

文章编号 1004-924X(2011)08-1816-08

多台阶平板静电驱动的高占空比微镜阵列的研制

李四华^{1,2,*}, 徐静¹, 龙亮^{1,2}, 钟少龙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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为了在限定驱动电压下获得大镜面尺寸、大扭转角度的微镜阵列, 提出了一种多台阶平板静电驱动结构的微镜阵列。理论分析了多台阶平板结构与平行平板结构在静电驱动时的区别。研究了多台阶平板结构的制作工艺并采用体硅加工工艺制作了多台阶平板静电驱动的微镜阵列, 获得了微镜面尺寸达到 $600\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, 包含 52 个微镜面排布, 占空比高达 97% 的微镜阵列。测试表明, 制作的微镜面结构在驱动电压为 164 V 时可以实现最大 1.1° 的扭转角度, 相对于传统的平行平板静电驱动结构大大降低了驱动电压。

关键词:微光机电系统; 多台阶平板; 平行平板; 静电驱动; 微镜阵列; 高占空比

中图分类号: TN256; TN491 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1816

Fabrication of high fill-factor micro-mirror array with multi-terraced-plate structure

LI Si-hua^{1,2,*}, XU Jing¹, LONG Liang^{1,2}, ZHONG Shao-long¹, WU Ya-ming¹

(1. *State Key Laboratory of Transducer Technology and the Science and Technology on Microsystem Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: lisihua@mail.sim.ac.cn*

Abstract: In order to obtain a micro-mirror array with large torsional angles and large sizes under limited driving voltages, a novel micro-mirror array with a multi-terraced-plate structure was proposed and demonstrated based on the Micro-optoelectro mechanical System(MOEMS). The different characteristics of the electrostatic driver between multi-terraced-plate structure and parallel-plate structure were analyzed. The key fabrication process for the multi-terraced-plate structure was researched and a bulk micro-mechanical technology was used to fabricate a micro-mirror array with the multiterraced-plate structure. The obtained micro-mirror array containing 52 micromirrors has the size in $600\ \mu\text{m}$ by $200\ \mu\text{m}$, and a high fill-factor in excess of 97%. The test results show that the micro-mirror array achieves a maximum torsional angle about 1.1° under a driving voltage of 164 V, and the multi-terraced-plate structure greatly reduces the driving voltage as compared with the traditional parallel-plate structure.

收稿日期: 2010-08-24; 修订日期: 2011-01-11.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA03Z406, No. 2009AA03Z443); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60877066)

Key words: Micro-optoelectromechanical System (MOMES); multi-terraced-plate; parallel-plate; electrostatic driving; micro-mirror array; high fill-factor

1 引言

微镜阵列是微光机电系统 (Micro-optoelectromechanical System, MOMES) 中一类非常重要的光学器件,是尺寸在几个微米至几百微米的微镜面按一定排列组成的阵列器件。它在光信号交换^[1]、自适应光学^[2]和投影成像^[3]等领域有着极其广泛的应用。

MOEMS 光学器件多采用静电驱动的方式,这是因为相对于其它驱动方式,这种方式器件结构简单、体积小、功耗低且易于集成。静电驱动方式通常采用梳齿结构和平行平板结构。梳齿结构可以获得更大的静电力但应用于阵列器件时有工艺复杂、驱动部分占用较大芯片面积从而影响微镜阵列的占空比、阵列结构之间电隔离困难等缺点^[4-5]。而平行平板静电驱动方式^[6]主要采用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,其阵列结构更为简便,容易引线及隔离;但在平行平板驱动器结构中,理论上可控的间距最大为两个平板间距的三分之一,否则容易引起吸合效应,因此微镜面为了达到一个大的扭转角度(如 $1\sim 3^\circ$)并且为了防止微镜面与下电极产生吸合效应(Pull-in)导致微镜结构的损坏,其微镜面和平板电极之间需要一个很大的电极间距,这也导致其需要一个很高的驱动电压(如超过 200 V)。

