

一种新型微机电系统扫描镜的谐振频率研究

燕 斌 苑伟政 乔大勇 刘耀波 吴 蒙 李 昭

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 在微光机电系统(MOEMS)技术的基础上,采用绝缘体上硅(SOI)的体硅加工工艺,设计并加工制作了一种新型的静电驱动的谐振式微机电系统(MEMS)扫描镜。介绍了其基本工作原理及结构设计特点;理论计算了圆形和方形两种结构的尺寸扫描镜的谐振频率,并利用 ANSYS 有限元软件进行仿真;设计并搭建了一个简单易操作的光学测试系统,对研制出的 MEMS 扫描镜(7.1 mm×5.2 mm)进行扫描角度测试。利用该器件参数激励的迟滞频率特性,对其谐振频率进行实际测量。同时,为验证其所测谐振频率的准确性,利用激光多普勒测振(LDV)系统对其进行测试。在工作电压 10 V,方形和圆形扫描镜的驱动频率分别为 556 Hz 和 596 Hz 时,机械扫描角度分别可达到约 6°和 5°,谐振频率分别约为 300 Hz 和 277 Hz。并分析误差产生的原因及其结果。

关键词 光学器件;微光学器件;扫描镜;绝缘体上硅;谐振频率;迟滞频率响应

中图分类号 TN303 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0623004

Study on Resonant Frequency for a Novel MEMS Micro Scanning Mirror

Yan Bin Yuan Weizheng Qiao Dayong Liu Yaobo Wu Meng Li Zhao

(MEMS/NEMS 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 using silicon-on-insulator (SOI) process is designed and fabricated. Its basic operational principle and structural characterizations are briefly introduced. The resonant frequency considered to be its most important mechanical parameter is theoretically computed according to the two designed structural dimensions and numerically simulated by combining the finite element simulation tool of ANSYS. A simple but efficient optical system is set up for practically measuring their scanning angle of the designed micro scanning mirror. According to the characteristic of hysteretic frequency responses of parametric excitation of the designed micro scanning mirror, the resonant frequency is measured. To verify the accuracy of the testing results, the resonant frequency is achieved by the laser Doppler vibrometer (LDV). With the driving voltage of 10 V, the mechanical scanning angles for the square and circular scanning mirror reach to about 6° and 5° respectively while the drive frequencies are 556 Hz and 596 Hz. Furthermore, the resonant frequency approximately reaches to 300 Hz and 277 Hz. All the derived results are compared and very error cause is analyzed.

Key words optical devices; micro-optical devices; micro scanning mirror; silicon-on-insulator; resonant frequency; hysteretic frequency responses

OCIS codes 230.3990; 230.4040

1 引 言

近年来,光学扫描镜作为光学应用系统的核心器件,在高分辨显示和成像、光通信开关、条码识别、数据存储以及自聚焦微型显微镜等方面被广泛应

用。以微机电系统(MEMS)技术和微光机电系统(MOEMS)技术为代表的微纳米技术以其体积小、重量轻、性能稳定、成本及功耗低等显著优点使光学元件的尺寸大幅度减小^[1~4]。MEMS 扫描镜是采

收稿日期: 2011-12-01; **收到修改稿日期:** 2012-01-09

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以及 MEMS 微加工工艺等方面的研究。

E-mail: ybnwpu@163com.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、精密制造技术等方面的研究。

