

doi: 10.3788/gzxb20174601.0123003

# 电磁驱动大尺寸 MEMS 扫描镜的研究

何嘉辉<sup>1,2</sup>, 周鹏<sup>2</sup>, 余晖俊<sup>2</sup>, 沈文江<sup>2</sup>, 司金海<sup>1</sup>

(1 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123)

**摘 要:** 基于微机电系统工艺, 设计并制作了一种电磁驱动大尺寸的二维扫描振镜. 分析了两种不同的电磁驱动方式产生的力的大小, 选择驱动力较大的双极子方式作为驱动. 运用有限元法模拟了器件的谐振频率静态及动态响应, 仿真结果与实际测得的结果一致. 描述了振镜的工艺流程及封装方式, 并制备了振镜. 实验测得振镜在 120 mA 静态电流驱动下, 慢轴和快轴分别能达到的最大转角为  $\pm 4.5^\circ$  及  $\pm 5^\circ$ , 慢轴及快轴的谐振频率分别为 348 Hz 及 660 Hz, 并得到在此谐振频率下的李萨如图形. 将器件用于激光成像系统之中, 使得散斑对比度下降到 4.2%, 激光成像质量得到很大提升.

**关键词:** 微机电系统; 激光散斑; 有限元仿真; 光学扫描; 利萨如图形

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0123003-8

## Research on Large Size MEMS Scanning Mirror Driven by Electromagnetic

HE Jia-hui<sup>1,2</sup>, ZHOU Peng<sup>2</sup>, YU Hui-jun<sup>2</sup>, SHEN Wen-jiang<sup>2</sup>, SI jin-hai<sup>1</sup>

(1 *The school of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(2 *Key Lab of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China*)

**Abstract:** Based on the Micro Electronic Mechanical System (MEMS) processing, a large size 2-D scanning mirror driven by electromagnetic force was designed and implemented. Two different driving methods were compared, and the method of dipole driving was chosen because of its higher torque. Meanwhile, the static response and dynamic response of the device were analyzed by using finite element simulation, the simulation results matched with the measurement data of the device. The fabrication and packaging steps for the MEMS mirror were described in details, and the mirror was fabricated. The testing results show that when the driving current reaches 120 mA, the MEMS mirror has static titling angles of  $\pm 4.5^\circ$  and  $\pm 5^\circ$  along slow axis and fast axis respectively. The scanning resonant frequency for the mirror along slow axis is 348 Hz, and 660 Hz along fast axis. Finally, the MEMS mirror was used in laser display system to reduce the laser speckle, the speckle contrast can be reduced to 4.2%, and the image quality of a laser display system can be greatly improved with the MEMS mirror.

**Key words:** Micro Electronic Mechanical System (MEMS); Laser speckle; Finite element method; Optical scanning; Lissajous pattern

**OCIS Codes:** 230.4040; 230.3990; 120.5800

## 0 引言

光学扫描镜是一种优秀的矢量扫描设备, 能使入射光束按照特定的方式与时间顺序发生反射, 从而在像

基金项目: “青年千人计划”启动经费和国家重点研发计划(No. 2016YFB0401903)资助

第一作者: 何嘉辉(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 微镜及激光雷达. Email: jhhe2014@sinano.ac.cn

通讯作者: 沈文江(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为 MEMS 器件. Email: wjshen2011@sinano.ac.cn

导 师: 司金海(1960-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超快光克尔. Email: jinhai@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-08-01; 录用日期: 2016-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

面上实现扫描成像. 传统的光学扫描镜体积大、成本高,且多为散装,大大限制了其应用<sup>[1]</sup>. 相较于传统扫描镜,微机电系统(Micro Electronic Mechanical System, MEMS)扫描镜由于其成本低、可靠性高、小型化和重量轻等优点在激光投影、激光雷达、激光散斑消除等领域得到应用. 在激光投影系统和激光散斑消除系统中,为了减小光束反射过程中的衍射效应并且得到高分辨率的图像,光学系统中的光束尺寸均在厘米量级;同时,调查表明,市场家庭影院级别激光光源功率达百瓦级别<sup>[2]</sup>,小口径的振镜很难承受如此大功率的激光;一方面为了匹配光学系统的尺寸要求,另一方面基于安全考虑,振镜尺寸应扩大至厘米级别. 同样地,在激光雷达中,为了得到高分辨率的扫描图像,也需要大尺寸扫描振镜.