光通信交换领域需要在限定的驱动电压(小于 200 V)下获得大镜面尺寸(几百 μm \times 几百 μm)、高占空比($>92\%$)、大扭转角度(1° 左右)的微镜阵列器件来实现光信号的动态交换。但对于 MOEMS 光学器件,采用平行平板静电驱动的大镜面尺寸器件其可控角度都较小^[7],要实现约 1° 可控角度的阵列器件十分困难。如果采用传统的平行平板静电驱动结构实现大镜面尺寸大扭转角度的阵列器件将导致驱动电压太高(大于 200 V)而无法实际应用。目前已研究的一些 MOMES 微镜阵列多采用传统的平行平板的静电驱动方

式^[8-10],其都存在镜面尺寸不够大的问题,难以满足应用的要求。

为了改善传统平行平板结构驱动电压高的缺点,采用台阶平板结构是一种很好的方法^[11-12],不过不同的台阶数对改善驱动电压的效果不同。本文分析了多台阶结构对驱动电压的改善情况,并结合工艺来确定最优化的台阶数。为了在限定驱动电压下获得大镜面尺寸、高占空比、大扭转角度的微镜阵列,提出了一种新颖的采用多台阶下电极的平板静电驱动结构制作了 MOEMS 微镜阵列。该微镜阵列利用悬臂梁的倾斜转换成微镜面的旋转角,同时实现高占空比的微镜阵列结构。采用多台阶平板结构代替传统的平行平板结构来减小驱动电压,并在镜面背面采用凸点限位点结构以及在下电极制作相应的限位平面来防止吸合效应对器件造成的损坏。理论推导并分析了多台阶平板结构与平行平板结构在静电驱动时的区别,研究了多台阶平板结构的制作工艺。利用 MOMES 体硅加工技术制作了具有多台阶平板结构的微镜阵列芯片。对微镜阵列芯片进行了测试,测试结果表明其驱动电压曲线与理论设计相符,相对于传统的平行平板结构大大降低了驱动电压。

2 多台阶平板驱动器及微镜阵列结构设计

提出的一种新颖的 MOMES 多台阶平板微镜面驱动器及其排列构成的微镜阵列结构如图 1 所示,其单个微镜面驱动器采用一个单端固支悬臂梁连接一个微镜面形成可动镜面结构并作为微镜面上电极;下电极则采用多晶硅的多台阶平板结构来实现驱动电压的大幅降低。微镜面的背面设置了限位凸点,并在下电极处设计台阶限位面,以此来防止电压过载引起的吸合效应导致微镜面结构的损坏。

多台阶平板结构由 n 个不同台阶构成,且相

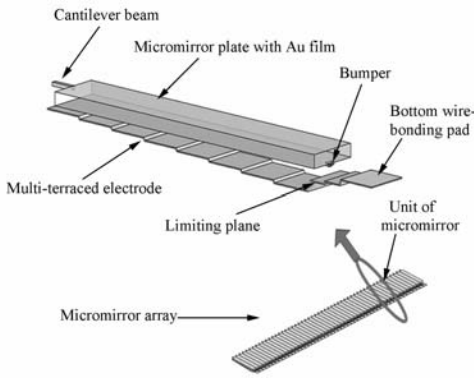
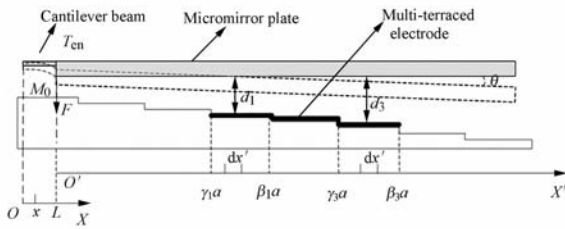
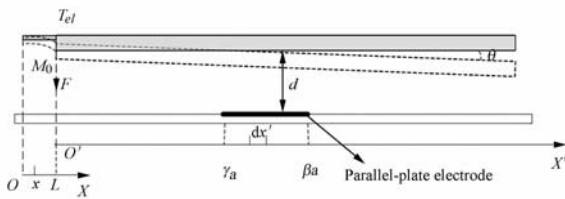


