

# 一种新型谐振式微机电系统扫描镜及其 利萨如图形显示

燕 斌 苑伟政 乔大勇 刘耀波

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 研制了一种基于微光机电系统(MOEMS)技术的新型谐振式扫描镜,该扫描镜采用绝缘体上硅(SOI)加工工艺,静电梳齿驱动,利用工艺中残余应力的释放产生垂直梳齿偏差,作为启动电极。针对该器件的机电性能,设计并搭建了一套光学系统测试其性能。结果表明,该器件具有加工工艺简单、低成本、低电压和大的扫描角度等优点。此外,将所制造的两个扫描镜进行合理组合,搭建了利萨如图形的显示装置,显示图案与 Matlab 软件仿真结果基本一致。

**关键词** 集成光学;微光机电系统;扫描镜;绝缘体上硅;利萨如图形;激光投影

**中图分类号** TN303 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0523003

## Novel Resonant Micro-Opto-Electro-Mechanical Scanning Mirror and Lissajous Pattern Display

Yan Bin Yuan Weizheng Qiao Dayong Liu Yaobo

(Micro-Electro-Mechanical/Nano-Electro-Mechanical Laboratory, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** Based on the micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS) technology, a new resonant micro scanning mirror is designed and fabricated. It is actuated by electrostatic combs fingers. Base on the employed silicon-on-insulator (SOI) technology the residual stress during the process is used to create vertical offset in comb structures, which is regard as starting electrode. In order to realize their electromechanical characterizations, an optical experimental equipment is established. The results show that the device has advantages such as simple fabrication process, low driving voltage, and large scanning angle. In addition, two one-dimensional micro scanning mirrors are reasonably combined to make many different Lissajous scanning patterns, which agree very well with Matlab simulations.

**Key words** integrated optics; micro-opto-electro-mechanical system; micro scanning mirror; silicon-on-insulator; Lissajous pattern; laser projection

**OCIS codes** 230.3990; 230.4040

## 1 引 言

光学扫描镜是光学应用系统重要的核心器件,可将一束光导向不同方向,并且能探测到反射后的光,显示光束“探测到”目标。传统的光学扫描器件,通常以检流计为基础<sup>[1]</sup>,利用散装光学元件设计,其

体积大、价格高等缺点大大地限制了应用。随着微机电(MEMS)技术的发展,特别是微光机电(MOEMS)技术发展,MOEMS光器件低成本、高可靠性、小型化和重量轻等特点越来越突出,并且实现了由静到动的飞跃<sup>[2~5]</sup>。MEMS扫描镜的应用领

收稿日期: 2011-11-17; 收到修改稿日期: 2011-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(50805123)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0075)资助课题。

作者简介: 燕 斌(1979—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统和微机电系统微加工工艺方面的研究。

E-mail: ybnwpu@163.com.cn

导师简介: 苑伟政(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事微/纳机电系统、精密制造技术和微机电系统等方面的研究。

E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn

域得到了扩展,包括激光成像、工厂信息化、信息管理、印刷、形象艺术、图像数字化、质量检测、条码识别、数据存储、精密图像产生、显示、监控和医学成像等领域<sup>[6]</sup>。MEMS 扫描镜最先由 Peterson<sup>[7]</sup> 在 20 世纪 80 年代初报道,采用单晶硅湿法腐蚀技术,制作出镜面结构,并与溅射有金属电极的玻璃相键合,制作出双下电极静电驱动的微扫描镜。随着 1988 年 TI 公司第一款数字微镜器件(DMD)产品的推出,及其后来在投影显示等市场上获得成功<sup>[8]</sup>, MEMS 扫描镜更加显示出其广阔的应用前景和巨大的市场潜力,因此逐渐成为国内外研究的热点。