国内外研制的 MEMS 扫描镜大多口径较小,而对于大尺寸 MEMS 振镜研究较少. 美国 Microvision 公司研制的 MEMS 二维扫描振镜采用电磁驱动的方式,成功用于微型激光投影系统中,但其镜面直径仅为 1 mm,无法满足高分辨率成像的要求<sup>[3]</sup>;以色列奥宝科技首先应用 MEMS 扫描振镜消除了激光散斑,其振镜口径为 0.8 mm,不能用于激光显示系统中,无法商业化<sup>[4]</sup>;挪威西富尔德大学学院进一步改进了 MEMS 二维扫描振镜并提升了激光显示图像质量,但其振镜口径仅为 2 mm,同样无法应用于大功率激光显示<sup>[5]</sup>;上海微系统所研制成了一种镜面尺寸达到 6 mm×4 mm 的 MEMS 振镜,但这种振镜只能单轴扫描,不能用于二维成像<sup>[6]</sup>. 大尺寸的 MEMS 二维振镜由于其自身质量较大,只有在驱动力矩足够的情况下才能达到较大转角,一般的驱动方式难以产生较大的驱动力;同时,振镜用于激光扫描成像系统中时还应需要具有较高的工作频率. 基于上述要求,本文设计了一种镜面尺寸达 15 mm×13 mm 的电磁驱动 MEMS 二维扫描振镜,所采用的高效率电磁驱动方式不仅满足了大转角所需的驱动力矩,并且实现了高频率工作. 同时,将器件用于激光成像系统之中,可有效消除激光散斑.

## 1 振镜的设计要求

MEMS 微扫描镜按照驱动方式的不同,可以分为静电驱动式、电热驱动式、电磁驱动式和压电驱动式等四类<sup>[7]</sup>,这四种驱动方式的优缺点见表 1.

表 1 驱动方式优缺点  
Table 1 Advantages and disadvantages of the driven method

Driving method	Advantages	Disadvantage
Static	1. Simple	1. High voltage
	2. Technical maturity	2. Non-linear
	3. Low power consumption	3. Low driving force
Electromagnetic	1. High driving force	1. Large scale
	2. Technical maturity	2. Complex
	3. Linear	
PZT	1. High driving force	1. Hard to integrate
	2. Fast response	2. Small driving displacement
	3. Low power consumption	
Electric heating	1. High driving force	1. Slow response
	2. Easy to fabricate	2. Low dynamic characteristic
		3. High power consumption
		4. Heat influence

如表 1 所示,为了得到较大的驱动力矩使得振镜扭转较大角度,同时尽可能地降低功耗,通常使用电磁驱动或压电驱动来驱动大尺寸振镜. 其中,压电驱动虽然能够产生比较大的驱动力,但由于其难以与 MEMS 工艺相结合,并且驱动产生的位移较小,故器件中采用了更加灵活和高效的电磁驱动方式. 电磁驱动方式根据其结构的不同,通常有两种驱动形式:一种为电磁铁型,将表面附有铁钴镍等导磁性能良好金属的微扫描镜放置在按照一定频率变化的交变磁场中,利用交变磁场与金属相互作用产生磁力驱动微扫描镜扭转<sup>[8]</sup>;另一种为双极子型,需要在微扫描镜上沉积磁材料,利用磁材料在交变电场下产生的作用力,驱动微扫描镜扭转<sup>[9-12]</sup>.

为了对比两种不同的电磁驱动方式,利用 Ansoft Maxwell 软件对两种模型的磁场力进行分析,建立模型如图 1. 同时对两种模型产生的力进行测量,计算及测量得到的线圈型与双极子型的电流与力变化关系如图 2.