图 1 微镜阵列及单个微镜面驱动器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a micro-mirror with multi-terraced-plate structure and micro-mirror array

邻两个台阶有一定的高度差 d 。相对于传统的平行平板结构,多台阶平板结构可以大大地减少驱动电压,但可以获得和传统平行平板结构相当的扭转角度。图 2 显示了两种不同下电极结构的微镜驱动器剖面示意图。图 2(a)为多台阶平板结构微镜驱动器;图 2(b)为平行平板结构微镜驱动器。



(a) 多台阶平板结构
(a) Multi-terraced-plate structure



(b) 平行平板结构
(b) Parallel-plate structure

图 2 多台阶平板和平行平板结构的微镜驱动器模型
Fig. 2 Models of micro-mirror actuators with different structures

在以上两种结构中,由于微镜面采用体硅加工且镜面较厚,因此可以假设微镜面的弯曲可以忽略不计,则微镜面的扭转角度主要取决于矩形悬臂梁末端的弯曲形变。对于矩形悬臂梁,可以假设为一个在末端具有集中载荷的单端固支悬臂梁结构。根据计算,由于悬臂梁和微镜面的重力造成悬臂梁的变形量在 nm 量级,远远小于静电力引起悬臂梁的弯曲变形量,因此悬臂梁和微镜面的重力影响可以忽略。考虑以上的假设并参考图 2,在 $O-X$ 坐标中,悬臂梁的长、宽、高分别为 L, b, h 。假设 F 为由静电力产生并由微镜面作用在悬臂梁末端的一个集中载荷,则由集中载荷 F 对于固支端 O 处所产生的力矩 M_0 为:

$$M_0 = FL, \quad (1)$$

建立单端悬臂梁在末端有集中载荷的梁位移关系 $W(x)$ 为^[13]:

$$W(x) = \frac{2F(3L-x)x^2}{Eb h^3}. \quad (2)$$

其最大的弯曲角度(θ)在悬臂梁的末端:

$$\theta \approx W'(L) = \frac{6FL^2}{Eb h^3} = \frac{6LM_0}{Eb h^3}, \quad (3)$$

式中 E 为悬臂梁材料的杨氏模量。

对于平行平板结构,如图 2(b),在 $O'-X'$ 坐标系中,如果施加驱动电压 V 在微镜面和平板下电极之间,则对于 O' 点由静电力导致的弯矩 T_{el} 为^[14-15]:

$$T_{el} = \int_{\gamma a}^{\beta a} \frac{B\epsilon\epsilon_0 V^2 x' dx'}{2(d-\theta')^2} = \frac{B\epsilon\epsilon_0 V^2}{2\theta^2} \left[\ln\left(1 - \frac{\beta a \theta}{d}\right) - \ln\left(1 - \frac{\gamma a \theta}{d}\right) + \left(1 - \frac{\beta a \theta}{d}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{\gamma a \theta}{d}\right)^{-1} \right], \quad (4)$$

其中 B 是下电极宽度, a 为微镜面的长度(包括悬臂梁的长度), d 为微镜面和下电极之间的距离, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ 为空气的相对介电系数, θ 为微镜面的扭转角度, γ 和 β 分别是下电极的初始和端点的位置百分比。

而对于多台阶平板结构,如图 2(a),静电力引起的弯矩是各个台阶电极引起弯矩的总和。对于单个台阶电极,其产生的静电力弯矩可以看作平行平板结构产生的静电力弯矩。因此,在多台阶平板结构中由静电力产生的总弯矩 T_{en} 可写为:

$$T_{en} = \sum_{i=1}^n T_n = \sum_{i=1}^n \int_{\gamma_i^a}^{\beta_i^a} \frac{B\epsilon\epsilon_0 V^2 x' dx'}{2(d_i - \theta x')} = \frac{B\epsilon\epsilon_0 V^2}{2\theta} \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(1 - \frac{\beta_i a \theta}{d_i}\right) - \ln\left(1 - \frac{\gamma_i a \theta}{d_i}\right) + \left(1 - \frac{\beta_i a \theta}{d_i}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{\gamma_i a \theta}{d_i}\right)^{-1} \right], \quad (5)$$