相对于压电驱动<sup>[9]</sup>、磁驱动<sup>[10]</sup>和热驱动<sup>[11]</sup>等驱动方式,静电力驱动以其响应速度快、能耗低的特点成为微扫描镜驱动方式的首选。2000 年,Zhang 等<sup>[12]</sup>利用平行平板驱动微扫描镜,该器件在 18 V 直流电压下,达到下拉前的最大转角为 2.3°。尽管工作原理及驱动简单,但由于产生“PULL-IN”现象,限制其大的扫描角度。近年来,垂直梳齿驱动器的静电驱动成为国内外的研究热点。2002 年, Lee 等<sup>[13]</sup>利用键合工艺制作 MEMS 扫描镜,在 15 V 交流电压下,机械扫描角度仅为 2.3°。2005 年, Lin 等<sup>[14]</sup>采用自对准技术,使用绝缘体上硅(SOI)多层掩膜较为复杂的制作工艺。因此,垂直梳齿静电驱动研究的重点集中在了如何降低工艺流程的复杂性

以及提高致动效率等方面。

本文研制了一种新型谐振式 MEMS 扫描镜,该扫描镜采用 SOI 工艺,静电力驱动,利用工艺中产生的残余应力制造出垂直偏差,具有工艺简单、成本低、电压低和扫描角度大等特点。为了对其器件进行性能测试,设计及搭建了一套光学测试系统。此外,利用所制造的两个扫描镜,设计及搭建了利萨如图形的显示装置。

## 2 工作原理

MEMS 扫描镜的工作原理及结构简图如图 1 所示,可动梳齿分布于镜面两侧,镜面两端的扭转梁与镜面锚点连接;固定梳齿连接于静梳齿锚点。在理想的条件下,当对固定梳齿(pad 1)和可动梳齿(pad 2)施加激励信号时,这种共平面的梳齿驱动器是无法产生扭转力矩从而驱动镜面转动的。然而在器件的实际加工过程中,由于应力的释放等因素,导致两端的动梳齿和静梳齿并非完全对称和共平面,产生有微小的垂直梳齿偏差,即在初始的状态下形成一定的扭转状态,如图 1 的局部放大图所示。在外部交流激励信号作用下,静动梳齿的微小垂直偏差足以产生令镜面“起振”的力矩。正是由于所设计扫描镜的结构特点,该扫描镜只能以动态谐振方式扫描,无法以静态连续偏转方式扫描。

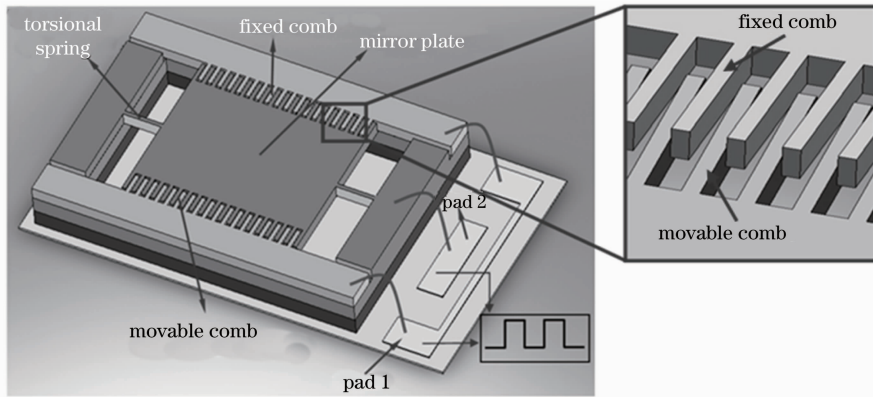


图 1 MEMS 扫描镜的工作原理及结构简图

Fig. 1 Operation principle and structure diagram of MEMS scanning mirror

该微扭转镜的驱动信号可以是正弦波、方波和锯齿波等。以方波激励为例,如图 2 所示,激励信号为方波,随着时间变化的正弦曲线是镜面扭转角度变化。在镜面向正向最大角度运动时,方波信号电压为 0,没有静电力矩作用;镜面达到正向最大偏转角度位置后,方波信号跳跃到峰值电压,在静电力矩作用下,镜面朝着平衡位置加速运动;在经过平衡位

置瞬间,方波信号电压降为 0,镜面依靠自身惯性继续向反向最大角度运动,当镜面达到反向最大偏转角度时,方波信号再次跳跃到峰值电压。如此循环驱动镜面往复转动。由图 2 可见,激励信号的频率是镜面机械振动频率的两倍。在机械振动学中,这样的振动被称为参数激励振动。

