

文章编号 1004-924X(2013)02-0400-08

垂直梳齿驱动的大尺寸 MOEMS 扫描镜

刘英明^{1,2*}, 徐 静¹, 钟少龙¹, 翟雷应¹, 吴亚明¹

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 微系统技术重点实验室 传感技术联合
国家重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院 大学, 北京 100039)

摘要:提出了一种采用垂直梳齿驱动器驱动的大尺寸、大扭转角度、低驱动电压微光机电系统(MOEMS)扫描镜。理论分析了垂直梳齿驱动器的工作原理,研究了垂直梳齿的制作工艺,采用体硅加工工艺结合硅-硅键合工艺制作了垂直梳齿驱动的 MOEMS 扫描镜。制作的扫描镜镜面尺寸为 3 mm×2 mm,谐振频率为 1.32 kHz。测试表明,该扫描镜镜面具有很好的光学表面,其表面粗糙度的均方根只有 8.64 nm;扫描镜在驱动电压为 95 V 时可以实现最大 2.4°的扭转角度;测得其开启时的响应时间为 1.887 ms,关断时的响应时间为 4.418 ms。

关键词:微光机电系统(MOEMS);扫描微镜;垂直梳齿驱动器;体硅工艺

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0400

Large-scale MOEMS scanning mirror actuated by vertical comb

LIU Ying-ming^{1,2*}, XU Jing¹, ZHONG Shao-long¹, ZHAI Lei-ying¹, WU Ya-ming¹

(1. *Laboratory of Science and Technology on Microsystem, State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: liuyingming@mail.sim.ac.cn*

Abstract: A Micro-opto Electro-mechanical System(MOEMS) scanning mirror with a large size, large torsional angles and a low driving voltage actuated by a vertical comb driver was proposed. The working principle of the vertical comb driver was analyzed and its fabrication process was discussed. By using a bulk micromachining process technology combined with a silicon-silicon bonding process, a vertical comb driver actuated MOEMS scanning mirror was fabricated. The fabricated scanning mirror has a size of 3 mm×2 mm, and a resonant frequency of 1.32 kHz. The test results show that the mirror has a high quality optical surface and the RMS of surface roughness is only 8.64 nm. When the driving voltage is set to be 95 V, the maximum rotation angle of the mirror is 2.4°. Furthermore, the tested turn-on responding time and turn-off responding time for the mirror are 1.887 ms and 4.418 ms, respectively.

收稿日期:2012-09-05;修订日期:2012-10-29.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2008AA03Z406, 2009AA03Z443);国家自然科学基金资助项目(60877066)

Key words: Microelectromechanical Systems (MEMS); scanning mirror; vertical comb driver; bulk micromaching

1 引言

扫描微镜是微光机电系统 (Micro-optoelectro-mechanical System, MOEMS) 中一种重要的光学器件,已经在光开关、投影显示、光纤传感系统等得到了广泛的应用^[1-3]。而且随着 MEMS 加工技术的进一步完善,在一些新兴的应用领域,如新型激光共焦显微系统^[4]、高性能光通信^[5]等系统中也逐渐采用 MEMS 光学扫描微镜作为核心扫描器件。

相对于其它技术手段制作的扫描器件,MOEMS 扫描微镜具有体积小、功耗低、成本低、可批量生产等优势^[6]。为了进一步适应新兴光学系统对大扭转角度、高光学分辨率和低能量损耗的要求,MOEMS 扫描微镜逐渐向着大镜面尺寸(镜面尺寸达到毫米甚至厘米量级)、高扭转频率和大扭转角度的方向发展^[7],因此需要 MOEMS 的加工技术能够提供大尺寸的器件加工技术。MOEMS 的加工技术主要有表面加工工艺和体硅加工工艺。表面加工工艺沉积出来的薄膜厚度过小,无法制作大尺寸的微镜^[8],而体硅微加工工艺可以制作出厚度很大的镜面,以此可提高镜面的刚度、稳定性和光学性能。