其中 n 是结构中的台阶数量, γ 和 β 分别是第 i 个台阶电极的初始和终点的位置百分比, d_i 是第 i 个台阶电极与微镜面间的距离。令台阶因子 K_n 为:

$$K_n = \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(1 - \frac{\beta_i a \theta}{d_i}\right) - \ln\left(1 - \frac{\gamma_i a \theta}{d_i}\right) + \left(1 - \frac{\beta_i a \theta}{d_i}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{\gamma_i a \theta}{d_i}\right)^{-1} \right]. \quad (6)$$

对于悬臂梁结构,其集中载荷 F 在悬臂梁末端产生的力矩 M_0 即为静电力在 O' 产生的弯矩,因此对于平行平板结构和多台阶平板结构分别有如下关系:

$$T_{e1} = M_0, \quad (7)$$

$$T_{en} = M_0. \quad (8)$$

对于任意 n 个台阶平板静电驱动的微镜驱动器,其驱动电压(V_n)和微镜面扭转角度(θ)之间的关系可写为:

$$V_n = \sqrt{\frac{Ebh^3\theta^3}{3LB\epsilon\epsilon_0 K_n}}. \quad (9)$$

从公式(9)可以看出,驱动电压的大小和悬臂梁的尺寸有关,而且和台阶因子 K_n 也相关。由于微镜阵列的使用需要与匹配的光学系统相一致,因此每个微镜面的宽度有一些细微的差别。本文设计的微镜阵列,其微镜面宽度平均值为 $200 \mu\text{m}$,同时微镜面的长度均为 $600 \mu\text{m}$ 。

采用 Coventorware 软件模拟了多台阶平板静电驱动的微镜面结构,在满足限定驱动电压和大镜面尺寸、大扭转角度的情况下,最终优化了结构参数,获得悬臂梁长、宽、高分别为 $70 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $6.5 \mu\text{m}$,多台阶下电极的宽度为 $180 \mu\text{m}$ 。

利用以上的参数,使用公式(9)计算了平行平板,4 台阶、8 台阶和 16 台阶平板结构的电压角度曲线,同时利用 Coventorware 软件模拟了 8 台阶

平板结构的电压角度关系,其计算曲线如图 3 所示。从图中可以看到,采用多台阶平板结构可以在限定驱动电压下获得大镜面尺寸大扭转角度的微镜面驱动器。图 4 为在扭转角为 1° 时,驱动电压随台阶数的变化曲线。可以看出,相对于平行平板结构,采用多台阶平板结构可以大大降低驱动电压。考虑到工艺复杂度和驱动电压的变化率,采用 3 次光刻制作 8 台阶平板结构是最为优化的选择。

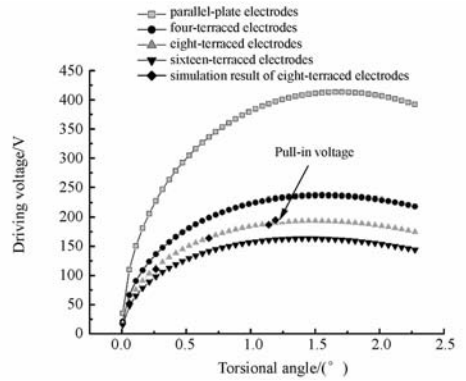


图 3 不同多台阶平板结构的计算电压角度曲线

Fig. 3 Relation between driving voltage and torsional angle with different multi-terraced-plate structures