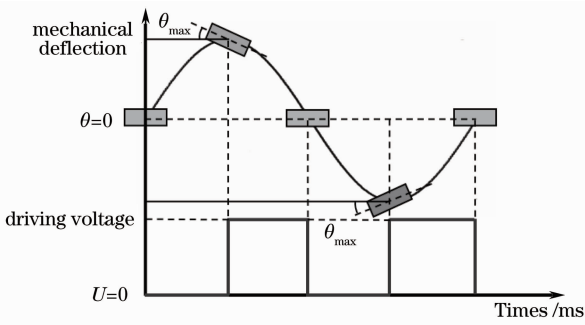


图 2 方波信号驱动 MEMS 扫描镜扫描示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of MEMS scanning mirror oscillation with square-wave signal

### 3 设计及加工

由于 SOI 有工艺简单,操作方便等诸多优点,目前在国内外被广泛应用于 MEMS 器件制作,国际上已出现标准化的 SOI 工艺规范和代工服务。因此,采用 SOI 加工工艺制备 MEMS 扫描镜。图 3 给出了 MEMS 扫描镜基于 SOI 工艺的流程示意图。图 3 中为所有工艺均在 SOI 硅片上完成,基底硅、氧化埋层(BOX)氧化硅和器件层硅的厚度分别为 400、5、30  $\mu\text{m}$ ,两硅层均为 p 型掺杂,电阻率为 0.01~0.02  $\Omega\cdot\text{cm}$ ;图 3(b)为基底硅上均匀淀积一层 Al 膜;图 3(c)为对 Al 膜图形化,作为深硅刻蚀掩模层;图 3(d)为对基底硅层进行干法深硅刻蚀,使其得到足够运动空间;图 3(e)为去除基底硅上的 Al 膜,并且在器件层的硅上均匀淀积一层 Al 膜;图 3(f)为对 Al 膜图形化,作为光学镜面的反射层;图 3(g)为采用深硅干法刻蚀工艺,在器件层硅上同时刻蚀出扫描镜结构和锚点;图 3(h)为 HF 腐蚀 BOX 层氧化硅,使扫描镜结构得以释放。表 1 给出了基于 SOI 工艺制造的 MEMS 扫描镜的器件参

数。图 4 和图 5 分别给出了制作得到的 MEMS 扫描镜(SEM)图和封装后的器件。

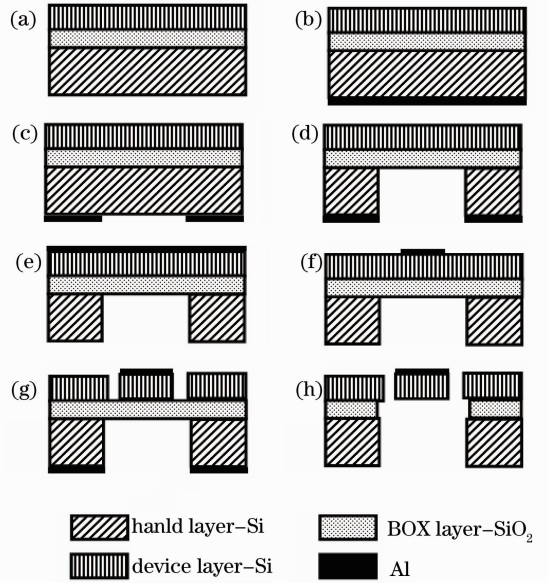


图 3 MEMS 扫描镜基于 SOI 工艺流程图  
Fig. 3 Schematic diagram of SOI process for fabricating the MEMS scanning mirror

表 1 MEMS 扫描镜器件的主要结构参数  
Table 1 Main structural parameters for the MEMS scanning mirror

Parameters	Value / $\mu\text{m}$
Thickness of mirror	30
Thickness of anchor	30
Length of beam	400
Width of beam	10
Length of comb drive	90
Width of comb drive	5
Gap of comb drive	5
Overlap length of comb drive	80