MEMS 器件的驱动方式很多,如电磁驱动、热驱动、压电驱动、静电驱动等^[9]。但是对于 MEMS 光学器件,从工艺的复杂程度、兼容性以及成本方面考虑的话,静电驱动是首选的驱动方式。因为相对于其它驱动方式,静电驱动的 MOEMS 器件结构简单、体积小、功耗低且易于集成^[10]。静电驱动方式又分为平板电容驱动方式和梳齿电容驱动方式。平板电容驱动方式由一个可动的微镜面和一个位于微镜部下部的固定下电极构成立体结构,因此,其阵列结构比较简单。但是平板电容驱动器存在吸合效应 (pull-in effect)^[11]。镜面的移动距离要小于镜面到平板电极距离的三分之一,否则镜面和下电极之间会产生吸合造成器件失效。为了避免吸合效应,镜面和下电极之间的距离就要设计的很大,这导致了平板电容驱动器所需要的驱动电压很高。目前

采用平板电容驱动的扫描微镜在低电压下可控角度很小(小于 1°),而且镜面尺寸也不够大(只有几百微米)。如果采用平板电容驱动器驱动大尺寸大扭转角度(面积大于 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$,扭转角度大于 1°)的扫描微镜,驱动电压要大于 200 V,如此高的驱动电压已经超出了很多场合的应用要求^[12]。虽然采用台阶电极等方法可以降低驱动电压,但是又显著增加了工艺的复杂性,而且驱动电压依然很高^[13]。相对于平板电容驱动,梳齿电容驱动没有吸合效应的影响,具有驱动电压低、扭转角度大等优势^[14]。如半径为几百微米的扫描微镜,驱动电压只有几十伏,扭转角度可以大于 15° 。

为了得到大尺寸、大扭转角度的 MOEMS 扫描微镜,文中设计并制作了一种基于垂直梳齿驱动的大尺寸 MOEMS 扫描微镜。该微镜采用体硅微加工工艺和硅片键合制作工艺,镜面的尺寸达到了 $3\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。在 1.32 kHz 的工作频率下实现了 $\pm 2.4^\circ$ 的扭转角度。与此同时还确保了镜面的光学质量。

2 大尺寸 MOEMS 扫描微镜的设计

设计的大尺寸 MOEMS 扫描微镜的结构示意图如图 1,微镜的镜面通过 2 个扭转梁固支在外框上,镜面上面溅射一层金作为高反射率镜面。在扭转梁的两侧从镜面上各伸出 2 个单端悬臂梁,

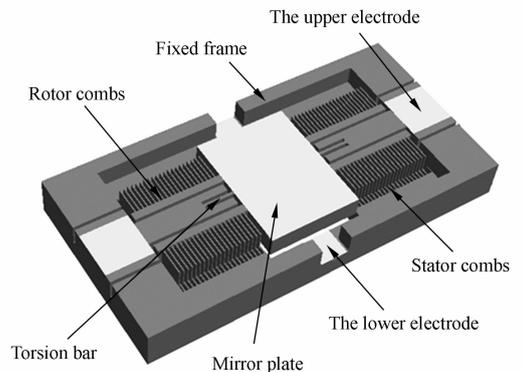


图 1 垂直梳齿驱动微镜的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning mirror actuated by vertical comb

在悬臂梁上布满可动梳齿。而固定梳齿则固定在外框上。可动梳齿和固定梳齿在垂直方向有一个高度差,水平方向有一个几微米大的间隙。当在可动梳齿和固定梳齿之间施加电压时,可动梳齿和固定梳齿之间产生静电力,使得可动梳齿向下运动,由此带动扭转梁和微镜镜面扭转。因此通过控制微镜的扭转角度就可以实现对光束的扫描功能。

垂直梳齿的工作原理如图 2 所示,其中 a 为梳齿长度, w 为梳齿宽度, h 为梳齿的厚度, d 为可动梳齿和固定梳齿在水平方向的间距, l 为梳齿之间的交叠长度, L 为梳齿的力臂臂长。图 2(a)为垂直梳齿的平面图,图 2(b)为梳齿的剖面图,图 2(c)为梳齿在施加电压时的示意图。微镜的扭转角度和梳齿的尺寸、扭转梁的尺寸以及驱动电压有关,当固定梳齿和可动梳齿施加电压后,静电力力矩可以表示为^[15]:

$$T(\theta) = -\frac{N\partial C(\theta)}{\partial \theta} V(t)^2 = -N \frac{\epsilon V(t)^2}{d} \frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta}, \quad (1)$$