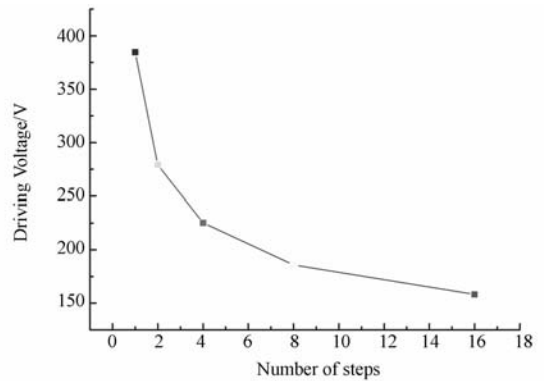


图 4 驱动电压随台阶数的变化曲线

Fig. 4 Driving voltage curve with number of steps under 1° tilted

3 多台阶平板驱动器工艺

多台阶电极结构是微镜阵列的重要组成部分,多台阶结构制作也是微镜阵列制造的关键工艺。由于多台阶结构每个台阶深度不同,不能一

次腐蚀获得,因此需要三次相互套准光刻后腐蚀得到。但在进行第二,第三次的套准光刻时,已经存在 $0\sim 30\ \mu\text{m}$ 不同深度的台阶,且图形线条为细长结构,这时采用通常的薄胶和厚胶工艺,很难在保证线条宽度的同时又保证各个不同深度的台阶上光刻胶去除干净。因此,多台阶平板驱动器工艺需要解决深台阶的套刻工艺问题,并与后续的工艺兼容。经过大量的工艺试验对比后,本文采用 EVG 喷胶设备进行喷胶完成深台阶光刻来获得不同台阶深度上的光刻线条。另外,喷胶作为二氧化硅腐蚀的掩模材料时,在多次重合的台阶边缘容易导致二氧化硅钻蚀,使得最后采用 KOH 腐蚀形成的台阶结构边缘产生突起的残硅,如图 5(a1)所示。为了减少残硅对下电极结构的影响,本文采用对硅片进行氧化后去除二氧化硅层的氧化抛光工艺处理来减少残硅的高度及密度,如图 5(b1)所示。图 5(a2)是采用台阶仪对多台阶结构进行的表面形貌测试。图 5(b2)显示经过氧化抛光后对多台阶结构进行的表面形貌测试,测试结果表明残硅密度明显减少,同时高度降低,可以满足器件要求。图 6 为最后制作出的多台阶结构 SEM 图。

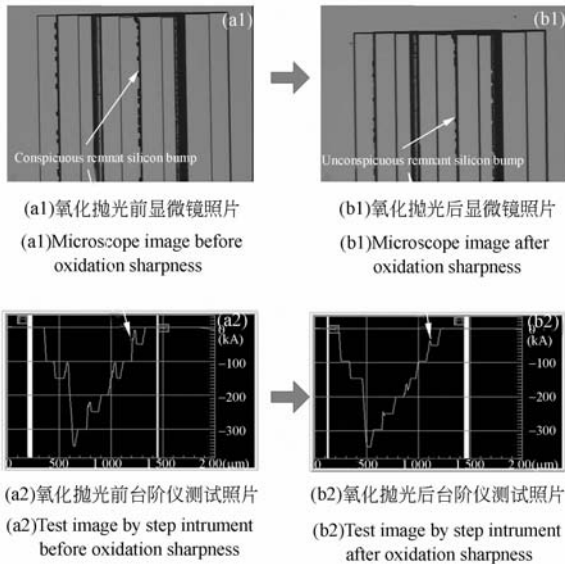


图 5 多台阶结构氧化抛光前后的对比

Fig. 5 Contrast images of multi-terraced structure before and after oxidation sharpness

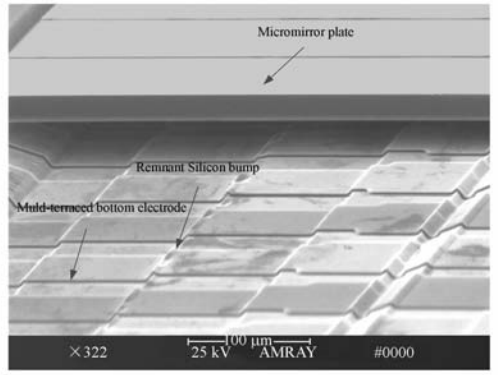


图 6 制作出的多台阶平板结构 SEM 照片

Fig. 6 SEM image of fabricated multi-terraced-plate structure

4 多台阶平板驱动微镜阵列工艺

采用硅-硅键合的体硅微加工技术制作了微镜阵列。在工艺设计中采用一片 SOI 硅片的器件层作为微镜面及器件的上电极,另一片硅片制作多台阶平板结构和限位平面,其基本的工艺制作流程图如图 7 所示。