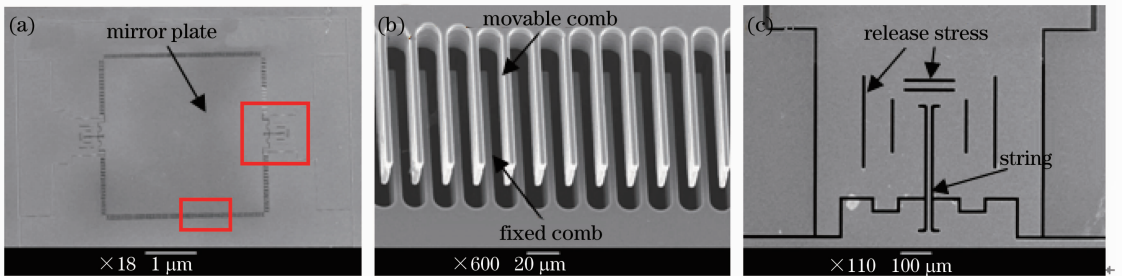


图 4 制作的 MEMS 扫描镜 SEM 图。(a)整体结构;(b)梳齿结构局部放大图;(c)扭转梁局部放大图  
Fig. 4 SEM pictures for the fabricated micro scanning mirror. (a) Whole structure; (b) locally enlarged view of the combs fingers; (b) locally enlarged view of the supporting beams

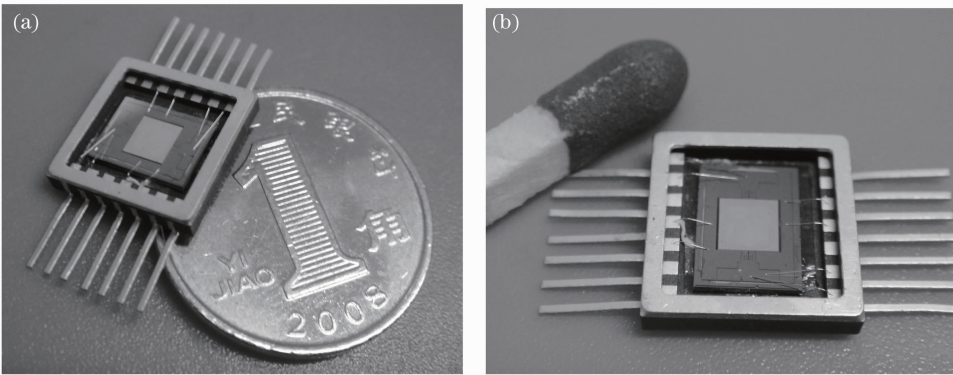


图 5 封装后的 MEMS 扫描镜  
Fig. 5 Packaged micro scanning mirrors

## 4 性能测试

### 4.1 实验装置

MEMS 扫描镜扫描角度的测量原理图如图 6 所示,测量原理采用激光三角法<sup>[15]</sup>。该方法利用一束激光照射到所制备的 MEMS 扫描镜上,当扫描镜处于静止时,经过反射后形成一个激光光斑。当对 MEMS 扫描镜施加一定频率的交流电压信号时,由于 MEMS 扫描镜处于谐振运动状态,则激光光斑变成一条扫描光线。若扫描镜到接受屏距离为  $S$ ,扫描线的长度为  $L$ ,扫描线的顶端到基准点的距离为  $H$ ,则扫描角度可表示为

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \left( \arctan \frac{H}{S} - \arctan \frac{H-L}{S} \right), \quad (1)$$

图 7 给出了实际的测量装置图。

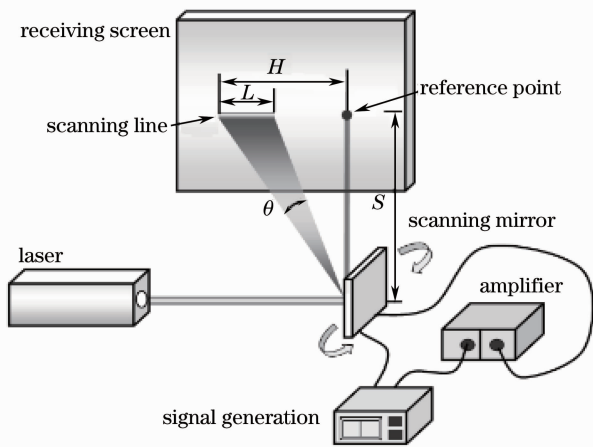


图 6 MEMS 扫描镜的扫描角度的测量原理  
Fig. 6 Design schematic for measuring the scanning angle of micro scanning mirror