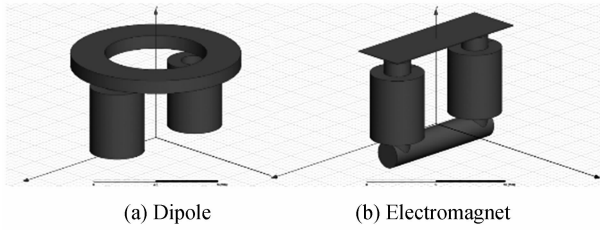


图 1 电磁驱动模型

Fig. 1 Two types of electromagnet drive

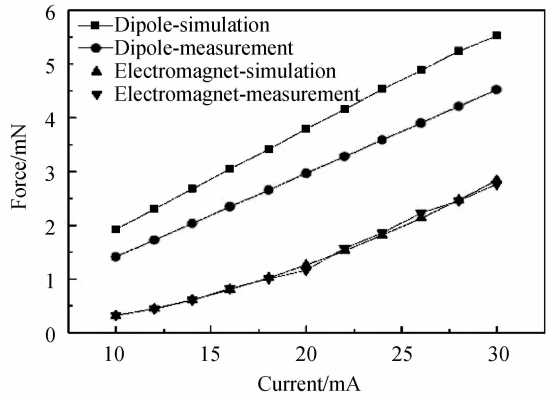


图 2 电磁驱动不同形式电流与力的变化关系

Fig. 2 Current-Force relationship for dipole and electromagnet

如图 2 所示,对于双极子型的驱动方式,模拟计算得到的力与实际测量得到的力有相对较大的差距,这是由于双极子模型磁阻较大且在计算中无法准确得知磁阻的数值,造成模拟结果偏大;对于电磁铁型的驱动方式,其模型漏磁相对较小,能够较为精确地得到力与电流的关系,故模拟与实测结果较为吻合.在同样的电流下,双极子型产生的驱动力是电磁铁型产生的驱动力的两倍;同时,双极子型驱动方式更易于对扫描镜进行双向驱动,并且驱动电流跟转角的线性度很好,更符合大尺寸 MEMS 振镜的设计要求.基于双极子型的优势特性,选取双极子型的电磁驱动作为振镜的驱动方式.

振镜的模型如图 3.振镜镜面为长轴长 15 mm、短轴长 13 mm 的椭圆,与镜面连接的轴为快轴,与快轴外围框架连接的轴为慢轴,四周的四个螺纹孔起固定作用.振镜的背部固定一环形钕铁硼磁铁,其充磁方向为磁铁厚度方向.

在镜面背面放置 4 个线圈,线圈距离磁铁具有一定距离,如图 3(b),线圈分别对应磁铁 ABCD 4 个位置.以 AC 线圈为例,如图 4,当 A、C 两个线圈施加频率相同,相位相差 90°的交流激励信号时,线圈产生的磁场的极性恰好相反且交替变化.任意时刻,线圈产生的磁场与磁铁相互作用,产生方向相反的转矩,镜面会以 B、D 线圈所在轴向发生扭转.根据对称性,给 BD 对应的线圈施加一定电流也会实现同样效果,从而达到振镜二维扫描的目的.同时,两组线圈所加的电流相互独立,振镜的双轴扭转能保持很好的独立性、线性度和扫描准确度.

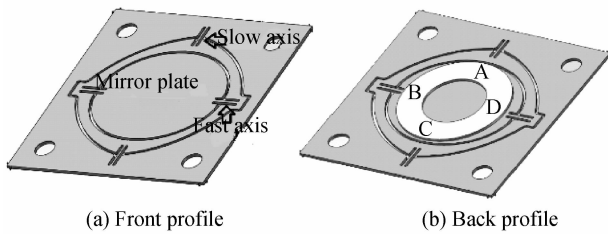


图 3 振镜微镜模型

Fig. 3 Model for MEMS mirror

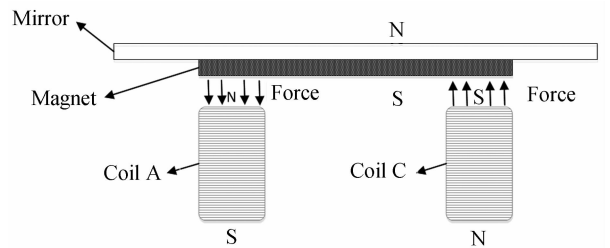


图 4 振镜驱动原理

Fig. 4 Driving principle for MEMS mirror

扫描振镜的运动过程可以采用质量-阻尼-弹簧的二阶振动系统方程来表达,运动方程为

$$T = I_m \ddot{\theta} + C \dot{\theta} + K_s \theta \quad (1)$$

式中, $T$ 为驱动力矩, $I_m$ 为振镜的转动惯量, $C$ 为阻尼系数, $K_s$ 为扭转轴的弹性常量, $\theta$ 为转动角度.扭转轴的弹性常量计算公式为

$$K_s = \frac{2 \left[ 5.33 - 3.36 \frac{b}{a} \left( 1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right] ab^3 G}{L_f} \quad (2)$$

式中, $a$ 、 $b$ 分别为转动轴横截面宽度与高度的一半, $L_f$ 是转动轴的长度, $G$ 是材料的剪切模量.