其中, N 为镜面一侧梳齿的对数, $C(\theta)$ 为电容值, V 是驱动电压, d 是固定梳齿和可动梳齿在水平方向的间距, $S(\theta)$ 是固定梳齿和可动梳齿之间的交叠面积。从公式来看,力矩的大小和电压的平方成正比。同时减小梳齿之间的间隙,增加梳齿对数都可以提高静电矩的大小,而交叠面积和角度的关系可以用曲线拟合的方法获得。静电力使可动梳齿向下运动时,扭转梁产生扭转,产生的扭转矩可以表示为:

$$T_{\varphi} = K_{\varphi} \theta, \quad (2)$$

其中, K_{φ} 为扭转刚度系数,用以下公式表示:

$$K_{\varphi} = \frac{\pi \beta G \omega^3 h}{180 l}, \quad (3)$$

其中, G 为硅的剪切弹性模量, ω , h 和 l 分别为扭转梁的宽度、厚度和长度。 β 是扭转梁的宽度和厚度的比例系数。因此扭转角度和电压的关系可以表示为:

$$K_{\varphi} \theta = -\frac{N \epsilon V(t)^2}{d} \frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta}. \quad (4)$$

可见最终扭转角度和驱动电压、动齿和定齿之间的间隙、梳齿数量、梳齿的交叠面积对角度的偏微分有关。

因为微镜的扭转角度与梳齿尺寸、梁的尺寸有关,因此通过优化设计梳齿参数以及梁的参数可以得到扭转角度和驱动电压的最佳关系。同时

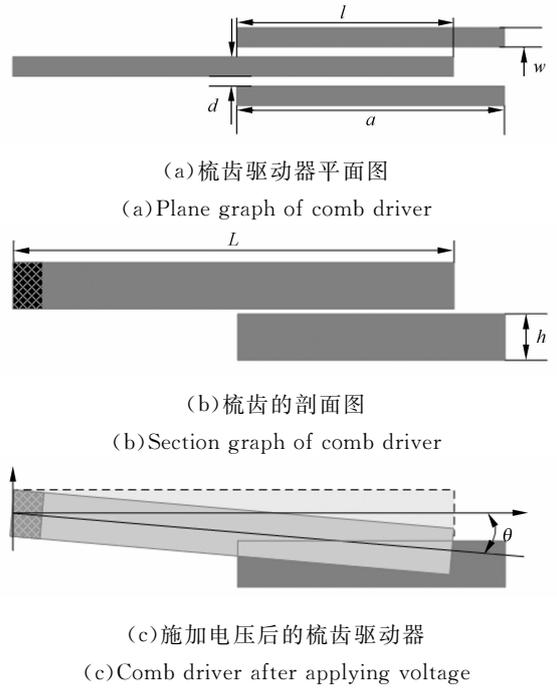


图 2 垂直梳齿驱动器的工作原理

Fig. 2 Operating principle of vertical comb driver

在设计微镜的参数时还要考虑工艺上能否实现。如根据上面的分析,减小水平方向梳齿之间的间隙可以增大静电力,但是过小的间隙在工艺上实现起来比较困难,而且也会降低器件的可靠性。因此,这里梳齿之间的间隙设计为 $4 \mu\text{m}$ 。另外,为了提供足够大的力矩,同时又要保证梳齿的刚度,因此梳齿的宽度设计为 $7 \mu\text{m}$,长度设计为 $300 \mu\text{m}$ 。另外,扭转梁也是影响驱动电压和谐振频率的重要因素。图 3 为在扭转梁厚度和长度不同时,计算得到的微镜的最大位移量以及谐振频率