### 4.2 电压转角测试

图 8 给出在频率为 557 Hz 时,不同波形电压下的电压—转角的测量结果图。从图中可以看出,随

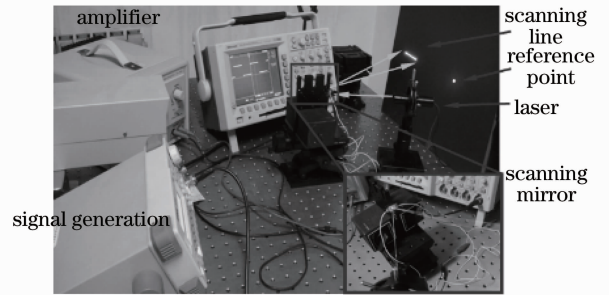


图 7 扫描镜的扫描角度的实验装置  
Fig. 7 Experimental setup for measuring the scanning angle of micro scanning mirror

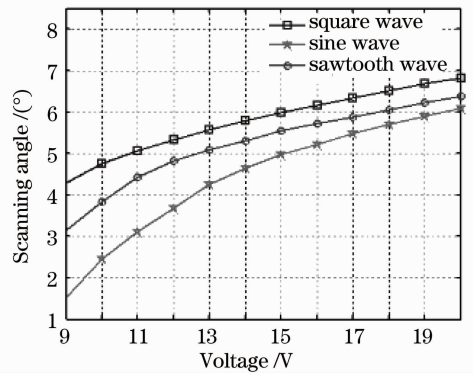


图 8 电压—转角测量结果图  
Fig. 8 Measurement results for scanning angle versus driving voltage

着电压增大,扫描镜的转角也逐渐增大。此外,容易看出,方波激励信号效率最高且电压与转角呈近似线性的关系,正弦激励信号次之,锯齿波效率最低。在电压为 20 V 方波时,扫描镜的机械扫描角度可达到 6.8°,光学扫描角度可达到 13.6°。

### 4.3 频率响应测试

在一定的驱动电压下,分别从两个不同方向改变激励信号的频率,利用 4.1 节的扫描角度测试的

实验装置,记录不同频率下扫描镜扫描角度的大小。所研制的 MEMS 扫描镜的频率响应测试曲线如图 9 所示。从图中可以看出,当激励信号频率由高到低加载时,在激励频率达到 730 Hz 附近时,扫描镜开始起振;随着激励频率的降低,扫描镜的扫描角度逐渐增大;当激励频率达到  $f_1 = 556$  Hz 时,扫描镜的扫描角度达到峰值;进一步降低扫描频率时扫描镜突然停止运动且一直保持静止状态。相反,激励信号频率由低到高加载时,在激励频率达到  $f_2 = 597$  Hz 时,扫描镜被激励启动;若进一步增加激励频率,则扫描镜的扫描角度会逐步减小,直至激励频率达到 730 Hz 左右时,扫描镜停止运动且与频率由高到低加载方向的扫描角度的大小基本一致。这种频率响应特性的现象被称为参数激励系统的迟滞特性,存在于许多 MEMS 谐振器中<sup>[16]</sup>。对于典型的参激系统,通常从高频到低频的跳跃频率为器件谐振频率  $f_r$  的 2 倍<sup>[17]</sup>,也就是研制的 MEMS 扫描镜

谐振频率在 278 Hz 附近。

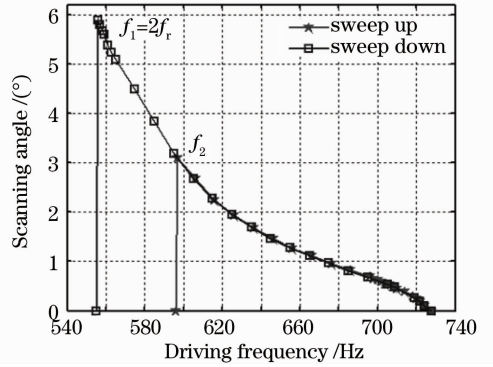


图 9 MEMS 扫描镜的迟滞频率响应曲线  
Fig. 9 Hysteretic frequency response curve of micro scanning mirror