E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn

用半导体微细加工技术制作的与集成电路(IC)工艺兼容的重要光学器件,它的出现加快了光学系统和光学装置微型化的进程。

与电磁驱动、压电驱动以及电热驱动相比,静电驱动以功耗低、工艺简单且与 IC 工艺完全兼容等优势已成为国内外许多研究机构的研究热点。下电极平板驱动、平面梳齿驱动以及垂直梳齿驱动是静电驱动最重要的三种结构形式。2004 年,台湾清华大学^[5]报道了基于表面工艺加工制作的下电极平板驱动的扫描镜,该器件在 20 V 电压下,扫描角度仅达到 0.8°,严重限制了实际应用。2003 年,Veljko Milanovic 等^[6]成功研制了利用横向平面梳齿产生离面的扭转运动的扫描镜,在 1 kHz 谐振态运动时,有 46 个光学等级偏转,扫描镜的最大扭转角度大约为 22°,然而制作工艺采用绝缘体上硅(SOI)工艺结合的四层掩膜深反应离子刻蚀(DRIE),制作难度较大。R. Conant 等^[7]提出利用硅硅键合工艺制作出垂直梳齿驱动的扫描镜;尽管工艺简单,但固定梳齿和可动梳齿的对准精度低的问题可能会引起在低电压、重叠面积小的情况下,结构不稳定,进一步导致固定梳齿和可动梳齿发生粘附现象。2005 年,C. Tsou 等^[8]利用自对准的技术,采用 SOI 硅片结合多层掩膜的工艺制作出垂直梳齿驱动的扫描镜,制作工艺较为复杂。

本文采用 MEMS 技术,设计并加工制作了一种新型的静电驱动谐振式扫描镜,具有制作工艺简单、电压低和扫描角度大等优点。同时对其最重要的一

个机械性能参量——谐振频率,进行了理论仿真分析与实际测量,得到了器件最大扫描角度的驱动频率,为今后的应用开发提供了必要的技术参考。

2 MEMS 扫描镜

图 1 所示为所设计的 MEMS 扫描镜的结构示意图,共包括三层:器件层(device layer)、绝缘层(BOX layer)和基底层(handle layer)。器件层主要由两部分导体构成,动梳齿分布于扫描镜镜面的两侧,扭转梁支撑于整个镜面,并连接于镜面锚点,这些构成一个导体;与镜面两侧动梳齿交错的固定梳齿分别连接于静梳齿锚点构成另一部分导体。基底层有一个空腔,为器件的运动提供足够的空间。绝缘层将器件层和基底层进行电气绝缘。在理想条件下,当两个导体之间施加一定电压时,由于固定梳齿和可动梳齿在同一个平面内,因此无法产生转动方向的扭矩;然而在实际的加工工艺中,由于应力释放等工艺因素,造成在初始状态下,扫描镜的结构形成微小的“扭转”状态即固定梳齿和可动梳齿形成垂直偏差(图 1 中的局部放大所示)。在外部交流激励信号作用下,静动梳齿的这种垂直微小错位可以使镜面起振,发生扭转。

对于扫描镜来说,通常可看作一质量块在驱动力矩作用下绕其转轴振动,可用一个二阶振荡系统来表示:

$$I_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + K_f\theta = M(\theta), \quad (1)$$

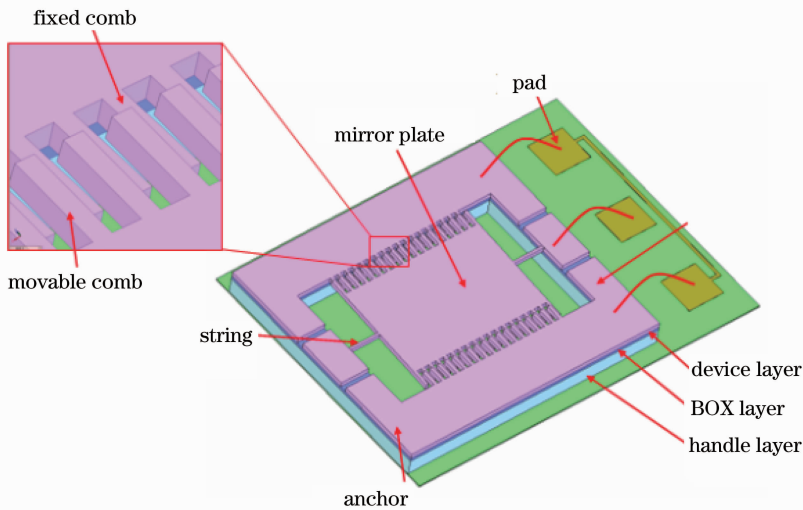


图 1 微扫描镜的结构示意图及工作原理

Fig. 1 Structural diagram and operational principle for micro scanning mirror

式中 θ 为扫描镜转动的角度, b 为阻尼系数, $M(\theta)$ 为施加的扭矩, K_f 为扭转的弹性系数, I_m 为扫描镜的转动惯量。

对于扫描镜的静电梳齿的扭矩为

$$M(\theta) = \frac{1}{2}(2N) \frac{\partial C}{\partial \theta} V^2(t), \quad (2)$$

式中 N 为单边镜面固定梳齿和可动梳齿的对数, C 为单个固定梳齿和可动梳齿之间的电容, $V(t)$ 为驱动梳齿和静梳齿施加的电压信号。

在扫描镜的扭转过程中, 电压信号是随时间变化而变化的, 电容的变化是随着角度变化而变化的。

因此, 静电扭矩是时间和角度的函数, 是典型的参数激励系统。对于参数激励系统而言, 施加激励信号的频率是固有频率(谐振频率)的 2 倍, 振幅能够达到最大^[9]。因此, 在实际的操作过程中, 一般选择频率为系统固有频率 2 倍的交流信号作为激励信号。从上述分析和讨论可以看出, 谐振频率是 MEMS 扫描镜很重要的性能参数。图 2 所示为制作的两种形状(圆形和方形)的扫描电镜(SEM)照片。图 3 给出了封装后的 MEMS 扫描镜器件。

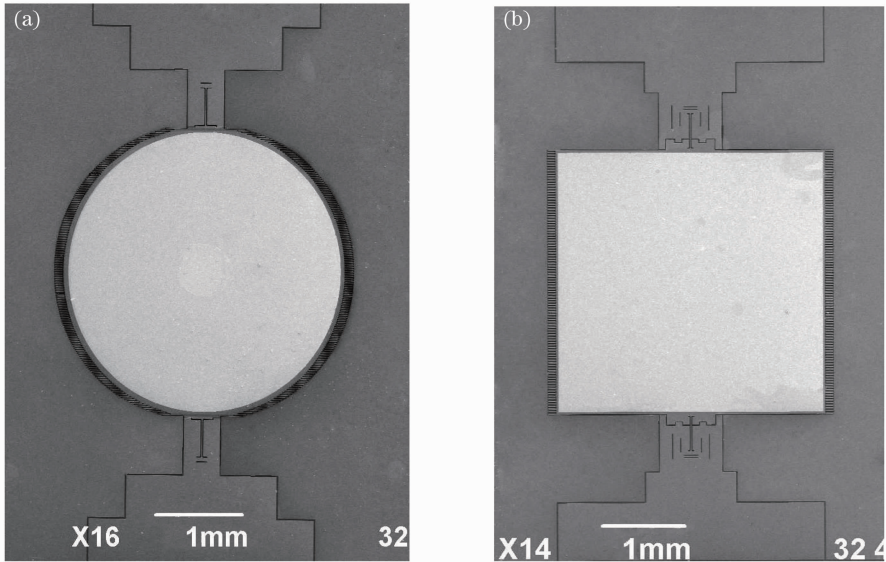


图 2 制造的微扫描镜的扫描电镜图。(a)圆形; (b)方形

Fig. 2 SEM images for the fabricated micro scanning mirror. (a) Circle mirror; (b) square mirror

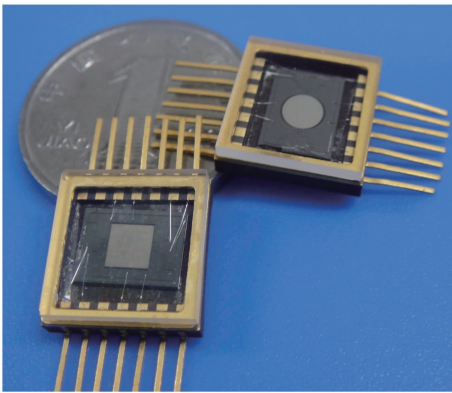


图 3 制造的微扫描镜封装后图

Fig. 3 Photos of the fabricated micro scanning mirror

参量以及工艺参量。为了简化计算和方便模型的建立, 几何模型中未加梳齿结构。在 ANSYS 软件中, 结构体采用单元 SOLID187, 网格自由划分, 利用求解器 Block Lanczos 实现模态求解。分析过程中, 所用的单晶硅材料属性如下: 杨氏模量为 130 GPa, 泊松比为 0.22, 密度为 2.33 g/cm³。图 4 和图 5 分别给出设计的方形和圆形的五阶振动模态。另外, 根据 H. Ueki 等^[10]提出的数学模型, 理论计算了它们的 5 阶模态频率。表 2 和表 3 分别给出两种结构理论计算和 ANSYS 软件仿真的频率对比。从表中可以看出, 在较低阶次的模态下, ANSYS 软件仿真和理论计算具有较小的偏差, 但在较高的模态阶次下具有较大的偏差。

3 模态仿真和理论计算

表 1 给出了设计的 MEMS 扫描镜的主要结构

表 1 扫描镜的主要结构参量以及工艺参量

Table 1 Main structural and process parameters for the micro scanning mirrors

Parameters	Value / μm
Length of mirror structure	3000
Width of mirror structure	3000
Thickness of mirror structure	30
Thickness of sacrificial layer	1
Thickness of handle layer	400
Length of comb drive	90
Width of comb drive	5
Gap of comb drive	5

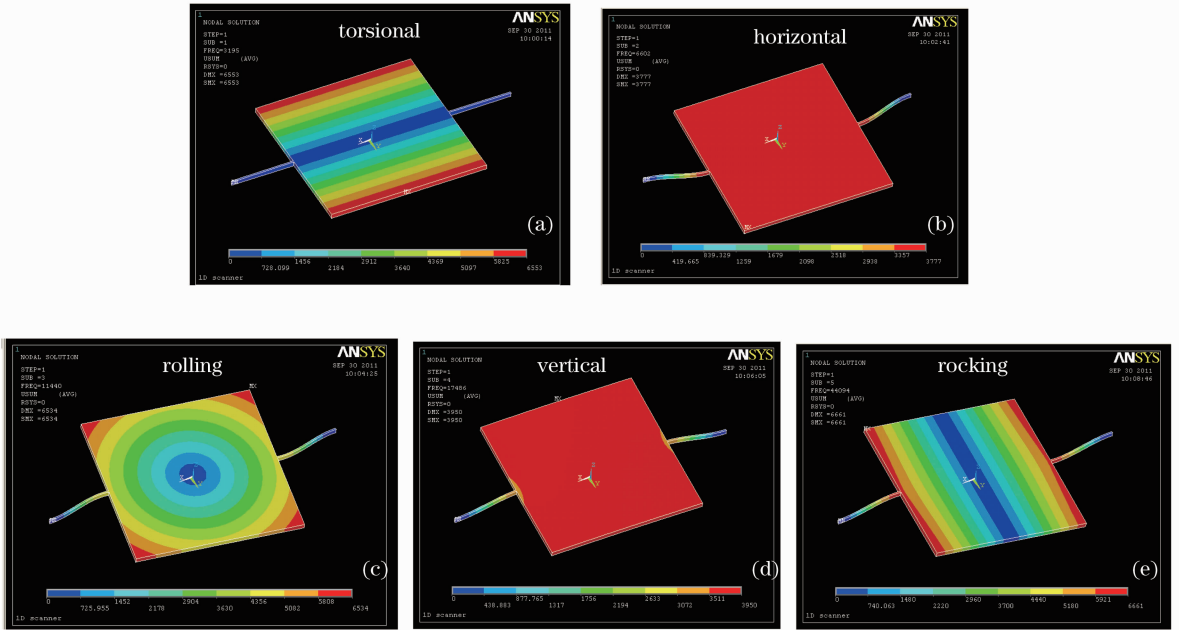


图 4 方形微扫描镜的五阶振动模式图。(a)扭转；(b)水平；(c)轧制；(d)垂直；(e)摇摆

Fig. 4 Five fundamental vibration modes of square mirror. (a) Torsional; (b) horizontal; (c) rolling; (d) vertical; (e) rocking

表 2 设计的方形扫描镜的理论模态频率和 ANSYS 仿真对比

Table 2 Mode frequencies of square mirror-comparison of analytical and FEA results

Mode Method	Torsional	Vertical	Horizontal	Rocking	Rolling
Theory /Hz	410	2533	3524	7599	14592
Ansys /Hz	380	2577	3581	4725	11949
Error /%	7.3	1.7	1.6	37.8	18.1

表 3 设计的圆形扫描镜的理论模态频率和 ANSYS 仿真对比

Table 3 Mode frequencies of circular mirror-comparison of analytical and FEA results

Mode Method	Torsional	Vertical	Horizontal	Rocking	Rolling
Theory /Hz	516	2858	4592	8575	19481
Ansys /Hz	491	2907	4017	5250	14228
Error /%	4.8	1.7	12.5	38.8	27.0

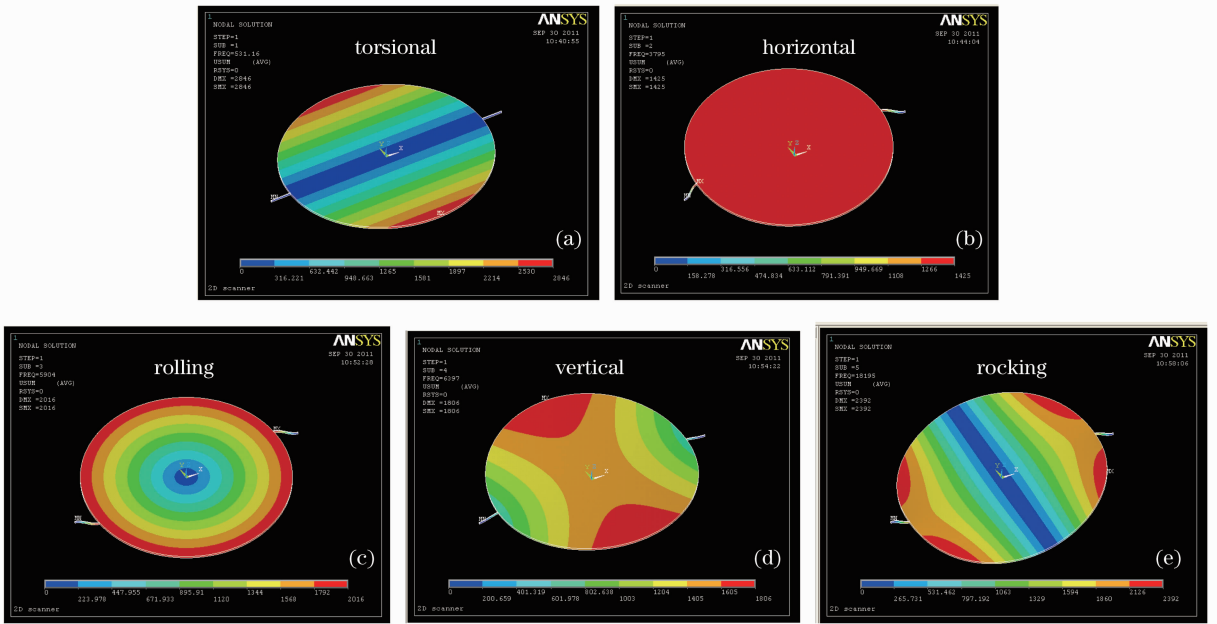


图 5 圆形微扫描镜的五阶振动模式图。(a)扭转；(b)水平；(c)轧制；(d)垂直；(e)摇摆

Fig. 5 Five fundamental vibration modes of circle mirror. (a) Torsional; (b) horizontal; (c) rolling; (d) vertical; (e) rocking

4 谐振频率的测试

4.1 根据迟滞特性推算

图 6 给出了一个典型的 MEMS 器件参数激励系统的迟滞频率响应^[11]。当从高的频率到低的频率进行频率扫频时，随着驱动频率的降低，扫描的振幅逐步增大，当驱动频率为器件谐振频率的二倍时 ($f_1 = 2f_r$)，扫描的振幅达到最大。若继续扫描更低的驱动频率，则扫描镜突然停止运动。反之，当从低的频率到高的频率进行频率扫频时，随着驱动频率升高到 f_2 ($f_2 > 2f_r$)，扫描镜的振幅突然增大，随着频率继续增大，扫描镜的振幅逐渐减小。通过两种不同扫描方式达到最大振幅时的驱动频率不同 ($f_1 \neq f_2$)，这种现象称为迟滞频率响应。

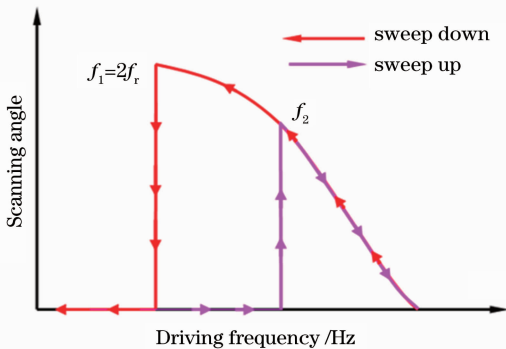


图 6 典型的参数激励系统迟滞频率响应

Fig. 6 Typical hysteresis frequency responses

实验测量系统装置如图 7 所示。在实验测试中，保持驱动电压幅值不变，通过改变电压的频率，然后记录 MEMS 扫描镜的扫描角度大小。激励扫描镜信号是由信号发生器产生的，经过高压放大器后驱动扫描镜。实验选用的是台湾品极 PINTEK HA-400 型号高压放大器，最大带宽可达到 300 kHz，最大输出电压可达到 ± 200 V。光源采用波长为 532 nm 的绿色半导体激光器，其产生的点光源经过高速旋转的扫描镜，将成为一个绿色的扫描线。为其测定扫描镜的扫描角度，采用激光三角法测量原理进行测量，若扫描镜到接收屏的距离为 S ，扫描线

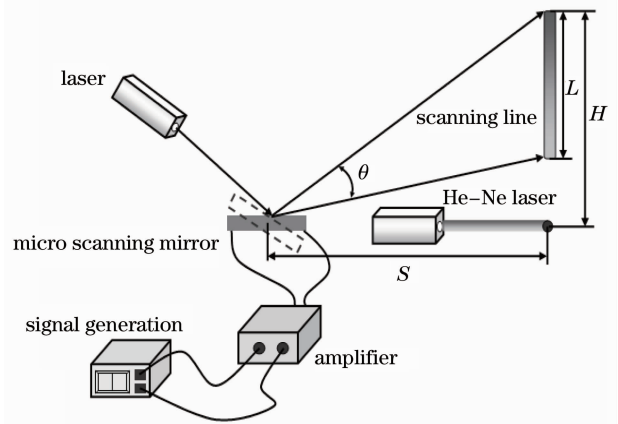


图 7 扫描角度及迟滞频率响应测试装置

Fig. 7 Schematic design and photograph of measurement setup using optical method

的长度为 L , 扫描线的顶端到基准点的距离为 H , 波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器的光斑为基准点 (红色光斑所示), 则机械扫描角度可表示为

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{H}{S} - \arctan \frac{H-L}{S} \right). \quad (3)$$

图 8 分别给出了测量所得到的方形和圆形的 MEMS 器件的迟滞频率特性。从图中可以看出, 方形扫描镜在电压为 10 V , 驱动频率为 556 Hz 时, 扫描角度大约为 6° 。同样地, 圆形扫描镜在驱动频率

为 596 Hz 时, 扫描角度大约为 5° 。根据上面迟滞特性的分析和讨论, 所设计圆形 MEMS 扫描镜和方形 MEMS 扫描镜的谐振频率为分别在 $596/2=298 \text{ Hz}$ 和 $556/2=278 \text{ Hz}$ 附近。这与理论分析和 ANSYS 仿真有一定的偏差, 主要是由于空气场阻尼、边缘场效应、加工误差以及 ANSYS 软件中未考虑梳齿等因素有关。

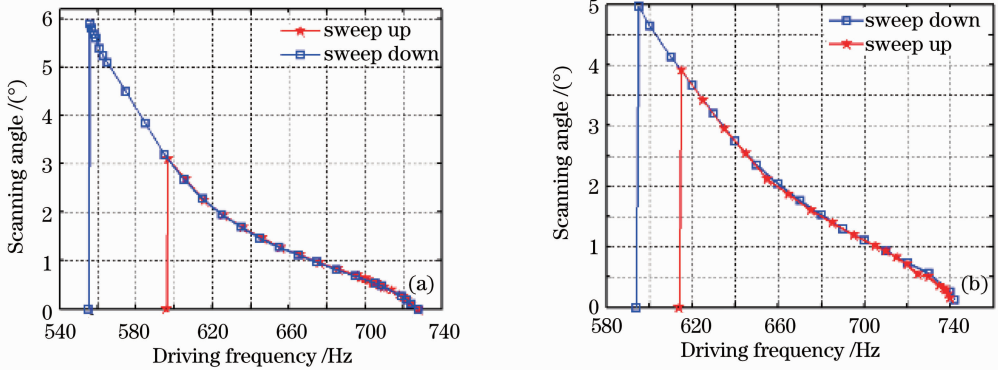


图 8 两种形状扫描镜迟滞频率响应。(a) 方形; (b) 圆形

Fig. 8 Hysteretic frequency responses of two shapes of mirrors. (a) Square mirror; (b) circular mirror

4.2 激光多普勒的测试

在 MEMS 器件的谐振频率测试中, 利用激光多普勒技术测量是最为常见的一种方法^[12]。利用激光多普勒技术测量 MEMS 运动主要是基于多普勒效应, 即由于波源和接收器的相对运动引起的波运动 (电磁波或任何其他形式的波) 的频率变化, 这一频率变化包含了 MEMS 结构的运动信息。本文采用德国 POLYTEC 公司的 MSA-500-M 型号的激光

多普勒测振仪, 该器件具有最小速度 $2 \mu\text{m/s}$, 最大带宽 24 M , 测量的装置如图 9 所示。图 10 给出圆形扫描镜的软件操作界面, 可以看出 1 阶谐振频率为 300 Hz ; 利用同样的测试方法可测得方形扫描镜的 1 阶谐振频率为 277 Hz 。对比利用迟滞特性测试两种扫描镜的谐振频率, 两种实际测量谐振频率结果的基本一致。

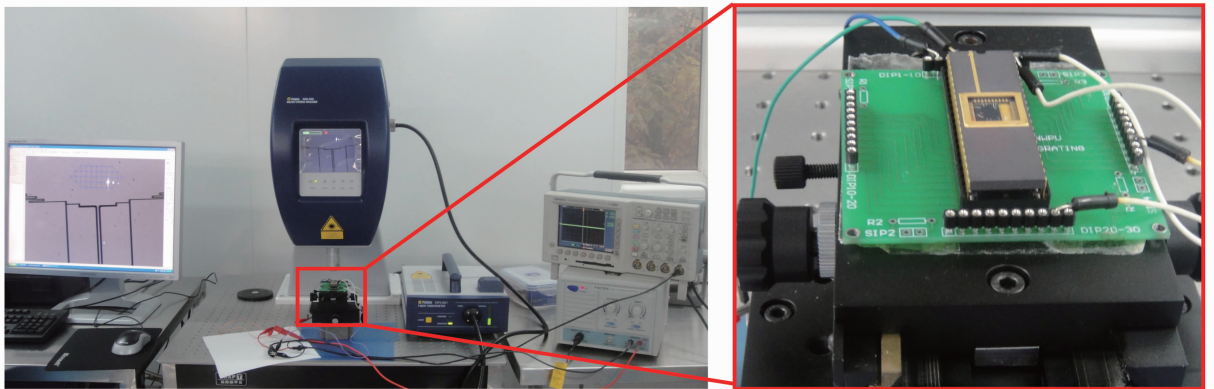


图 9 激光多普勒测振装置

Fig. 9 Measurement setup of laser Doppler vibrometer

5 结 论

设计并加工制作了一种基于 MEMS 技术的静

电梳齿驱动的新型谐振式扫描镜, 该器件充分利用结构释放所产生的应力能对垂直梳齿造成偏差这个

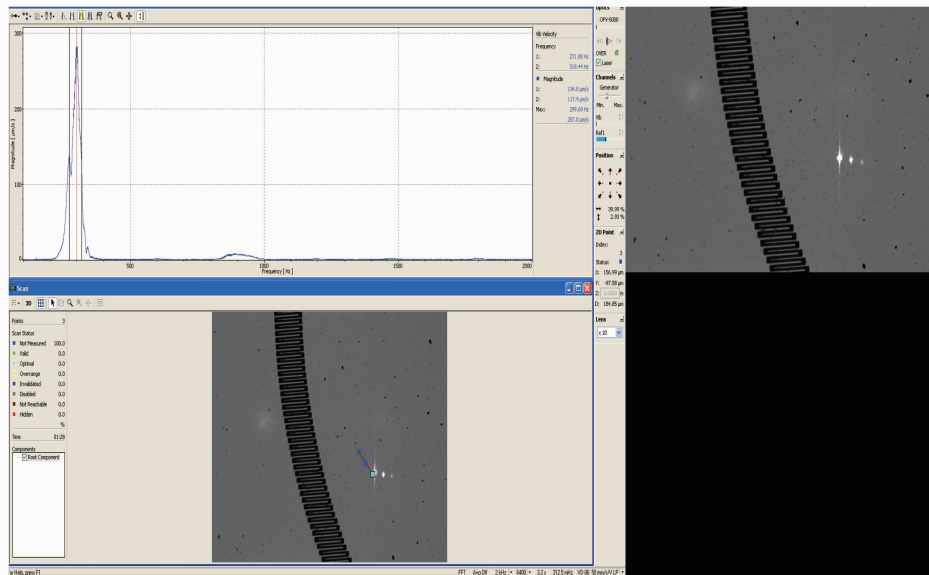


图 10 激光多普勒测试软件界面

Fig. 10 Software interface of laser Doppler vibrometer

特性,将梳齿的偏差作为启动电极。在工作电压 10 V,方形和圆形扫描镜的驱动频率分别为 556 Hz 和 596 Hz 时,机械扫描角度分别可达到约 6° 和 5° 。因此,该器件具有制作工艺简单,低电压、低功耗等优点。针对该器件的最主要的性能参数—谐振频率进行了理论分析、ANSYS 仿真与实际测量,分析误差产生原因。根据迟滞特性和 LDV 两种方法进行谐振频率的测试得出,所制作的 MEMS 扫描镜的两种结构(圆形和方形)的谐振频率大约为 300 Hz 和 277 Hz。通过本文介绍的理论计算、仿真分析方法以及测试系统可以很方便地获得该器件的谐振频率,这对器件的正常操作和深入的研究具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 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, **11**(30): 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
- 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 Yu Yiting, Yuan Weizheng, Wang Lanlan *et al.*. Theoretical analysis and experiment on measurement of the maximum blazing angle for micro programmable 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
- 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 Ke-Min Liao, Yi-Chih Wang, Chih-Hsien Yeh *et al.*. Closed-loop adaptive control for torsional micromirrors [C]. *SPIE*, 2004, **5346**: 184~192
- 6 Veljko Milanovic. Laterally actuated torsional micromirrors for large static deflection [C]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(2): 245~247
- 7 R. Conant, J. Nee, K. Lau *et al.*. A flat high-frequency scanning micromirror[C]. 2000 Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 2000, 6~9
- 8 C. Tsou, W. T. Lin, C. C. Fan *et al.*. A novel self-aligned vertical electrostatic combdrives actuator for scanning micromirrors[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, **15**(4): 855~860
- 9 Liu Bingzheng, Peng Jianhua. *Nonlinear Dynamics*[M]. Beijing: High Education Press, 2004
刘秉正, 彭建华. *非线性动力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- 10 H. Urey, C. Kan, W. O. Davis. Vibration mode frequency formulae for micromechanical scanners [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, **15**(9): 1713~1721
- 11 F. Filhol, E. Defay, C. Divoux *et al.*. Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning[J]. *Sens. Actuators A; Phys.*, 2005, **123-124**(9): 483~489
- 12 Leng Changlin. *MEMS Motion Measurements Based on Laser Doppler Technology* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. 9~12
冷长林. *基于激光多普勒技术的微机电系统运动检测*[D]. 天津: 天津大学, 2006. 9~12