由于振镜的形状为椭圆,长轴及短轴的转动惯量  $I_{ml}$  与  $I_{ms}$  计算公式为

$$I_{ml} = \frac{\pi}{64} \rho t_m L_m D^3 \quad (3)$$

$$I_{ms} = \frac{\pi}{64} \rho t_m L_m^3 D \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为振镜材料硅的密度,  $t_m$  是镜面的厚度,  $L_m$  和  $D$  为镜面的长和宽。

振镜的谐振频率  $f$  的计算公式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s}{I_m}} \quad (5)$$

在模型中, 磁铁和线圈产生的电磁力为

$$F = V \times M_s \times \frac{\partial H}{\partial z} \quad (6)$$

式中,  $V$  是磁铁的体积,  $M_s$  是磁铁的磁化强度,  $H$  是由外部线圈产生的磁场强度。

由电磁力产生的振镜扭转力矩  $T_{mag}$  以及在此力矩下振镜的静态倾斜角  $\theta_0$  可以描述为

$$T_{mag} = F \times L' \quad (7)$$

$$\theta = \frac{T_{mag}}{K_s} \quad (8)$$

式中,  $L'$  是电磁力与扭转轴间的距离。

当振镜的驱动信号的频率为  $\omega$ , 通过振镜的二阶振动系统方程, 得到振镜的转动角度  $\theta$  为

$$\theta = \frac{\theta_0}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{f}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{f}\right)^2}} \quad (9)$$

式中,  $\xi$  为介质的阻尼比,  $f$  为谐振频率。

表2是振镜的具体尺寸参量. 基于以下尺寸参量, 对振镜进行了有限元仿真、版图设计、器件制作及测试。

表 2 振镜尺寸参量

Table 2 Parameters for MEMS mirror

Parameter	Coil			Magnet			
	Height/mm	O. D/mm	Inductance/mH	Thickness/mm	I. D/mm	O. D/mm	
Value	5	3.5	2.25	0.3	7	12.5	
Parameter	Mirror			Fast axis		Slow axis	
	Major/mm	Minor/mm	Thickness/ $\mu\text{m}$	Length/mm	Width/ $\mu\text{m}$	Length/mm	Width/ $\mu\text{m}$
Value	15	13	350	2.7	200	2.65	320

## 2 有限元仿真

利用 Ansys 有限元软件对振镜的几何结构进行仿真. 建立背部固定磁铁的振镜模型, 对振镜进行模态分析, 静态变形分析以及冲击分析. 其中, 所用材料的物理性质如表 3. 模态分析中, 将振镜的四周边缘固定, 得到快轴及慢轴扭转状态下的谐振频率; 静态变形分析中, 对振镜施加竖直向下的重力, 观察其静态变形及轴静态应力; 冲击分析中, 对振镜施加大小为  $20 \text{ m/s}^2$  持续时间为  $1 \text{ ms}$  的加速度, 观察其动态变形与轴动态应力; 得到的结果见表 4.

表 3 材料物理性质

Table 3 Parameters for silicon

(100) Silicon wafer	Elasticity modulus $E_x = E_y = 169 \text{ GPa}$ , $E_z = 130 \text{ GPa}$
	Poisson ratio $\nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.36$ , $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.28$ , $\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0.064$
	Shearing modulus $G_{yz} = G_{zx} = 79.6 \text{ GPa}$ , $G_{xy} = 50.9 \text{ GPa}$

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

Slow axis/Hz	Fast axis/Hz	Static distortion/ $\mu\text{m}$	Static stress/MPa	Dynamic distortion/ $\mu\text{m}$	Dynamic stress/MPa
345	665	0.67	1.19	26.946	47.462

由仿真结果可知,在振镜背部贴上磁铁后,其静态变形仅为  $0.67 \mu\text{m}$ ,远小于镜面厚度  $350 \mu\text{m}$ ,镜面能够承受磁铁的重量.同时,在  $200 \text{ m/s}^2$  冲击加速度的作用下,振镜轴部的应力远未达到材料硅的屈服强度  $7 \text{ GPa}$ ,可以耐受较大的冲击.在此驱动方式下,电磁力能够驱动振镜达到较大的机械转角.根据仿真结果,总体设计参量符合要求,振镜能够在驱动力下发生较大角度的偏转,同时具有优良的抗冲击性能及合适的谐振频率.

### 3 振镜的制备及封装

实验中采用 MEMS 体硅加工工艺,具体工艺流程如图 5:(a)准备一片厚度为  $350 \mu\text{m}$  的 N 型(100)双面抛光硅片,在硅片下表面用磁控溅射生长  $10 \text{ nm}$  的 Ti, $300 \text{ nm}$  的 Cu,Cu 作后续深硅刻蚀中的保护层.之后对硅片上表面进行涂胶光刻,产生图形;(b)进行深硅刻蚀,刻蚀过程把  $350 \mu\text{m}$  的硅全部刻蚀完,刻蚀停止在 Ti/Cu 金属表面.将整体镜面刻蚀成为悬空结构,并用湿法腐蚀去除之前溅射的铜保护层;(c)采用电子束蒸发的方法,在镜子的正面蒸发上一层金膜,以增加对红光的反射率;(d)裂片后,得到 MEMS 二维振镜,整个工艺完成.图 6 为制备得到的大尺寸 MEMS 振镜与 1 元硬币的对比.