## 5 利萨如图形显示

利萨如图形的运动方程为

$$\begin{cases} x(t) = l \tan \theta_x = l \tan \{ \theta_{x\max} \sin [2\pi f_x (t - \psi_x)] \} \approx x_{\max} \sin [2\pi f_x (t - \psi_x)] \\ y(t) = l \tan \theta_y = l \tan \{ \theta_{y\max} \sin [2\pi f_y (t - \psi_y)] \} \approx y_{\max} \sin [2\pi f_y (t - \psi_y)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $l$  表示扫描距离;  $\theta_x, \theta_y$  代表  $x, y$  方向的扫描角度;  $\theta_{x\max}, \theta_{y\max}$  代表  $x, y$  方向的最大扫描角度;  $f_x, f_y$  代表  $x, y$  方向的扫描频率;  $x_{\max}, y_{\max}$  代表  $x, y$  方向的最大扫描振幅;  $\psi_x, \psi_y$  代表  $x, y$  方向的相位。任意时刻的扫描位置都可以从运动方程中得到。

### 5.1 实验装置

图 10 为利萨如图案的激光投影显示系统的总

体设计。DSP 通过数字/模拟(D/A)电路产生两路方波激励信号,分别用于驱动两个 MEMS 扫描镜( $x$  轴和  $y$  轴),其产生的信号可调节频率和相位。激光先后经过 2 个振动的扫描镜,可形成简单的不同的利萨如图形。图 11 为利萨如图案显示的实验装置图。实验装置中,系统选用 TI 公司的定点数字信号处理(DSP)芯片 TMS320F2812 为信号传输

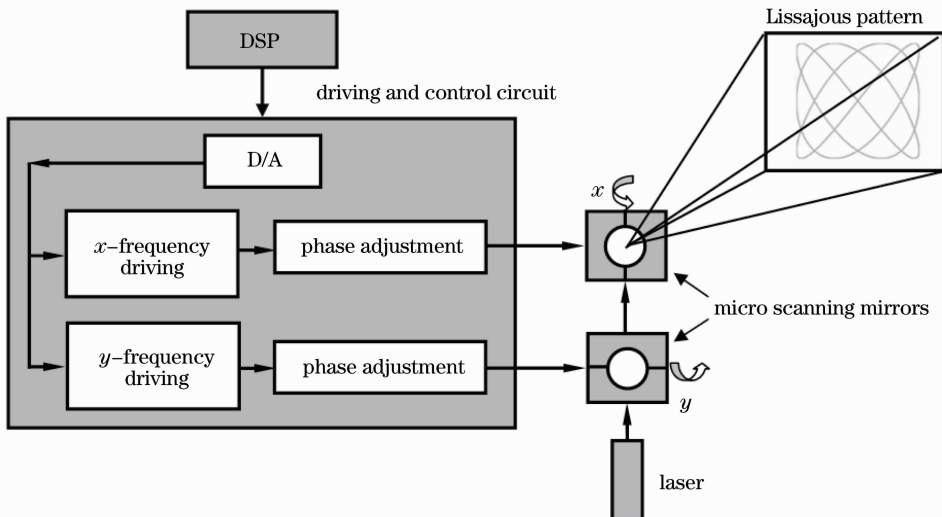


图 10 利萨如图案的激光投影显示系统总体设计

Fig. 10 System design of Lissajous pattern generation for laser projection display

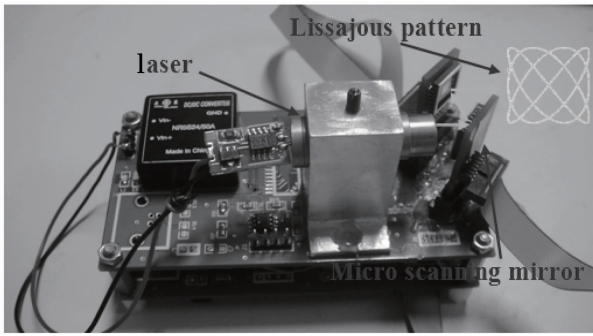


图 11 利萨如图形显示的实验装置

Fig. 11 Experimental setup for Lissajous pattern display and processing. The core chip, D/A conversion chip, uses DAC7724. This chip is a parallel four-channel high-speed voltage output number/