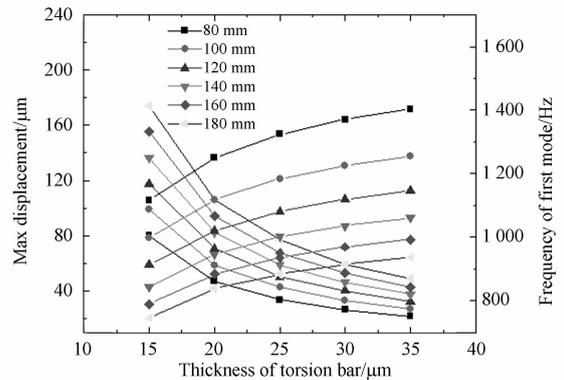


图 3 在不同的扭转梁宽度和厚度时计算得到的微镜的最大位移和谐振频率

Fig. 3 Maximum displacement and frequency in different thicknesses and lengths of torsion bars

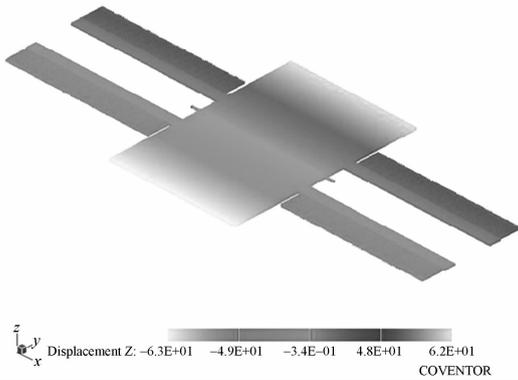


图4 微镜在90 V驱动电压下的有限元仿真结果

Fig.4 FEM simulation of scanning mirror under 90 V driving voltage

率的曲线。可见增大梁的长度、减小梁的厚度可以增大最大位移,但是谐振频率相应的也变小。因此综合考虑上述因素,梁的长度、宽度和厚度分别设计为 $150\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 。在此参数下扫描微镜的一阶谐振频率,也就是扭转谐振频率为 $1.32\ \text{kHz}$ 。根据设计的参数,借助有限元分析软件,得到了微镜在施加驱动电压时的位移情况,如图4所示。得到的最大位移为 $63\ \mu\text{m}$,此时驱动电压为 $90\ \text{V}$,对应的扭转角度为 2.4° 。

3 MOEMS 扫描微镜的工艺设计和制作

MOEMS扫描微镜的工艺设计除了要考虑微镜的结构之外还要考虑到微镜的可靠性和光学表面的质量。尤其是微镜工作在高速状态时,要求镜面不能产生大的形变,同时要求镜面的粗糙度很低,以减少光能量的损耗^[16]。因此,为了增加镜面的刚度,同时提供好的光学表面,采用体硅工艺在SOI(Silicon on Insulator)硅片上制作微镜。

制作垂直梳齿驱动的MOEMS扫描微镜的难点在于垂直梳齿的制作工艺。垂直梳齿的数量多,尺寸小,而且要制作上下两层梳齿,因此需要多次光刻和刻蚀才能完成。采用标准的体硅加工工艺时,因为需要刻蚀出光滑并且垂直的梳齿侧壁,故无法采用KOH溶液等各向异性的腐蚀方式。同时梳齿的长度长、间距小,在进入溶液时很容易发生粘附,而且这种粘附是不可逆的,因此刻

蚀梳齿时以及之后的工艺都不能再进入溶液中。

梳齿的制作工艺基本上都是在SOI硅片上做深反应离子刻蚀(DRIE)得到的。目前文献中记载的工艺主要有键合工艺、自对准工艺和多重掩模工艺。键合工艺是在两块衬底上分别制作出上梳齿和下梳齿,然后通过键合形成垂直梳齿结构。这种工艺虽然工艺过程简单,但是因为梳齿的间距小,键合时形成的对准误差非常突出,很容易引起器件的失效^[17]。而自对准工艺开始和键合工艺类似,不过上梳齿的宽度更宽,键合之后,采用宽的上梳齿作为下梳齿的掩模,从而刻蚀出垂直梳齿^[18]。自对准工艺不存在对准误差的问题,不过在最后的刻蚀时,需要在带有深槽的硅片上做涂胶和光刻,这是较为困难的,而且因为槽比较深,台阶覆盖也不好。而采用多层掩模的垂直梳齿制作工艺不但解决了对准问题,同时通过掩模的层层释放,减少了光刻的次数,也避免了深槽涂胶和光刻^[19]。本文采用双层掩模工艺在SOI硅片上制作了垂直梳齿驱动的MOEMS扫描微镜,完整的MOEMS扫描微镜的制作工艺流程如图5所示:

- (a) 准备2片顶层硅厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 的SOI硅片;
- (b) 其中一片的表面氧化 $400\ \text{nm}$ 的二氧化硅,两片SOI硅片的顶层硅键合到一起;
- (c) 采用KOH溶液把其中一侧的衬底硅全部去掉,露出埋层氧化硅;
- (d) 在露出的埋氧上光刻,采用HF溶液把镜面和可动梳齿上面的氧化硅去掉一部分,同时保留一部分;
- (e) 采用另外一张掩模版光刻后把梳齿间隙和镜面间隙中间的氧化硅全部去掉;
- (f) 采用深反应离子刻蚀(DRIE)向下刻蚀 $25\ \mu\text{m}$,直到中间的那层 $400\ \text{nm}$ 的氧化硅露出;
- (g) 采用反应离子刻蚀(RIE)把露出的 $400\ \text{nm}$ 氧化硅去掉,同时可动梳齿上的氧化硅也被去掉,而固定梳齿上保留一定厚度的氧化硅;
- (h) 接着做DRIE,刻蚀 $25\ \mu\text{m}$,此时镜面被刻蚀到下层,可动梳齿也被刻蚀到底层;
- (i) 用反应离子刻蚀(RIE)把剩余的氧化硅全部去掉;
- (j) 把一片普通硅片腐蚀出 $30\ \mu\text{m}$ 的凹坑,作为镜面的活动空间,然后和刻蚀好梳齿结构的

SOI 片键合到一起;

(k) 把 SOI 片的衬底去掉,露出埋层氧化硅;

(l) 在埋层氧化硅上光刻,做 RIE,把固定梳齿上面的氧化层去掉,而可动梳齿上的氧化硅保留;

(m) 做 DRIE 25 μm,把固定梳齿刻蚀掉一半,形成垂直梳齿结构;

(n) 做 RIE 去掉剩余的氧化硅;

(o) 采用硬掩模制作电极和镜面,硬掩模实际上是采用普通的双抛硅片通过光刻和 KOH 腐蚀制作得到的。硬掩模上被腐蚀出通孔,这些通孔对应芯片的镜面和电极。当溅射金属时,硬掩模贴在芯片的表面,芯片的镜面和电极露出被溅射上了金属,而其他位置因为硬掩模的阻挡上面没有金属。

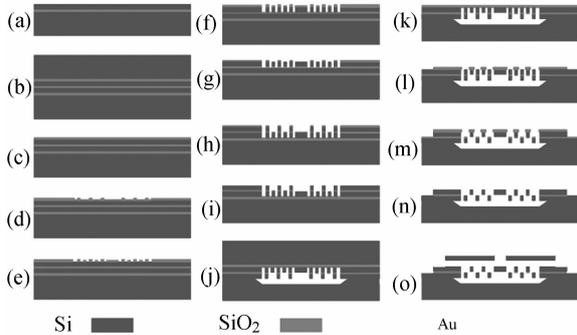
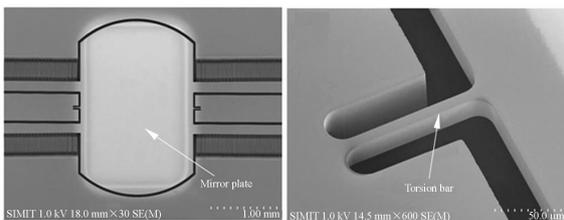


图 5 扫描微镜的制作工艺流程

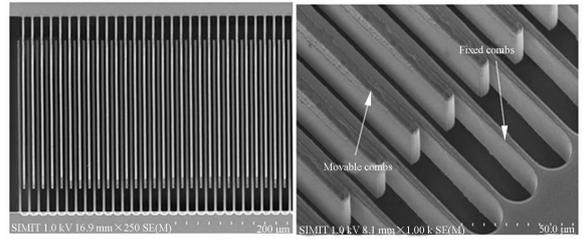
Fig. 5 Fabrication process of scanning mirror