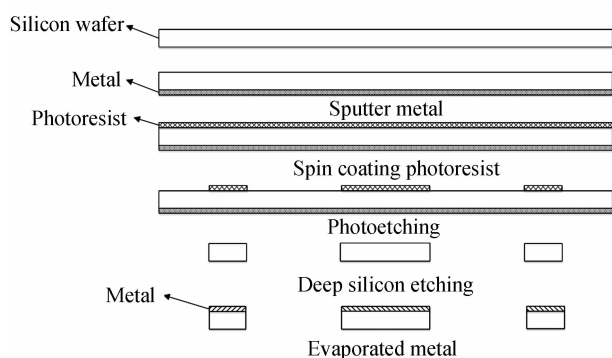


图 5 振镜工艺流程

Fig. 5 Processing for MEMS mirror

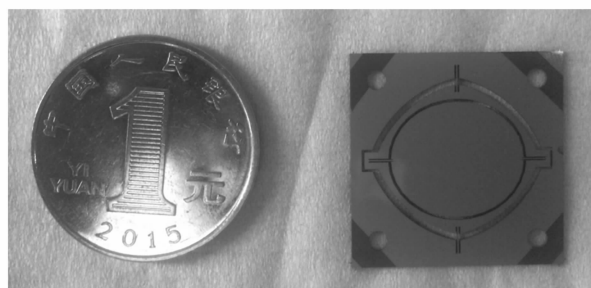


图 6 大尺寸振镜

Fig. 6 Large-scale MEMS mirror

振镜制作完成后,需要对其进行封装.如图 7 所示,先将环形钕铁硼磁铁粘贴至镜面背部,为了防止磁性材料与驱动磁铁相互吸引,封装材料选择为磁导率低的塑料和铜、铝等材料.振镜整体封装采用三明治结构,在振镜的上端覆盖一片  $1.2 \text{ mm}$  厚的敞口塑料薄片,确保光能够以很大的入射角入射的同时起保护作用.振镜下端放置一相同形状但厚度为  $0.9 \text{ mm}$  的塑料薄片,这样做的目的是使得磁铁与下端线圈有一定距离,振镜可以在此范围内扭转,扭转允许的最大范围可以通过调整此塑料薄片的厚度来改变.线圈放置在最下端工件中心的四个孔内,相对的两个线圈为一组,极性相反,驱动振镜的单轴运动.线圈引线在底部通过 PCB 板引出之后,外加驱动电流.图 8 给出了完整封装的大尺寸 MEMS 振镜.

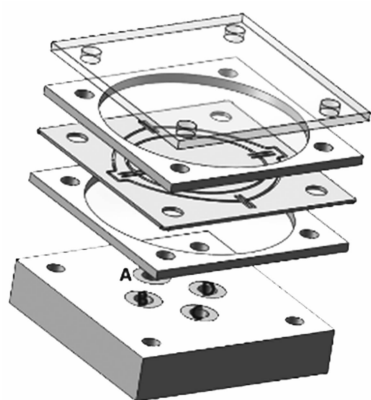


图 7 封装示意图

Fig. 7 Package model

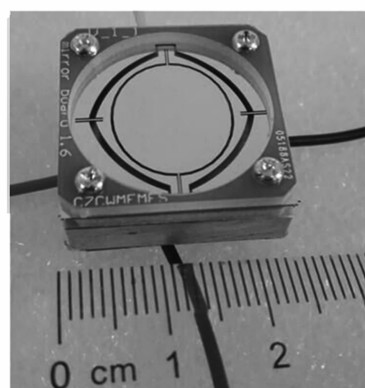


图 8 封装完成的 MEMS 振镜

Fig. 8 Complete package

## 4 振镜的测试

MEMS 扫描镜扫描角度的测量原理为激光三角法<sup>[13]</sup>, 即当一束激光照射至扫描镜表面, 当扫描镜静止时, 激光会发生反射, 同时在接收屏上形成激光光斑, 当扫描镜振动时, 激光光斑变为一条直线. 若扫描镜到接收屏的距离为  $S$ , 扫描线的长度为  $L$ , 扫描线顶端到基准点的距离为  $H$ , 则扫描角度可以表示为

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \left( \arctan \frac{H}{S} - \arctan \frac{H-L}{S} \right) \quad (10)$$

图 9 给出了 MEMS 振镜在直流激励下的电流-转角测量及仿真结果图, 仿真耦合了 ANSYS 力学模块与 Ansoft 电磁场模块. 从图中可以发现当施加的电流较小时, 机械转角随着电流的增加呈线性增加, 当电流增加到 120 mA 左右时, 实测机械转角不再增加, 由于仿真模型中没有最大转角限制, 仿真转角继续增加. 实测慢轴、快轴分别在 120 mA 已经达到了当前封装状态下的最大机械扭转角度  $\pm 4.5^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$ .