模转换器,具有 12 bit 的分辨率,每个通道的转换时间约为  $10 \mu\text{s}$ ,输出电压范围为  $-15 \sim +15 \text{ V}$ ,完全可以满足本系统的要求。

### 5.2 Matlab 仿真及实验对比

利用 Matlab 对不同情况下利萨如图形进行仿真,并与实际形成的图案进行对比。图 12 为同频率同相位,同频率相位差  $\pi/4$ ,不同频率比同相位的利萨如图形。测试结果表明,实际测试图案与仿真图案基本一致。在适当的频率比下,一个周期的利萨如图形可以遍历屏幕上的大量点,即可得到高密度、稳定的利萨如图形,可应用于激光投影显示<sup>[18]</sup>。

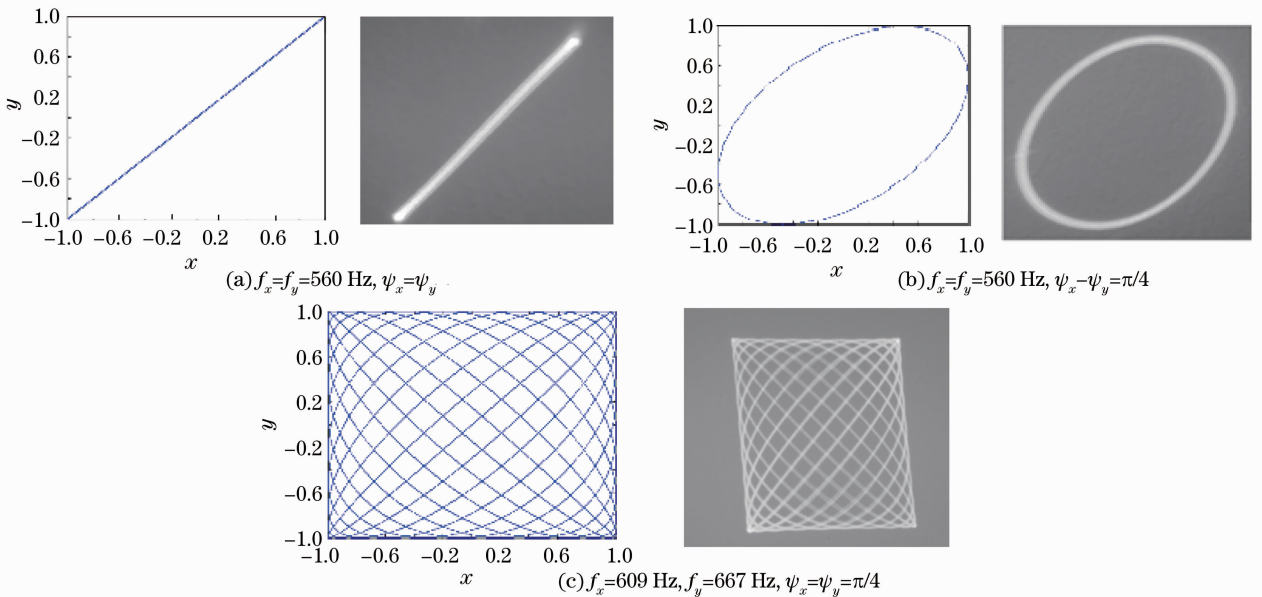


图 12 Matlab 仿真与实际利萨如图案的对比结果

Fig. 12 Comparison between Matlab simulation and Lissajous pattern

## 6 结 论

介绍了一种基于 MOEMS 技术的新型谐振式扫描镜的工作原理、结构设计及其加工工艺,设计并搭建了一套光学系统对其进行电压-转角,频率响应等性能测试。测试结果表明,该器件具有制作工艺简单,电压低和扫描角度大等优点。同时基于所研制的 MEMS 扫描镜器件,搭建了一套利萨如图案的扫描系统。测试结果表明,Matlab 仿真的图案与测试图案一致。因此,该装置可用于利萨如图案的显示。

