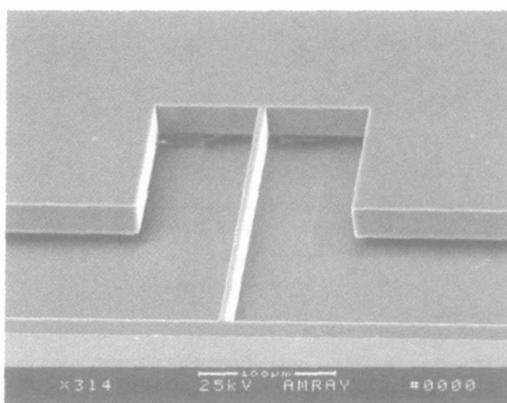
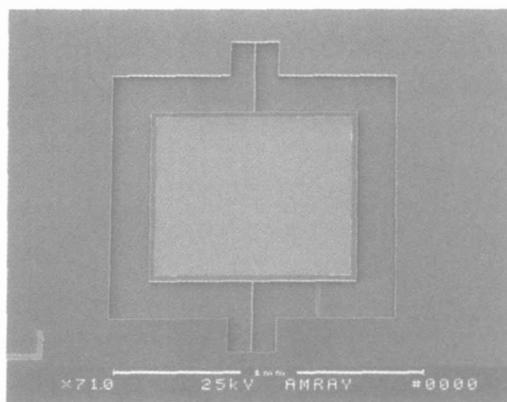


图 3 扭转微镜面 SEM 照片

Fig. 3 SEM pictures of torsion micromirror

3 器件性能测试

由于制作出的扭转微镜面驱动器主要应用于光通信的光器件模块中,因此微镜面的粗糙度、镜面的扭转角度以及微镜面的响应时间是驱动器的主要应用指标。我们对制作出来的微镜面驱动器按以上

三个指标分别进行了测试。

3.1 微镜面粗糙度测试

在光通信器件中,粗糙的反射镜面会导致光信号的损耗,最终影响光器件的性能。因此应用于光器件的微镜面驱动器必须严格控制微镜面的粗糙度。我们利用原子力显微镜(AFM)对制作出的驱动器微镜面进行了粗糙度测试。图 4 是驱动器微镜面粗糙度的测试图。测试结果表明在 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 的面积内,微镜面的平均粗糙度为 1.294nm 。同时可以从测试图中看到微镜面的表面有一些亮点,经分析认

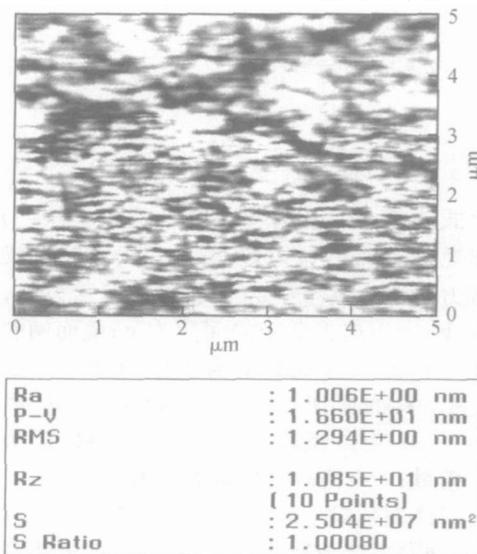


图 4 微镜面粗糙度测试图

Fig. 4 Roughness of the micromirror

为是由于采用了划片机对硅片进行最后的器件分离。在进行该工艺时需要在硅片表面粘贴蓝膜对硅片进行固定,而蓝膜的黏液最终造成了微镜面的玷污,从而导致了微镜面上有亮点并增大了镜面的粗糙度,这个问题可以通过改进工艺使得镜面低于整个硅平面来避免蓝膜对镜面的玷污。我们也测试了微镜面的反射率,其在 82% 左右,表明微镜面的反射率还需要进一步的提高。

3.2 微镜面扭转角度测试

微镜面扭转驱动器的不同应用范围需要不同的微镜面扭转角度。我们制作的微镜面驱动器主要应用于小角度精密控制的光器件模块中,因此驱动电压高低与扭转角度的大小以及线性度最终都对光器件的性能有很大的影响。对微镜面驱动器的驱动电压和扭转角度的测试如图 5 所示。图中可调稳压源输出不同的电压控制驱动器的扭转角度,而 WYKO 光学表面轮廓仪则扫描出微镜面的不同扭转角度。