采用上述工艺制作出的 MEMS 扫描微镜的 SEM 照片如图 6 所示,图 6(a)为微镜的整体图像,图中镜面的边缘采用了圆弧型的设计,这是因为光束一般为圆斑或者椭圆斑,因此去掉恶劣镜面边缘不使用的部分,以此来降低微镜的镜面重量。图 6(b)为扭转梁。图 6(c)垂直梳齿的俯视图,可见可动梳齿和固定梳齿之间的间隙分布非常均匀。图 6(d)为梳齿放大后的图片。



(a) 微镜的整体图
(a) Overall view

(b) 扭转梁
(b) Torsion bar



(c) 梳齿驱动器的俯视图
(c) Top view of comb driver

(d) 梳齿的局部放大图
(d) Enlarged view of combs

图 6 垂直梳齿驱动扫描微镜的 SEM 照片

Fig. 6 SEMs of scanning mirror driven by vertical comb driver

4 MOEMS 扫描微镜的性能测试

微镜的功能就是对光束的反射方向进行控制,因此光学表面的粗糙度直接影响到微镜的性能。好的光学表面具有很高的反射率,从而降低光能量的损耗。微镜表面的粗糙度采用 3D 光学干涉仪 (Veeco, WYKO) 测量。测量结果如图 7 所示,微镜的表面形貌的均方根只有 8.64 nm,完全符合高质量光学表面的要求。

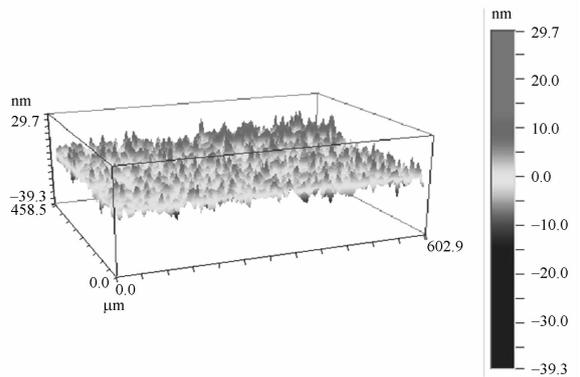


图 7 微镜表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of mirror plate

微镜的扭转角度是微镜的最主要参数,因此为了测试扫描微镜的扭转角度以及和驱动电压的关系,对微镜在不同电压下的扭转角度进行了测量。测量时采用直流电源施加驱动电压,微镜固定在 PCB 板上,微镜的镜面以及可动梳齿接地,而固定梳齿接正电位。微镜在静电力作用下产生扭转,因此主要记录微镜边缘在垂直方向的位移,根据几何关系就可以得到微镜的扭转角度。因为

微镜边缘的位移量最大也就是几十微米,而且不能采用接触式的测试方法,因此采用 3D 光学干涉仪记录微镜边缘的位移量。测量结果如图 8 所示。微镜在驱动电压为 95 V 时对应的扭转角度为 2.4° 。通过对比发现,在相同电压下,微镜实际的扭转角度要小于理论值,这是因为在制作过程中,实际得到的垂直梳齿之间的间隙比设计值要大,因此会造成静电力变小。