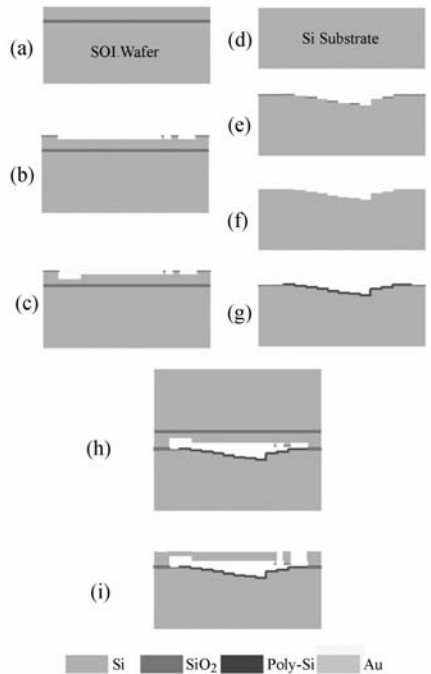


图 7 微镜阵列制作工艺流程图示意图

Fig. 7 Cross-sectional view of fabrication process flow

其工艺步骤设计说明如下:

(a)为 SOI 硅片;

(b)对 SOI 硅片进行氧化后光刻,利用 KOH 腐蚀溶液腐蚀出微镜面空腔及限位凸点位置;

(c)再次对 SOI 硅片氧化并光刻,利用 KOH 溶液腐蚀出微悬臂梁背面位置并保留限位凸点上的氧化层作为绝缘层保护层;

(d)制作多台阶结构硅片;

(e)经过三次重复的硅片氧化后光刻并利用 KOH 溶液腐蚀获得具有不同台阶深度的 8 台阶平板结构;

(f)对 8 台阶平板结构进行氧化抛光;

(g)在多台阶结构硅片上氧化 2 μm 将其作为绝缘层,并在二氧化硅绝缘层上沉积多晶硅薄膜并图形化电极结构,获得多台阶平板结构;

(h)将 SOI 硅片和多台阶结构硅片进行硅-硅键合;

(i)去除键合片中 SOI 硅片的衬底层及埋层氧化硅层,溅射金薄膜并图形化金反射面和电极引线区,利用深刻蚀(DRIE)工艺将微镜阵列进行结构释放获得微镜阵列芯片。

图 8 为制作出的微镜阵列 SEM 照片,其微镜的占空比达到 97%。

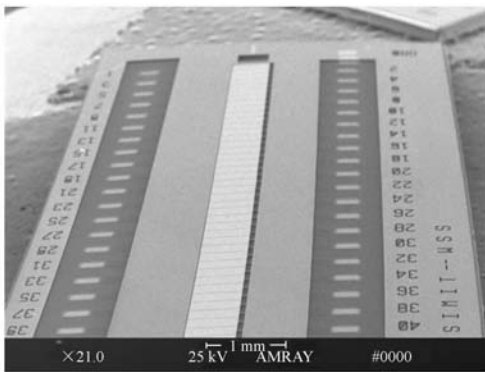


图 8 制作的微镜阵列 SEM 照片

Fig. 8 SEM image of fabricated micro-mirror array

5 微镜阵列测试

由于微镜阵列中每个微镜面需要单独电压控制,因此制作了电路转换装置并施加驱动电压对微镜面的扭转角度进行了测试。其测试原理图如图 9 所示,将微镜阵列固定在小 PCB 基座板上,通过排线将微镜阵列的电压输入端引线到大的 PCB 电压控制基板上,其便于操作且不影响微镜面运动。当对某个微镜施加一定的驱动电压后,