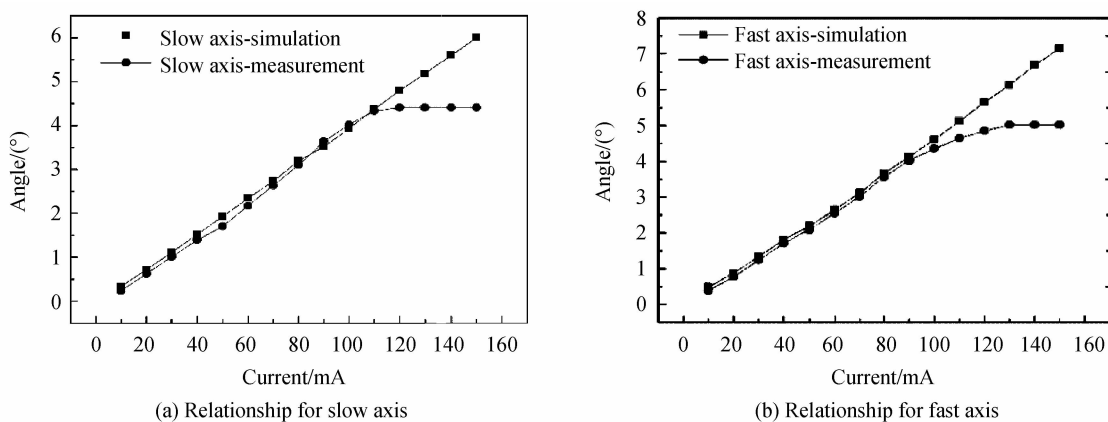


图 9 电流-转角关系

Fig. 9 Current-angle relationship

图 10 为器件的动态响应曲线, 对于快轴和慢轴, 保证激励信号幅度不变, 改变激励信号的频率, 记录在不同频率激励下的 MEMS 振镜的扫描角度. 如图 10(a) 所示, 振镜慢轴在低频远离谐振点时, 机械扫描角度

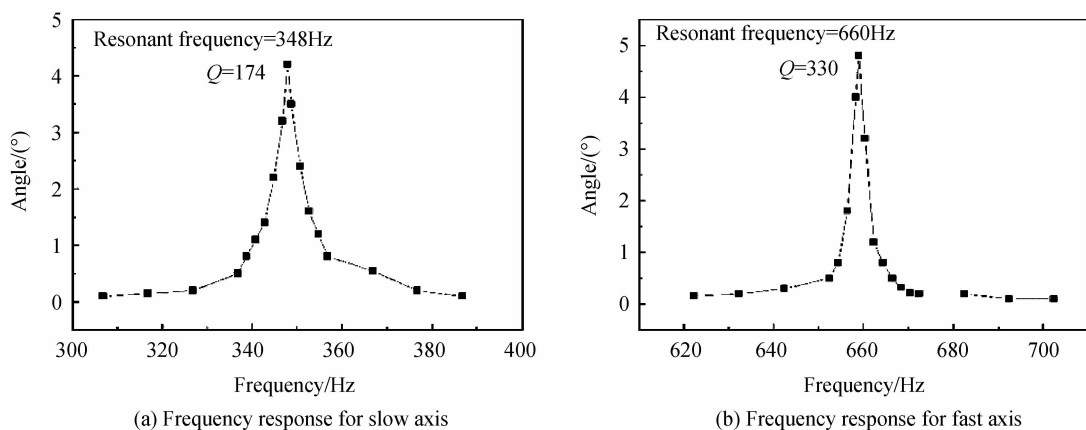


图 10 动态响应

Fig. 10 Frequency response

很小, 随着激励频率的增加, 振镜慢轴的机械扫描角度逐渐增大, 在激励频率达到 348 Hz 时, 振镜慢轴的扫描角度达到峰值, 进一步增加激励频率, 振镜慢轴的机械扫描角度逐渐减小, 可以得到慢轴谐振频率为 348 Hz; 同样地, 振镜快轴在远离谐振点时, 机械扫描角度很小, 随着激励频率的增加, 快轴的机械扫描角度逐渐增加, 当激励频率达到 660 Hz 时, 振镜快轴的扫描角度达到峰值, 进一步增加激励频率, 快轴的机械扫描角度逐渐减小, 得到快轴的谐振频率为 660 Hz. 从图中的曲线可以得到振镜慢轴、快轴的品质因子  $Q$  值, 计算公式为

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (11)$$

式中,  $f_0$  为共振频率,  $\Delta f$  为带宽. 计算可得慢轴的品质因子  $Q$  值为 174, 快轴的品质因子  $Q$  值为 330.