### 参 考 文 献

1 M. E. Motamedi, Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Micro-Opto-

Mechanical Systems[M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2010. 291  
 莫塔麦迪, 周海宪, 程云芳. 微光机电系统[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2010. 291  
 2 Yuan Ye, Zou Yongzhuo, Bao Junfeng *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system (MEMS) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 364~368  
 袁 野, 邹勇卓, 鲍俊峰等. 一种新型微机电系统可调光衰减器 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 364~368  
 3 Yan Bin, Yuan Weizheng, Yu Yiting *et al.*. Fabrication and experimental investigation of diffraction characteristics for a pitch tunable grating based on SOG process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3128~3132  
 燕 斌, 苑伟政, 虞益挺等. 一种新型 SOG 周期可调光栅的制作及其衍射性能测试 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3128~3132  
 4 Zhang Jie, Huang Shanglian, Zhang Zhihai *et al.*. Experiments and structural optimization of micro-electro-mechanical system-based grating moving light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1565~1569

- 张 洁, 黄尚廉, 张智海 等. 基于微机电系统光栅平动式光调制器实验和优化设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1565~1569
- 5 Yu Yiting, Yuan Weizheng, Wang Lanlan *et al.*. Theoretical analysis and experimental measurement on the maximum blazing angle for microprogrammable gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2220~2224
- 虞益挺, 苑伟政, 王兰兰 等. 微型可编程光栅最大闪耀角的理论分析与实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2220~2224
- 6 Zhang Wendong, Xiong Jijun. Micro-Opto-Mechanical Systems (MOEMS)[M]. Beijing: China Machine Press, 2006
- 张文栋, 熊继军. 微光机电系统(MOEMS)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 7 K. E. Petersen. Silicon torsional scanning mirror [J]. *IBM J. Research and Development*, 1980, **24**(5): 631~637
- 8 J. B. Sampsel. Digital micromirror device and its application to projection displays [J]. *J. Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1994, **12**(6): 3242~3246
- 9 H. Kueppers, T. Leuerer, U. Schnakenberg *et al.*. PZT thin films for piezoelectric microactuator applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, **97-98**(1): 680~684
- 10 C. H. Ji, M. Choi, S. C. Kim *et al.*. Electromagnetic two-dimensional scanner using radial magnetic field [J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2007, **16**(4): 989~996
- 11 S. Schweizer, S. Calmes, M. Laudon *et al.*. Thermally actuated optical microscanner with large angle and low consumption [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, **76**(1-3): 170~177
- 12 X. M. Zhang, F. S. Chau, C. Quan *et al.*. A study of the static torsional micromirror [J]. *Sensor and Actuators A*, 2001, **9**: 73~81
- 13 J. H. Lee, Y. C. Ko, B. S. Choi *et al.*. Bonding of silicon scanning mirror having vertical comb fingers [J]. *J. Micromech. Microengng.*, 2002, **12**(5): 644~649
- 14 W. T. Lin, J. C. Chiou, C. Tsou. A self-aligned fabrication method of dual comb drive using multilayers SOI process for optical MEMS applications [J]. *Microsyst. Technol.*, 2005, **11**(2-3): 204~209
- 15 Zhou Hongfeng, Wang Dongyun, Huang Tiru *et al.*. The study of measure model and optical path design of small angle measured by laser triangulation [J]. *J. Yunnan Nationalities University*, 2008, **17**(3): 277~279
- 周红锋, 王东云, 黄梯儒 等. 激光三角法测量小角度的测量模型和光路设计研究 [J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2008, **17**(3): 277~279
- 16 F. Fillhol, E. Defay, C. Divoux *et al.*. Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **123-124**: 483~489
- 17 A. Arslan, D. Brown, W. O. Davis *et al.*. Comb-actuated resonant torsional microscanner with mechanical amplification [J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2010, **19**(4): 936~943
- 18 K. U. Roscher, H. Gratz, H. Schenk *et al.*. Low-cost projection device with a 2D resonant micro scanning mirror [C]. *SPIE*, 2004, **5348**: 22~31

栏目编辑: 韩 峰