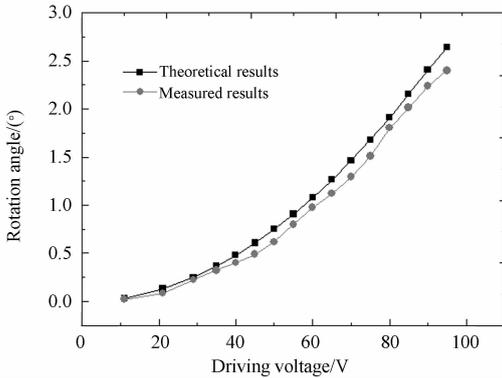


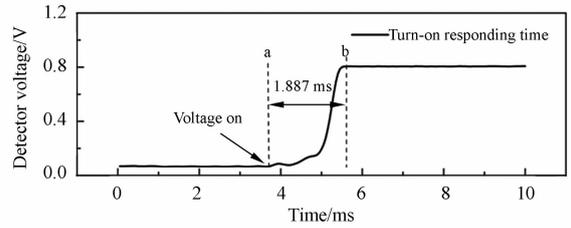
Fig. 8 扫描微镜的电压角度测试曲线和理论曲线对比图

Fig. 8 Rotation angle curves of MOEMS scanning mirror

为了测试微镜的响应速度,采用一束光垂直入射到微镜的表面,然后施加 95 V 的静电压,此时微镜转到最大角度,采用光电检测器接收反射的光束,光信号转换成电信号之后显示在示波器上。测试结果如图 9 所示。这里把微镜从初始状态施加电压转到最大角度时的时间作为微镜的开启响应时间(turn-on responding time),测试结果如图 9(a)为 1.887 ms。电压撤掉后,微镜从最大角度返回到初始状态时的时间作为关断响应时间(turn-off responding time),关断时的响应时间如图 9(b)为 4.418 ms。可见微镜的响应时间在几个 ms 量级,完全符合光束扫描的要求。关断时间大于开启时间是梳齿电容的放电时间大于充电时间所导致的。

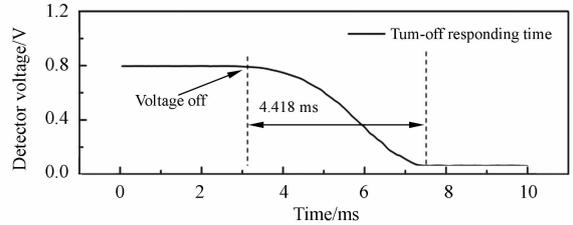
参考文献:

- [1] FERREIRA L O S, MOEHLECKE S, A silicon micromechanical galvanometric scanner [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, 73 (3): 252-260.
- [2] CHAN Y C, WONG C C, WANG C, et al.. De-



(a) 开启响应时间

(a) Turn-on responding time



(b) 关断响应时间

(b) Turn-off responding time

图 9 扫描微镜的响应时间

Fig. 9 Response time of scanning micromirror

5 结 论

采用体硅加工工艺设计并制作了一种垂直梳齿驱动的 MOEMS 扫描微镜。分析了垂直梳齿驱动的特点,详细讲述了垂直梳齿的制作工艺流程。制作出来的扫描微镜的镜面尺寸达到了 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,通过测试表明,微镜的镜面具有很好的平整度,粗糙度测试结果显示,微镜的表面形貌均方根只有 8.64 nm。微镜在驱动电压为 95 V 时可以实现最大扭转角 2.4° ,可见相对于传统的平板电容驱动,垂直梳齿驱动具有更好的驱动效率。微镜的响应时间,在开启时为 1.887 ms,关断时为 4.418 ms,完全符合 MOEMS 扫描微镜的要求。

sign and fabrication of a MEMS scanning mirror with and without comb offset [C]. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, China*, 2010:186-190.

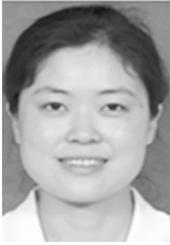
- [3] 穆参军,张飞岭,吴亚明. 新型大尺寸电磁驱动 MEMS 光学扫描镜的研制[J]. *半导体学报*, 2008,