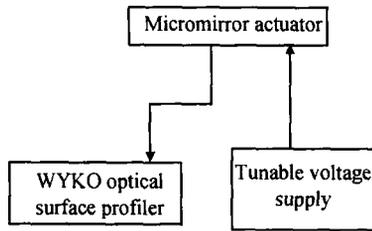


图 5 微镜面扭转角度测试示意图
Fig.5 Test principle of torsion angle

图 6 显示了制作的微镜面驱动器的驱动电压与扭转角度关系的测试结果与模拟设计的结果比较. 从图中可以看出, 测试结果与模拟结果符合得很好. 在驱动电压为 18V 左右时, 微镜面有 0.3 左右的扭转角度. 这样的扭转角度可以满足光通信的衰减器模块的要求. 同时当驱动器高于 18V 以后, 由于器件的吸合效应, 微镜面将达到 $\pm 1.5^\circ$ 的最大扭转角度, 可满足数字光开关器件的要求. 由于工艺制作中的加工精度以及加工误差, 使得两电极之中的空隙没有达到理论上所要求的 $9\mu\text{m}$ 距离, 导致镜面的最大扭转角度比理论值偏小.

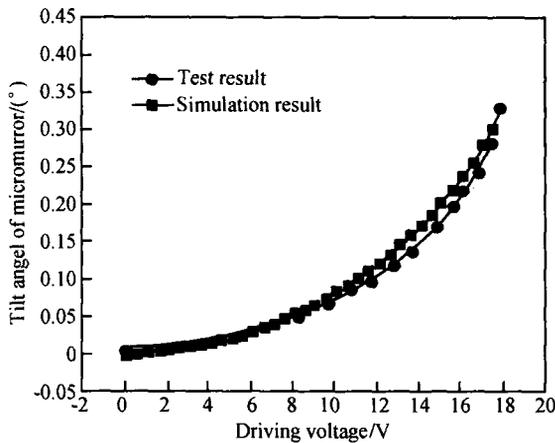


图 6 微镜面驱动电压和扭转角度关系
Fig.6 Relationship of Tilt angle versus driving DC voltage

3.3 微镜面响应时间测试

微镜面响应频率的大小最终决定了光学器件对光信号的响应快慢. 我们采用如图 7 中的测试原理图对微镜面驱动器的响应时间在大气中进行了测试. 测试中, 采用输出电压为 10V, 频率为 250Hz 的方波施加在微镜面驱动器上. 可调谐激光器光源 (TLS) 输出 1550nm 光信号照射在驱动器微镜面上, 反射光经过一个狭缝后利用光探测器探测出光信号的变化, 并通过光探测器输出响应信号到示波器, 最终获得微镜面的响应时间. 图 8 是微镜面驱动

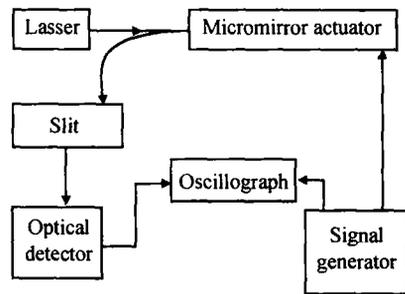


图 7 微镜面响应频率测试示意图
Fig.7 Test principle of resonant frequency

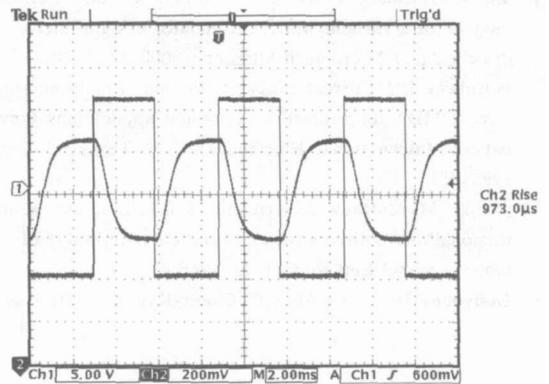


图 8 微镜面驱动器的频率响应波形
Fig.8 Resonant frequency of micromirror actuator

器的频率响应测试波形. 利用 Tektronix TDS3014B 数字示波器对光探测器的输出信号进行了检测, 从测试结果上可以看出, 微镜面驱动器的响应时间为 $973\mu\text{s}$, 从测试图中还可以看出, 微镜面驱动器具有良好的响应稳定性. 同时利用 Veeco 公司的动态 MEMS 测试仪器测试了驱动器的自然振动频率在 1.25kHz 附近, 这与测试的结果较为吻合. 但是设计模拟中未考虑空气阻尼的影响, 因此测试的响应频率低于 1.6kHz 的模拟结果. 根据不同的应用, 可以调整微镜面扭转梁的尺寸来进一步提高器件的响应频率.