将振镜的谐振频率测试结果与有限元仿真结果进行对比, 慢轴仿真出的谐振频率为 345 Hz, 测得谐振频率为 348 Hz, 误差为 0.64%; 快轴仿真出的谐振频率为 665 Hz, 测得谐振频率为 660 Hz, 误差为 0.82%, 从上面结果可以看出, 谐振频率的模拟结果与实测结果误差很小, 振镜满足设计要求.

振镜的谐振频率受振镜的制备工艺、材料特性、封装工艺等多种因素的影响, 实测的振镜的谐振频率跟设计频率比较存在偏差, 偏差范围在  $\pm 1\%$  以内, 在振镜的实际应用中, 会根据不同振镜实测的谐振频率来调整振镜的驱动信号的频率.

MEMS 振镜的稳定性能也是衡量其性能的重要指标, 表 5 给出了振镜在 30 mA 直流电流驱动下的静态稳定性测试数据.

表 5 静态稳定性测试  
Table 5 Static stability

Test time	Sep. 11, 2016	Sep. 14, 2016	Sep. 18, 2016	Sep. 21, 2016
Slow axis angle	$\pm 1.0^\circ$	$\pm 1.0^\circ$	$\pm 1.0^\circ$	$\pm 1.0^\circ$
Fast axis angle	$\pm 1.1^\circ$	$\pm 1.1^\circ$	$\pm 1.1^\circ$	$\pm 1.1^\circ$

如表 5 所示, 振镜在固定直流电流驱动下, 其机械转角能保持长时间不变化, 静态稳定性能良好; 此外, 振镜实际工作情况是连续正弦驱动的, 在驱动电流为 30 mA 交流电的情况下, 振镜已经连续工作超过 8 000 h, 振镜的转角保持不变, 具有优良的动态稳定性.

李萨如图形沿 X 轴和 Y 轴的运动方程可以表示为

$$X = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (12)$$

$$Y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (13)$$

对振镜慢轴及快轴分别施加等幅值的 348 Hz 及 660 Hz 的正弦激励, 令慢轴及快轴分别工作在其谐振点, 图 11 为振镜在谐振频率下扫描所得到的李萨如图形. 与 MATLAB 仿真得到的李萨如图形进行对比后发现, 实际图案与仿真结果基本一致.

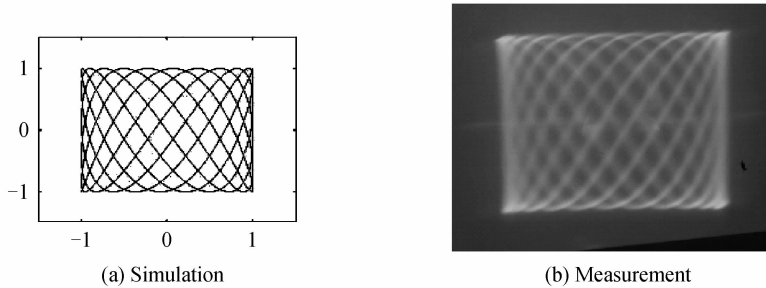


图 11 李萨如图形

Fig. 11 Lissajous pattern

显示技术中, 图像具有一定刷新时间, 在该时间内, 利用振镜的高速扫描特性, 使通过振镜反射的光束在散射片上进行扫描, 扫描图案如图 11; 例如, 在  $t_1$  时刻, 光束可能在散射片上方位置, 而在  $t_2$  时刻, 光束就会入射到散射片下方位置; 实验中, 将散射片紧靠匀光管入口处, 如图 12, 控制光束扫描区域小于匀光管的入射口径大小, 通过散射片后的光束会全部进入到匀光管中; 入射到散射片上的光束本身具有一定的发散性, 散射光束在匀光管内经过多次反射, 在出口处形成均匀照明面, 通过后续的光学元件和芯片成像到屏幕上, 调制芯片形成人们所观察到的图案. 不同时刻散射片不同位置所形成的散斑图相互独立, 最后在屏幕上相互叠加, 根据 Goodman 提出的散斑消除原理<sup>[14-15]</sup>, 这些大量独立散斑图在一帧图像形成时间内相互叠加, 从而实现消除激光散斑.