- 29(3):583-587.
- MU C J, ZHANG F L, WU Y M. A novel large-scale electromagnetically actuated MEMS optical scanning mirror [J]. *Journal of semiconductors*, 2008, 29(3):583-587. (in Chinese)
- [4] LI K Y, MISHRA S, TIRUVEEDHULA P, *et al.*. Comparison of control algorithms for a MEMS-based adaptive optics scanning laser ophthalmoscope [C]. *Proceedings of the American Control Conference: ACC '09*, 2009:3848-3853.
- [5] LI Y W, YANG H B, YUAN G Q, *et al.*. Design and optimization of supporting structure for scanning mirror in aviation remote sensor [J]. *Proceedings of the Electric Information and Control Engineering: ICEICE*, 2011:3134-3138.
- [6] 董光焰, 刘中杰. 光学 MEMS 微镜技术及其在激光雷达中的应用[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2011, 6(1):36-38.
- DONG G Y, LIU ZH J. MOEMS microlens technique and its application on lidar [J]. *Journal of CAEIT*, 2011, 6(1):36-38. (in Chinese)
- [7] LI D C, WU W G, YUAN Y, *et al.*. Design, fabrication and characterization of novel micromirror with vertical torsion comb driver [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006, 4(2):122-127.
- [8] 肖育华, 宋朝辉, 戈肖鸿, 等. 基于硅塑性变形的蛇形梁垂直梳齿驱动器[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(3):141-144.
- XIAO Y H, SONG ZH H, GE X H, *et al.*. Serpentine elastic beam vertical comb actuator using silicon plastic deformation [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(3):141-144. (in Chinese)
- [9] CHEN CH A, CHIU Y. Flip-up micro scanning mirror with vertical comb drive assembled by simple push operations [C]. *Proceedings of the 16th International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Istanbul, Turkey: OMN*, 2011:189-190.
- [10] SHAO Y, DAVID L. DICKENSHEETS, *et al.*. 3-D MOEMS mirror for laser beam pointing and focus control [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(3):528-535.
- [11] 李四华, 刘玉菲, 高翔, 等. 微机电系统扭转微镜面驱动器的研制[J]. *半导体学报*, 2006, 27(4):756-760.
- LI S H, LIU Y F, GAO X, *et al.*. Analysis and fabrication of torsion micromirror actuators based on a MEMS technology [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(4):756-760. (in Chinese)
- [12] GREYWALL D S, PAI C S, OH S H, *et al.*. Monolithic fringe-field-activated crystalline silicon tilting-mirror devices [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(5):702-706.
- [13] 李四华, 徐静, 龙亮, 等. 多台阶平板静电驱动的高占空比微镜阵列的研制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8):1816-1823.
- LI S H, XU J, LONG L, *et al.*. Fabrication of high fill-factor micro-mirror array with multi-terraced-plate structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1816-1823. (in Chinese)
- [14] GALLAGHER E, MOUSSA W, MCDERMOTT M. A review of fabrication processes for vertical comb drives [J]. *Microsystem Technologies-Micro and Nano systems-Information Storage and Processing Systems*, 2012, 18(4):381-397.
- [15] SELVAKUMAR A, NAJAFI K. Vertical comb array microactuators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4):440-449.
- [16] LI S H, XU J, ZHONG SH L, WU Y M. Design, fabrication and characterization of a high fill-factor micromirror array for wavelength selective switch applications [J]. *Sensors and Actuators A*, 2011, 171:274-282.
- [17] MARXER C, THIO C, GRETILLAT M A, *et al.*. Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber-optic switching applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, 6(3):277-285.
- [18] JUNG I W, KRISHNAMOORTHY U, SOLGAARD O. High fill-factor two-axis gimbaled tip-tilt-piston micromirror array actuated by self-aligned vertical electrostatic comb drives [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(3):563-571.
- [19] 黄占喜, 吴亚明, 李四华. 基于多掩膜光刻工艺的 MEMS 体硅加工[J]. *功能材料与器件学报*, 2011, 17(3):315-318.
- HUANG ZH X, WU Y M, LI S H. MEMS bulk silicon process based on multi-mask photolithography [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2011, 17(3):315-318. (in Chinese)

作者简介:



刘英明(1985—),男,山东临沂人,博士研究生,2007年于青岛大学获得学士学位,主要从事光学 MEMS 方面的研究。E-mail: liuyingming@mail.sim.ac.cn



徐静(1977—),女,山东东营人,副研究员,博士,1998年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2001年于武汉大学获得硕士学位,2004年于浙江大学获得博士学位,主要从事 MEMS 光通信器件与光纤传感器的研究。E-mail: xujing@mail.sim.ac.cn



钟少龙(1974—),男,山西五寨人,高级工程师,1997年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术,高性能嵌入式系统等方面的研究。E-mail: shaolongzhong@mail.sim.ac.cn



翟雷应(1977—),男,山西大同人,博士,2002年、2006年于太原理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学 MEMS 器件设计与工艺制作的研究。E-mail: lyzhai@mail.sim.ac.cn

导师简介:



吴亚明(1966—),男,湖北孝感人,研究员,博士生导师,1986年、1989年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,1993年于中科院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光学 MEMS 技术、光通信器件、光电传感、集成光学等方面的研究。E-mail: yamingwu@mail.sim.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)