采用 Veeco 公司的三维扫描轮廓仪(WYKO)对该微镜面进行扫描,通过计算微镜面的倾斜位移获得微镜面的扭转角度。

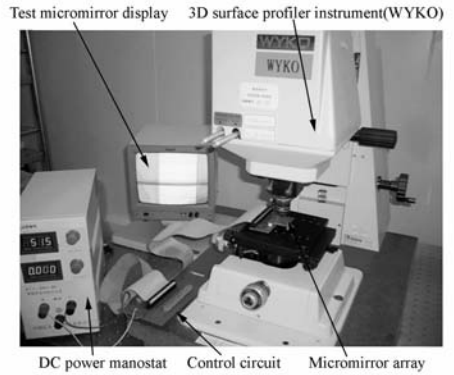


图 9 微镜阵列测试原理图

Fig. 9 Schematic diagram of test for micro-mirror array

图 10 显示了 WYKO 轮廓仪对微镜面角度变化的测试图。在图 10(a)中显示了微镜阵列中某个微镜面在施加驱动电压时发生了角度变化,同时在图 10(b)中显示了微镜面在驱动电压下的倾斜角度变化,同时也可以看出微镜面的角度变化主要由悬臂梁的末端变形产生,与理论的假设相符。

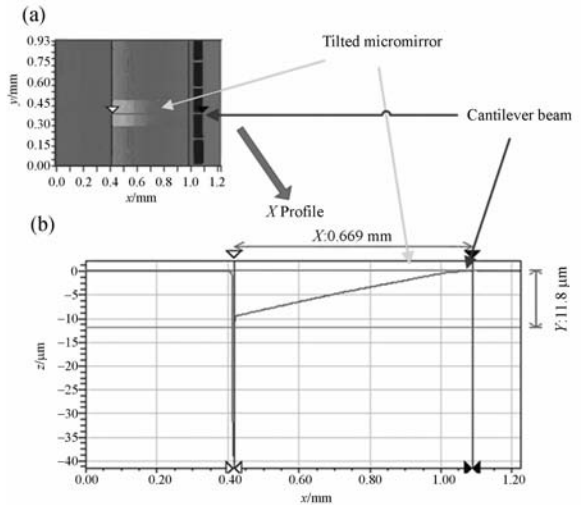


图 10 WYKO 测试结果示意图

Fig. 10 Test images by WYKO instrument

图 11 显示了微镜面随施加驱动电压后的角度变化曲线。从图中可以看出,测试结果与模拟结果基本吻合,由于工艺制造过程中的不完美性,使得测试结果和模拟结果有轻微的偏差。对微镜施加了 185 V 的过载电压使得微镜产生吸合,在

电压释放到 135 V 时,器件恢复正常工作。该结果表明限位凸点的设计达到了预期效果并提高了器件的可靠性。

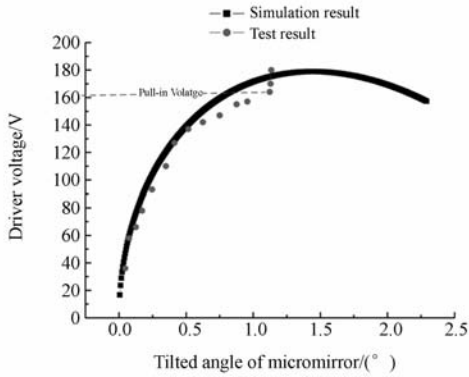


图 11 微镜面电压角度测试曲线和理论曲线对比图

Fig. 11 Static deflection characteristics of micromirror

6 结 论

本文提出了一种多台阶平板静电驱动的微镜阵列,理论推导了多台阶平板结构和传统的平行平板结构在静电驱动时的电压角度变化曲线。研究了多台阶平板结构的工艺制作,并利用硅-硅键合的体硅微机械加工技术制作了具有多台阶平板结构的微镜阵列,获得了微镜面尺寸达 $600\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$,包含 52 个微镜面排布,占空比高达 97% 的微镜阵列。通过测试表明,制作的微镜面驱动器在驱动电压为 164 V 时可以实现最大 1.1° 的扭转角,相对于传统的平行平板静电驱动结构大大降低了驱动电压。制作出的微镜阵列可应用于智能光网络中的波长选择开关中,用于实现光信号的动态调谐。