实验中, 利用 CCD 相机对散斑对比度进行了测量, 发现振镜驱动后, 散斑对比度降低到 4.2%, 而此时人眼已经观察不到散斑. 可以认为振镜可以很好地用于激光散斑消除技术.

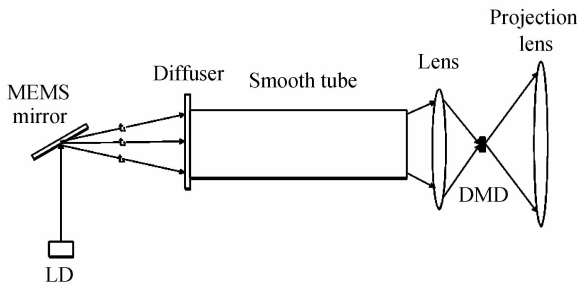


图 12 消除散斑原理

Fig. 12 Speckle reduction principle



(a) Speckle pattern

(b) Speckle reduction pattern

图 13 散斑对比

Fig. 13 Speckle comparison

## 5 总结

本文成功设计制造出了一种镜面尺寸达  $15\text{ mm} \times 13\text{ mm}$  的 MEMS 大尺寸二维扫描振镜, 获得了振镜扫描的李萨如图形. 通过实验表明, 此振镜能够在双极子电磁驱动下产生很大的转角, 同时制作工艺简单, 功耗低. 同时, 此 MEMS 二维扫描振镜可以有效抑制激光投影系统中产生的激光散斑, 提升显示质量.

在振镜使用过程中线圈容易发热, 影响振镜的工作寿命, 后续考虑在封装中加入散热模块, 进一步提升振镜整体性能.

## 参考文献

- [1] MOTAMEDI M. Micro-opto-electro-mechanical systems[J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(11): 3505-3517.
- [2] AKRAM M, TONG Z, OUYANG G, *et al.* Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(17): 3297-3304.
- [3] SPRAGUE R, MONTAGUE T, BROWN D, *et al.* Bi-axial magnetic drive for scanned beam display mirrors[C]. MOEMS-MEMS Micro & Nanofabrication. International Society for Optics and Photonics, 2005, **5721**: 1-13.
- [4] AKRAM M, TONG Z, OUYANG G, *et al.* Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(17): 3297-3304.
- [5] OLIVEIRA L, BARBAROTO P, FERREIRA L, *et al.* A novel Si micromachined moving-coil induction actuated mm-sized resonant scanner[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **16**(1): 165-172.
- [6] MU Can-jun, ZHANG Fei-ling, WU Ya-ming, *et al.* A novel large-scale electromagnetically actuated MEMS optical scanning mirror[J]. *Journal of Semiconductors*, 2008, **3**: 583-587
- 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, **3**: 583-587.
- [7] HOLMSTROM S, BARAN U, UREY H, *et al.* MEMS laser scanners: a review[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, **23**(2): 259-275.
- [8] JAIN A, QU H, TODD S, *et al.* A thermal bimorph micromirror with large bi-directional and vertical actuation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **122**(1): 9-15.
- [9] YASUDA Y, AKAMATSU M, TANI M, *et al.* Piezoelectric 2D-optical micro scanners with PZT thick films[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2006, **80**(1): 341-353.
- [10] DAVIS O, BROWN D, HELSEL M, *et al.* High-performance silicon scanning mirror for laser printing[C]. MOEMS-MEMS 2007 Micro and Nanofabrication. International Society for Optics and Photonics, 2007, **6466**: 64660D.
- [11] SMITS J, FUJIMOTO K, KLEPTSYN F, *et al.* Microelectromechanical flexure PZT actuated optical scanner: static and resonance behavior[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(6): 1285-1293.
- [12] LEE C, HSIAO F, KOBAYASHI T, *et al.* A I-V operated MEMS variable optical attenuator using piezoelectric PZT thin-film actuators[J]. *IEEE Journal of, Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(5): 1529-1536.
- [13] ZHOU Hong-feng, WANG dong-yun, HUANG Di-ru, *et al.* The study of measure model and optical path design of small angle measured by laser triangulation[J]. *Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Sciences Edition)*, 2008, **3**: 277-279.
- 周红锋, 王东云, 黄锦儒, 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, **3**: 277-279.
- [14] CHEN X, SVENSEN Ø, AKRAM M. Speckle reduction in laser projection using a dynamic deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 11152-11166.
- [15] GOODMAN J. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Roberts and Company Publishers, 2007: 49-87.