

一种新型静电驱动二维微型扫描镜的设计及模态

刘耀波¹ 苑伟政¹ 乔大勇¹ 杨璇¹ 梁晓伟¹ 练彬²

(¹ 西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)
² 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 设计并加工制作了一种基于绝缘体上硅(SOI)制备工艺的新型静电驱动二维微型扫描镜,并对其工作原理进行了分析。为了有效预测该微型扫描镜的谐振频率及相应的振态,采用有限元分析软件 ANSYS 对其进行建模和前五阶模态的仿真,并从理论上分析了前两阶扭转模态谐振频率的计算方法。使用激光多普勒测振仪对该扫描镜的谐振频率进行了测量。测量结果表明,二维微型扫描镜前两阶扭转模态的谐振频率分别为 402 Hz 和 1218 Hz。该测量结果与软件仿真结果基本吻合,少许差异是由于在仿真模态时未考虑梳齿结构、空气阻尼及环境温度等因素造成的。本研究对设计出结构更简单的静电驱动微型扫描镜有重要的参考价值。

关键词 光学器件;绝缘体上硅;微型扫描镜;模态仿真;谐振频率

中图分类号 TN303 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0623001

Design and Modes of a Novel Two-Dimensional Microscanner with Electrostatic Actuation

Liu Yaobo¹ Yuan Weizheng¹ Qiao Dayong¹ Yang Xuan¹ Liang Xiaowei¹ Lian Bin²

¹ Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

² Northwestern Polytechnical University Shenzhen Institute, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract A novel two-dimensional microscanner with electrostatic actuation is designed and fabricated based on silicon-on-insulator (SOI) technology, and the driving principle is analyzed for microscanner. Then the finite element analysis software of ANSYS is used to simulate the models of the first five orders, and the methods to calculate the resonant frequencies are analyzed for expected torsional modes theoretically. The resonant frequencies are measured by laser Doppler vibrometer. The results show that the microscanner could oscillate at the inherent frequencies of 402 Hz and 1218 Hz around the two rotational axes, which are consistent with the simulation results. The slight difference is caused by factors such as the model without comb structures, air damping and environmental temperature. This study is meaningful to design a microscanner actuated electrostatically with simpler structure.

Key words optical devices; silicon-on-insulator; microscanner; mode simulation; resonant frequency

OCIS codes 230.3990; 230.4040

1 引 言

随着美国 TI 公司利用微机电系统(MEMS)技术成功研制了数字微镜器件并在投影领域取得了巨

大成功^[1],使用 MEMS 技术研制出更多具有体积小、重量轻、功耗低及成本少等优点的光学器件成为了光学领域的一个重要发展方向,微型扫描镜就是

收稿日期: 2013-01-24; 收到修改稿日期: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(50805123)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0075)和深圳市财政委员会 2012 年第四批市新一代信息技术产业发展专项资金基础研究计划(JCYJ20120614154203639)资助课题。

作者简介: 刘耀波(1984—),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: liuyaobo2000@163.com

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

其中的典型代表。作为一种重要的光学元件,微型扫描镜可以改变光束的传播方向,进而实现光束在一维或者二维区域的循环扫描,在光通信、条码识别、投影显示及生物医学等领域有着广阔的应用前景^[2~8]。

根据驱动方式的不同,微型扫描镜可以分为静电驱动、电磁驱动、压电驱动和电热驱动等四类。相比于其他三种驱动类型,静电驱动方式具有结构简单、功耗低、谐振频率高及制备技术与集成电路(IC)工艺完全兼容等优点,是国内外许多科研单位的研究热点^[9,10]。目前,静电驱动方式包括平行平板驱动、横向梳齿驱动及垂直梳齿驱动三种结构,每种结构都具有其各自的优缺点。平行平板结构是使用最早、结构最简单的驱动方式,但非线性驱动力和下拉现象严重制约了微型扫描镜的工作范围及应用场合。横向梳齿结构具有在平面内产生与驱动电压成正比的线性位移的特点,适用于产生面内的平动或转动;虽然利用这种结构也可以实现微型扫描镜的扭转,但是驱动器的结构也会相对复杂,并且其谐振频率不高。垂直梳齿驱动是由一对或几对在垂直方向有高度差的动、静梳齿组合而成,非常适合产生扭转等离面运动,虽然制造动、静梳齿的高度差在一定程度上增加了驱动器的制作工艺,但是出色的运动特性依然使其成为了大多数静电驱动微型扫描镜驱动结构的选择。

本文首先采用 MEMS 技术设计并制作了一种可用于二维空间扫描的新型静电驱动二维微型扫描镜,对其工作原理进行了分析。其次,为了了解器件的工作模式,采用有限元分析软件 ANSYS 对其进行建模和模态仿真,并从理论上计算了其在期望扭转方向的谐振频率。最后,为了检验器件软件仿真及理论计算的正确性,使用激光多普勒测振仪(LDV)对其谐振频率进行了测量并对实验结果进行了分析。

2 设计

设计的静电驱动二维微型扫描镜包含了两组垂直梳齿驱动器,从内至外依次分布于镜面、可动框架和外框架等三部分结构,其结构示意图如图 1 所示。为了实现微型扫描镜的二维扫描,扫描镜包含了两组互相垂直的扭转梁——两根内部扭转梁和两根外部扭转梁,分别连接镜面至可动框架和固定框架。此外,由于两组垂直梳齿驱动器需要施加不同的激励信号,设计了沟道隔离结构以保证镜面、可动框架和外框架等三部分结构在机械连接的同时彼此之间

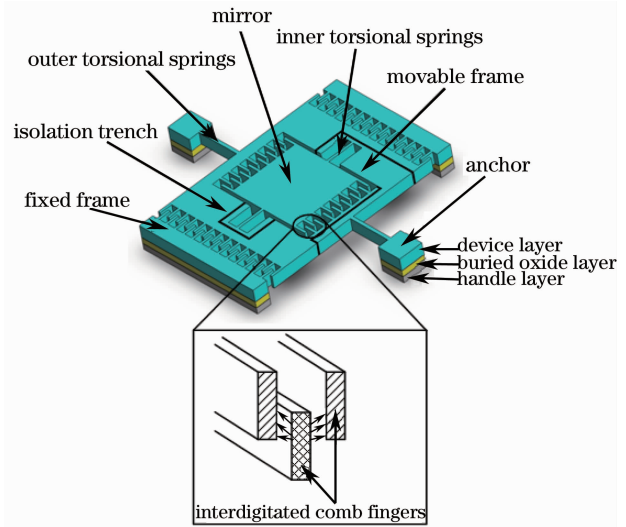


图 1 二维微型扫描镜的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram for the two-dimensional microscanner

电气隔离。

为了简化垂直梳齿驱动器的加工工艺,采用了绝缘体上硅(SOI)制备技术设计二维微型扫描镜。由于镜面、可动框架和外框架等主体结构都位于结构层,因此理论上两组梳齿驱动器的动、静梳齿位于同一平面进而导致扫描镜无法正常启动,但是在实际的加工过程中由于应力释放等因素会造成结构翘曲,因而扫描镜可以正常启动。表 1 给出了设计的二维微型扫描镜的主要结构参量。图 2 为制造出的静电驱动二维微型扫描镜的样件,封装后的器件如图 3 所示。

表 1 二维微型扫描镜的主要结构参量

Table 1 Main structural parameters for the two-dimensional microscanner

Structural parameter	Value / μm
Mirror plate	1500×1500
Inner torsional springs length	400
Inner torsional springs width	10
Outer torsional springs length	300
Outer torsional springs width	10
Outer frame length	2900
Outer frame width	2300

本质上,二维微型扫描镜的驱动原理可以分解为两个一维静电微型扫描镜的驱动,镜面的运动状态也可以分解为绕两组梁的扭转运动。图 4 给出了方波信号驱动时二维微型扫描镜绕其中一组梁的运动状态。在初始状态时,由于两侧静梳齿和动梳齿之间存在垂直偏差,当对其两部分施加电压时,由于彼此间存在静电力,动梳齿会向静梳齿运动,从而带

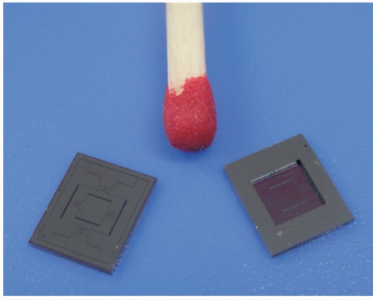


图 2 制造的二维微型扫描镜样件

Fig. 2 Samples of the fabricated two-dimensional microscanner

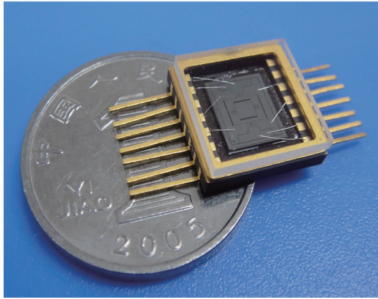


图 3 二维微型扫描镜的封装

Fig. 3 Packages of the two-dimensional microscanner

动镜面扭转至平衡位置；当经过平衡位置时（即动、静梳齿之间无垂直偏差），取消激励电压，镜面依靠惯性会继续旋转直至由于扭转梁的回复力使其停止，此时镜面的扭转角度为扫描镜旋转运动的振幅；

然后，在动、静梳齿之间再施加电压，扫描镜又会重新向平衡位置转动。如此往复，扫描镜会随着激励电压的高低周期变化做谐振运动。此外，从图 4 中还可以看出激励信号的频率与扫描镜的谐振频率之间存在两倍的关系。除了方波可以驱动二维微型扫描镜以外，驱动信号还可以采用正弦波、三角波或者锯齿波等，其中方波的驱动效率最高。

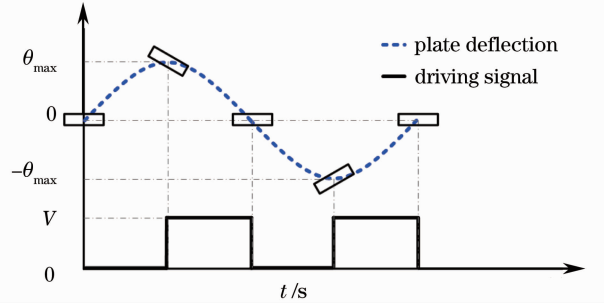


图 4 微型扫描镜的工作原理

Fig. 4 Operating principle of the microscanner

3 理论计算及仿真

为了有效预测二维微型扫描镜的谐振频率及相应的振态，采用 ANSYS 软件对其进行模态分析。由于梳齿结构对扫描镜模态分析的影响很小，因此为了方便建模和简化计算，几何模型中未考虑梳齿结构。在 ANSYS 软件中，模型采用 SOLID187 结构体单元，网格自由划分，使用 Block Lanczos 算法进行模态求解。微型扫描镜的加工材质为硅，其材

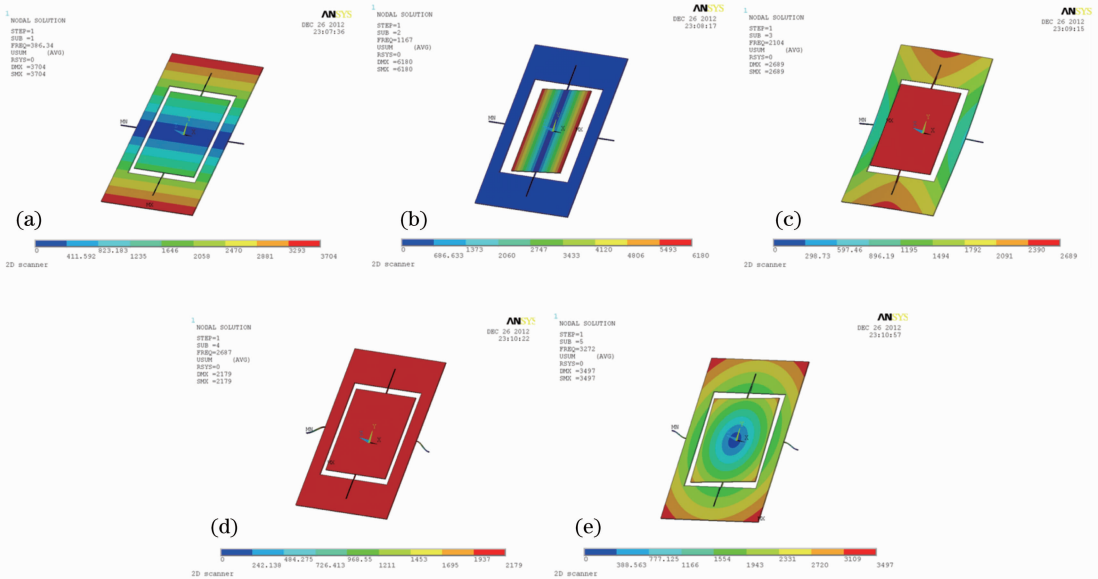


图 5 微型扫描镜的前五阶模态振动图。(a) 一阶模态；(b) 二阶模态；(c) 三阶模态；(d) 四阶模态；(e) 五阶模态

Fig. 5 Modes of the first five orders for microscanner. (a) First-order mode; (b) second-order mode; (c) third-order mode; (c) fourth-order mode; (c) fifth-order mode

料属性如下:杨氏模量 130 GPa,泊松比 0.22,密度 2.33 g/cm³。采用表 1 所示参数设计的二维微型扫描镜的前五阶振动模式如图 5 所示,分别为:镜面和可动框架绕 X 轴扭转(一阶振型)、镜面绕 Y 轴扭转(二阶振型)、镜面沿 Z 轴平动(三阶振型)、镜面和可动框架沿 Y 轴平动(四阶振型)、镜面和可动框架绕 Z 轴扭转(五阶振型),其中前两阶振型是扫描镜期望的运动形式。

由于二维微型扫描镜镜面和可动框架的运动是相对独立的,因此对微型扫描镜进行模式分析时可以将其简化成对两个一维扫描镜的模式分析,区别在于计算一阶振型时质量块包括可动框架和镜面,而计算二阶振型时质量块只包含镜面。

图 6 为一维微型扫描镜的简化结构示意图。当在镜面绕 X 轴方向施加大小为 T 的扭矩时,镜面会发生转动;此时若去掉该扭矩,在不考虑阻尼的情况下该扫描镜会处于运动平衡状态,其角运动平衡方程可表示为

$$J_{m,xx} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{2K}{L_f}\theta = 0, \quad (1)$$

式中 θ 表示镜面的机械扭转角, $J_{m,xx}$ 表示镜面绕 X 轴的转动惯量,对于矩形镜面,其值为

$$J_{m,xx} = \frac{\rho L_m D t_m}{12} (D^2 + t_m^2). \quad (2)$$

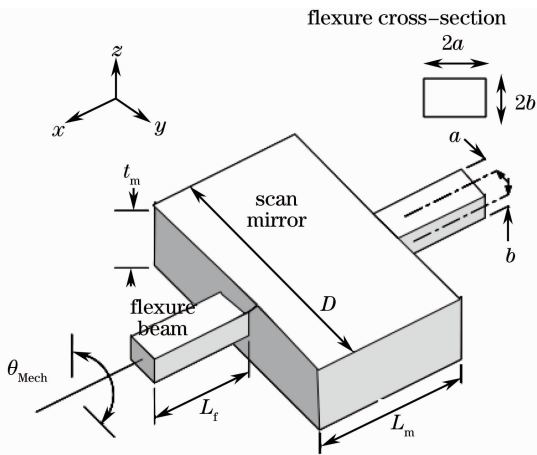


图 6 一维微型扫描镜的简化结构示意图

Fig. 6 Simplified structural diagram for the one-dimensional microscanner

对(1)中进行求解,可得

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega = 2\pi f, \quad (3)$$

因此,绕 X 轴扭转的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2K/(L_f J_{eff})}, \quad (4)$$

其中 J_{eff} 为扫描镜的有效转动惯量,对于矩形镜面和

矩形扭转梁,其值为

$$J_{eff} = \frac{\rho L_m D t_m}{12} (D^2 + t_m^2) + \frac{8}{9} ab L_f (a^2 + b^2). \quad (5)$$

(1)式和(4)式中的 K 表示扫描镜扭转梁的扭转弹性常数,其大小取决于柔性梁横截面的形状和材料的各向异性系数:

$$K = \frac{2^{12} ab}{\pi^6} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \sum_{\substack{m=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2} \left(\frac{m^2}{a^2 G_{xz}} + \frac{n^2}{b^2 G_{xy}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

式中 a 是梁的半宽, b 是梁的高。

当 $a\mu > b$ 时,(6)式可近似为以下形式:

$$K \approx (ab^3 G_{xy}) \left[5.33 - 3.66 \frac{b}{a} \frac{1}{\mu} \left(1 - \frac{b^4}{12a^4 \mu^4} \right) \right], \quad (7)$$

其中 $\mu = \sqrt{G_{xz}/G_{xy}}$ 取决于材料的各向异性。对于各向同性材料,它的取值为 1。

反之,如果 $a\mu < b$,则需要将(6)式和(7)式中的 $a\mu$ 乘积与 b 互换,并且 G_{xy} 和 G_{xz} 也应该互换。通常情况下,硅材料(各向异性)的 μ 取值 1.248。

表 2 为方形扫描镜前两阶模式谐振频率的理论计算结果和 ANSYS 软件仿真结果。经过对比后可以得知:两者的一阶模式结果差异较大,而二阶模式结果差异较小。这是由于在计算扫描镜的一阶模式时,理论计算方法把可动框架和镜面作为一个完整的矩形质量块进行计算(如图 6 所示),而使用 ANSYS 建模时虽未考虑完整的梳齿结构但却增加了可动框架和镜面之间存在放置梳齿结构的空隙[如图 5(a)所示],因此两种方法的计算结果差异较大;另一方面,在计算扫描镜的二阶模式时,理论计算和 ANSYS 软件仿真都只针对镜面,因此两者的计算结果差异较小。

表 2 方形扫描镜模式频率的理论计算结果和 ANSYS 仿真结果

Table 2 Theoretical results and ANSYS simulation results of the mode frequencies for square mirror

Method	Torsional around X-axis	Torsional around Y-axis
ANSYS /Hz	386	1167
Theory /Hz	418	1200
Error /%	8.29	2.83

4 测 试

由于二维微型扫描镜是一种谐振式扫描器件,其工作频率位于自身谐振频率的附近,因此对其谐振频率进行测试具有重要的实用价值。激光多普勒

检测方法是一种光学检测方法,具有非接触测量、分辨率高及响应快等特点,非常适用于检测 MEMS 器件的机电性能。激光多普勒检测方法的工作原理是多普勒效应,即光源发出的激光束经运动的器件表面反射后光束的频率会发生改变,通过检测该频移信息就可以计算出器件的运动信息。采用 Polytec MSA-500-M 激光多普勒测振仪,该仪器的最小测量速度为 $2 \mu\text{m/s}$,最大测量带宽为 24 MHz。测量装置示意图如图 7 所示。

图 8 分别给出了激光多普勒测振仪的测试软件界面及使用其对二维微型扫描镜谐振频率的检测结果。显然,检测区域位于镜面梳齿驱动器,扫描镜在一阶模态(绕 X 轴扭转)的谐振频率为 402 Hz,二阶模态(绕 Y 轴扭转)的谐振频率为 1218 Hz,即当频率为 804 Hz 和 2436 Hz 的外部驱动信号施加在该扫描镜上时,其可以在 X 方向上以 402 Hz 的频率做简谐振动,同时可以在 Y 方向上以 1218 Hz 的频率做简谐振动,该测量结果与 ANSYS 软件的仿真

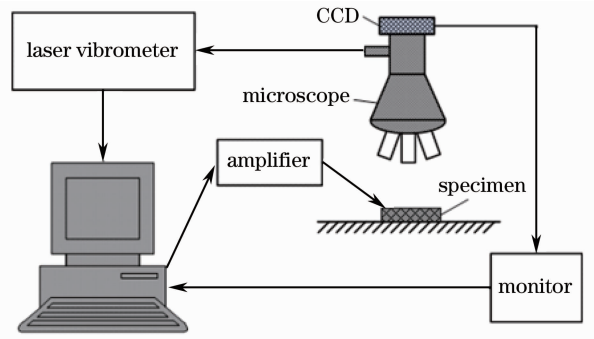


图 7 激光多普勒检测方案的装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental setup using laser Doppler vibrometer

结果对比如表 3 所示。实际测量结果与软件仿真结果基本吻合,少许差异主要是由于在使用 ANSYS 软件建模时只考虑了可动框架和镜面之间存在放置梳齿结构的空隙,而未完整考虑位于其上的梳齿驱动结构;此外,在使用 ANSYS 仿真计算模态时未考虑空气阻尼及环境温度等因素也会造成实际测量结果和仿真结果之间的差异。

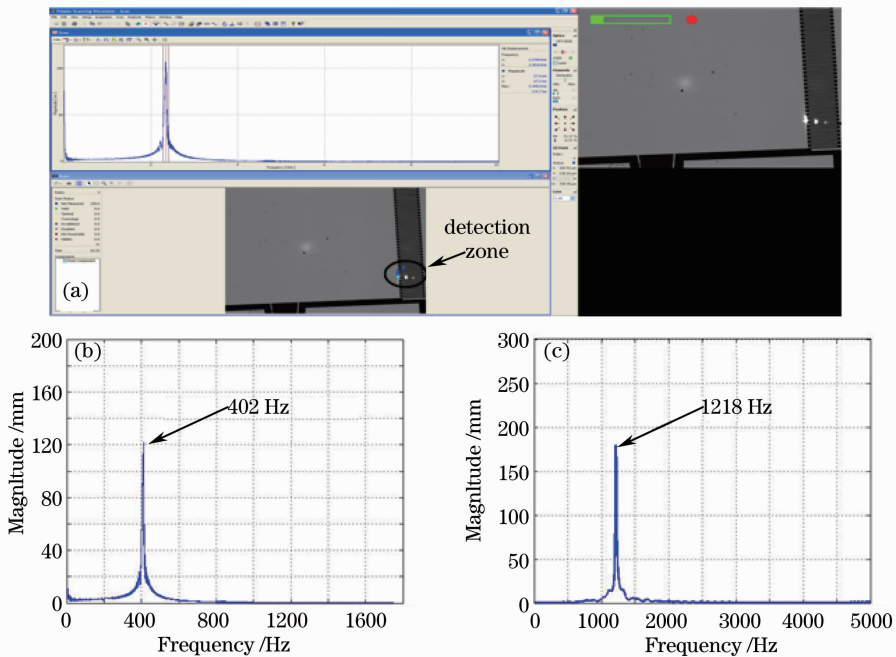


图 8 微型扫描镜谐振频率的测量结果。(a) 测试软件界面;(b) 一阶模态;(c) 二阶模态

Fig. 8 Measurement results of the resonant frequencies for microscanner. (a) Test software interface; (b) first-order mode; (c) second-order mode

表 3 方形扫描镜模态频率的实际测量结果和 ANSYS 仿真结果

Table 3 Measurement results and ANSYS simulation results of the mode frequencies for square mirror

Method	Torsional around X-axis	Torsional around Y-axis
ANSYS /Hz	386	1167
Measurement /Hz	402	1218
Error /%	4.15	4.37

5 结 论

设计并加工制作了一种基于 SOI 制备工艺的新型静电驱动二维微型扫描镜,并对其工作原理进行了分析;由于该扫描镜的动、静梳齿都设计在器件层,是利用结构释放的应力产生垂直梳齿偏差,因此相比于其他垂直梳齿驱动扫描镜,该器件的结构和加工工艺更为简单。为了有效预测该微型扫描镜的谐振频率及相应的振态,采用 ANSYS 软件对其进行建模和前五阶模态的仿真,并从理论上分析了前两阶扭转模态谐振频率的计算方法。通过激光多普勒测振仪对该器件的谐振频率进行测量,得到其前两阶扭转模态的谐振频率分别为 402 Hz 和 1218 Hz,与仿真结果基本吻合。本研究对设计出结构更简单的静电驱动微型扫描镜并有效预测二维微型扫描镜的谐振频率有重要的参考价值。更多关于该微型扫描镜机电特性方面的测试将会在后续工作中展开。

参 考 文 献

- 1 D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]. *SPIE*, 2003, **4985**: 14~25
- 2 P. D. Dobbelaere, K. Falta, L. Fan *et al.*. Digital MEMS for optical switching [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002,

40(3): 88~95

- 3 D. Hah, S. Huang, H. Nguyen *et al.*. Low-voltage, large-scan angle MEMS analog micromirror arrays with hidden vertical comb-drive actuators [J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2004, **13**(2): 279~289
- 4 C. Winter, L. Fabre, F. Lo Conte *et al.*. Micro-beamer based on MEMS micro-mirrors and laser light source [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, **1**(1): 1311~1314
- 5 J. Tauscher, W. O. Davis, D. Brown *et al.*. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics [C]. *SPIE*, 2010, **7594**: 75940A
- 6 A. D. Yalcinkaya, O. Ergeneman, H. Urey. Polymer magnetic scanners for bar code applications [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2007, **135**(1): 236~243
- 7 C. Chong, K. Isamoto, H. Toshiyoshi. Optically modulated MEMS scanning endoscope [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 133~135
- 8 H. K. Xie, J. J. Sun, S. G. Guo *et al.*. 3D endoscopic optical coherence tomography based on rapid-scanning MEMS mirrors [J]. *Opt. Express*, 2009, **18**(12): 12065~12075
- 9 Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong *et al.*. Study on resonant frequency for a novel MEMS micro scanning mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0623004
燕 斌, 苑伟政, 乔大勇 等. 一种新型微机电系统扫描镜的谐振频率研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0623004
- 10 Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong *et al.*. Novel resonant micro-opto-electro-mechanical scanning mirror and Lissajous pattern display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0523003
燕 斌, 苑伟政, 乔大勇 等. 一种新型谐振式微机电系统扫描镜及其利萨如图形显示[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0523003

栏目编辑: 韩 峰