参考文献:

- [1] 胡强高,刘德明,张灼,等.一种基于微机电系统技术的新型波长选择开关[J].光学学报,2010,30(4):1168-1172.
HU Q G, LIU D M, ZHANG D, *et al.*. A novel wavelength selective switch using micro-electro-mechanical systems technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(4):1168-1172. (in Chinese)
- [2] JUNG W, PETER Y A, CARR E, *et al.*. Single-crystal-silicon continuous membrane deformable mirror array for adaptive optics in space-based telescopes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007,13(2):162-167.
- [3] 王小磊,刘向东,张懿,等.基于微镜阵列器件的反射式空间光调制器[J].浙江大学学报,2008,42(10):1735-1738.
WANG X L, LIU X D, ZHANG Y, *et al.*. Reflex spatial light modulator based on micromirror array device [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008, 42(10):1735-1738. (in Chinese)
- [4] KIM M, PARK J H, JEON J A, *et al.*. High fill-factor micromirror array using a self-aligned vertical comb drive actuator with two rotational axes [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2009, 19:035014.
- [5] WU M C, LIN H Y, FANG W. Design of novel sequential engagement vertical comb electrodes for analog micromirror [J]. *IEEE Photonics Technol-*
ogy Letters, 2007,19(20):1586-1588.
- [6] 张昱,潘武.折叠弹簧式 MEMS 水平扭转微镜的设计与分析[J].光学精密工程,2005,13(supp):81-85.
ZHANG Y, PAN WU. Design and analysis of a MEMS horizontal torsion micro mirror with folded springs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp):81-85. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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.
- [9] WILLIAM P T, JOHN D B, AMY B O, *et al.*. A high fill factor linear mirror array for a wavelength selective switch [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2004,14:147-152
- [10] YAMASHITA S, MITA M, FUJITA H, *et al.*. Optical beam shaping by spatial light phase modulator with bidirectional tilt-piston micro-mirror array [C]. *OSA/CLEO/QELS 2008*:1-2.
- [11] SAWADA R, YAMAGUCHI J, HIGURASHI E,

et al.. Single Si crystal 1024ch MEMS mirror based on terraced electrodes and a high-aspect ratio torsion spring for 3-D cross-connect switch [C]. *Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Optical MEMS, Lugano, Switzerland, 2002*;11 - 12.

[12] TSAI J, WU M C. Gimbal-Less MEMS two-axis optical scanner array with high fill-factor [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005,14(6):1323-1328.

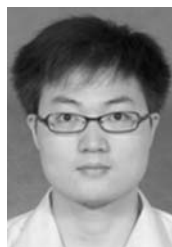
[13] BAO M H. *Analysis and Design Principles of*

MEMS Devices [M]. Elsevier, 2005.

[14] DEGANI O, SOCHER E, LIPSON A, *et al.*. Pull-In study of an electrostatic torsion microactuator [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998,7(4):373-379.

[15] ZHANG X M, CHAU F S, QUAN C, *et al.*. A study of the static characteristics of a torsional micromirror [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001,90: 73-81.

作者简介:



李四华(1979—),男,江西新余人,博士,助理研究员,2001年于上海大学获学士学位,2006-2011年于中科院上海微系统与信息技术研究所获得博士学位,主要从事光学 MEMS 器件设计与工艺制作的研究。E-mail: lisihua@mail.sim.ac.cn



徐 静(1977—),女,四川江油人,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



龙 亮(1987—),男,贵州黔西人,博士研究生,2008年于华东师范大学获得学士学位,主要从事基于 MEMS 技术的磁传感器的研究。E-mail: longliangsimit@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

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