4 结论

提出了一种新颖的采用键合减薄工艺制作的微镜面驱动器, 通过对研制的微镜面驱动器进行测试可知, 在 18V 驱动电压下可以达到 0.3 的扭转角度, 微镜面的响应时间小于 1ms. 并且驱动器的微镜面较大, 达到 $600\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$ 的面积, 满足了光通信中通常的光斑大小. 通过对微镜面驱动器的优化设计, 使该驱动器可以很好的应用于光通信器件中.

参考文献

- [1] Martin H, Edgar V. Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems. *J Micromech Microeng*, 2002, 12(4) :349
- [2] Noell W, Clerc P A, Dellmann L, et al. Applications of SOI-based optical MEMS. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2002, 8(1) :148
- [3] Yu Hongbin, Chen Haiqing. A novel versatile micromirror with multi-movement mode. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(4) :816 (in Chinese) [余洪斌 陈海清. 具有多运动自由度的新型多功能微镜. *半导体学报*, 2005, 26(4) :816]
- [4] Liu A Q, Zhang X M, Lu C, et al. Optical and mechanical models for a variable optical attenuator using a micromirror drawbridge. *J Micromech Microeng*, 2003, 13(3) :400
- [5] Hornbeck L J. Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television applications (invited paper). *International Electron Devices Technical Digest*, 1993 :381
- [6] Veljko M, Matthew L, Kristofer S J P. Laterally actuated torsional micromirrors for large static deflection. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(2) :245
- [7] Dooyoung H, Chang Auck C, Chang Kyu K, et al. A self-aligned vertical comb-drive actuator on an SOI wafer for a 2D scanning micromirror. *J Micromech Microeng*, 2004, 14(8) :1148
- [8] Tsou C, Lin W T, Fan C C, et al. A novel self-aligned vertical electrostatic combdrives actuator for scanning micromirrors. *J Micromech Microeng*, 2005, 15(4) :855
- [9] Patrick B C, Igal B, Chuan P, et al. Design and nonlinear servo control of MEMS mirrors and their performance in a large port-count optical switch. *Journal of Microelectromechanical System*, 2005, 14(2) :261
- [10] Yong S Y, Ki D B, Jin H K, et al. A low voltage actuated micromirror with an extra vertical electrode for 90° rotation. *J Micromech Microeng*, 2003, 13(6) :922
- [11] Degani O, Nemirowsky Y. Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuators based on new analytical pull-in expressions. *Journal of Microelectromechanical System*, 2002, 11(1) :20
- [12] Bao M H. Micro mechanical transducers. Volume 8, *Handbook of Sensors and Actuators*, Elsevier, 2000
- [13] Gosele U, Alexe M, Kopperschmidt P, et al. Semiconductor wafer bonding. A flexible approach to materials combinations in microelectronics; micromechanics and optoelectronics. *Semiconductor Conference, CAS '97 Proceedings*, 1997 :23

Analysis and Fabrication of Torsion Micromirror Actuators Based on a MEMS Technology *

Li Sihua^{1,2,†}, Liu Yufei^{1,2}, Gao Xiang^{1,2}, and Wu Yaming¹

(1 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract : Based on micro-electro-mechanical systems, a novel method employing bonding and wafer thinning technologies is proposed and demonstrated to fabricate torsion micromirror actuators with dimensions of $600\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$. The experimental results show that a tilt angle of about 0.3° is achieved under a driving voltage of 18V with a resonator frequency over 1kHz.

Key words : MEMS; torsion micromirror; actuator; bonding and wafer thinning

PACC : 4230Q; 4283; 4285D

Article ID : 0253-4177(2006)04-0756-05

* Project supported by the Special Foundation for Optical Science of the Committee of Science and Technology of Shanghai (No. 046105006)

† Corresponding author. Email: lisihua@mail.sim.ac.cn

Received 1 September 2005, revised manuscript received 16 October 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics