

Influence of Comb Distribution on the Twisting Amplitude of Two-Dimensional Microscanner Actuated Electrostatically*

QIAO Dayong^{1,2*}, YANG Xuan^{1,2}, XIA Changfeng^{1,2}, ZENG Qi^{1,2}, PAN Chunhui^{1,2}, LIAN Bin³

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

2. Shaanxi Province Key Laboratory of Micro and Nano Electro-Mechanical Systems, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Northwestern Polytechnical University Shenzhen Institute, Shenzhen Guangdong, 518057, China)

Abstract: In order to increase the deflection, the effect of comb structure on the twisting amplitude for two-dimensional (2D) microscanner is researched on basis of the nonlinear dynamics theory in this paper, and it can be obtained that the effect of the divergent distribution is superior to parallel distribution. Besides, the samples are fabricated based on silicon-on-insulator (SOI) technology, and then the electromechanical characteristic is tested. The test results demonstrate the microscanner with divergent comb distribution has greater twisting amplitude, which agrees with the theoretical analysis. The microscanner with divergent distribution could generate maximum twisting angles of 12.3° and 13.49° under the square wave of 42 V, while the sample with parallel distribution could generate maximum twisting angles of 10.25° and 11.68° under the same square wave.

Key words: MEMS; microscanner; nonlinear dynamics theory; comb distribution; large deflection

EEACC: 2575

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.02.005

梳齿分布结构对静电驱动二维微扫描镜机械转角的影响*

乔大勇^{1,2*}, 杨璇^{1,2}, 夏长锋^{1,2}, 曾琪^{1,2}, 潘春晖^{1,2}, 练彬³

(1. 西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072; 2. 西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室, 西安 710072;

3. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 为增大静电驱动二维微扫描镜的机械转角, 基于非线性动力学理论研究了不同梳齿结构对其振幅的影响, 理论上得到发散型梳齿分布相较于平行型梳齿分布具有更大的机械转角。此外, 采用绝缘体上硅 (SOI) 加工工艺设计并制作了这两种结构的微扫描镜, 并对其相关特性进行了测试。测试结果表明: 在相同的驱动电压下, 发散型结构始终都比平行型结构具有更大的机械转角, 与仿真结果基本一致; 当加载驱动电压为 42 V 的方波信号时, 发散型结构扫描镜的可动框架和镜面的最大机械转角可以达到 12.3° 、 13.49° , 而平行型结构扫描镜的可动框架和镜面的最大机械转角则为 10.25° 、 11.68° 。

关键词: MEMS; 扫描镜; 非线性动力学; 梳齿分布; 大转角

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)02-0172-06

微扫描镜作为一种重要的光学元件, 可以使入射光束的传播方向发生改变, 尤其是二维扫描镜, 可以实现光束在二维区域的面扫描, 可以广泛的应用于激光成像、印刷、数据存储、条码识别、光通信、显示监控和生物医学等领域^[1-8]。静电驱动微扫描镜具有结构简单、体积较小, 且与 IC 工艺兼容的优势, 从而成为研究的热点, 但此驱动方式由于光学扫描角度小, 限制了其应用领域。Harald Schenk 等人在 2000 年提

出了发散梳齿分布可以增大微扫描镜的振幅, 然而遗憾的是未对其进行详细的理论分析^[9]。

本文基于动力学理论研究了梳齿分布对于静电驱动微扫描镜的扫描角度的影响, 并得到了一种具有较大机械转角的微扫描镜结构。首先对两种梳齿分布的微扫描镜的阻尼和电容变化率进行了仿真, 并仿真了其幅频特性曲线。其次, 使用 SOI 工艺制作了两种梳齿分布的微扫描镜, 实际测试了两种梳

项目来源: 国家自然科学基金项目 (51375399, 51375400); 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项目 (JCYJ20120614154203639); 西北工业大学基础研究基金项目 (JCY20130119); 航空科学基金项目 (2013ZC53036)

收稿日期: 2013-11-22 修改日期: 2014-02-27

齿分布微扫描镜的幅频特性和最大扫描角度。

1 理论分析

设计的二维微扫描镜的结构如图 1 所示, 微扫描镜由镜面、可动框架、固定框架及沟道组成, 包含了两组静电梳齿驱动器。由于沟道将镜面和外框架实现了电隔离, 本质上, 本文设计的二维微扫描镜的驱动原理可以分解为两个一维静电微扫描镜的驱动, 镜面的运动状态也可以分解为绕两组梁的扭转运动。

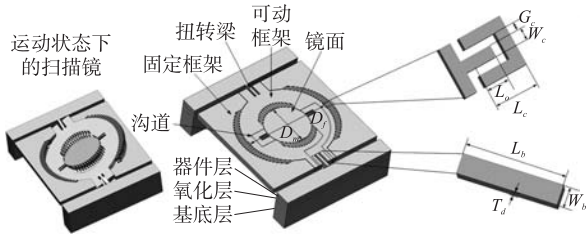


图 1 二维扫描镜结构图

当微扫描镜绕一组梁做谐振运动时, 可看作为一质量块在驱动力矩作用下绕其转轴振动, 其振动方程可描述为:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + k\theta = M \quad (1)$$

其中 I 为转动惯量, b 为阻尼系数, k 为扭转刚度, θ 为转动角度, M 为静电力矩。

若静电力矩为正弦扭矩, 即

$$M = A \sin \omega_d t \quad (2)$$

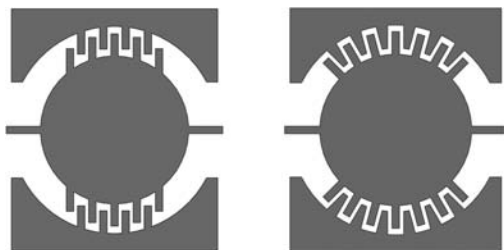
其中 ω_d 为驱动频率, A 为激励幅值。系统稳态响应为

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (3)$$

φ 为相位, θ_{\max} 为最大转角。其中,

$$\theta_{\max} = A / \sqrt{(k - I\omega_d^2)^2 + b^2 \omega_d^2} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 若激励幅值变大, 即静电力矩增大, 则最大转角增大; 阻尼增大, 则最大转角减少。对于静电梳齿驱动器而言, 静电力矩与阻尼系数的大小与微扫描镜的梳齿分布密切相关。因此, 为了增大静电驱动微扫描镜的谐振幅值, 本文设计了两种不同的梳齿分布结构——即发散型分布和平行型分布, 如图 2 所示。



(a) 平行型 (b) 发散型
图 2 不同梳齿分布微扫描镜示意图

由于梳齿排布方式不同, 在镜面直径相等且梳齿结构参数相等的情况下, 平行型扫描镜和发散型扫描镜的梳齿个数不同, 平行型扫描镜可看作沿直径方向均匀分布, 发散型扫描镜为沿镜面边缘周向分布, 若镜面布满梳齿, 则平行型扫描镜和发散型扫描镜的梳齿对数可由式(5)和式(6)得到。

$$N_p = D / (G_c + W_c) \quad (5)$$

$$N_d = \frac{1}{2} \pi D / (G_c + W_c) \quad (6)$$

其中 D 为扫描镜的直径, G_c 为梳齿间隙, W_c 为梳齿宽度, N_p 为平行型的梳齿个数, N_d 为发散型梳齿个数。

通过式(7)得到发散型扫描镜与平行型扫描镜的个数关系, 可看出发散型扫描镜的梳齿较平行型多。

$$N_d = \frac{1}{2} \pi N_p \quad (7)$$

为了研究不同梳齿分布对于微扫描镜转角的影响, 下面会分别计算出每一种结构的阻尼系数和静电力矩, 最后通过动力学方程系统的求解出一种性能较好的梳齿分布结构。表 1 为二维微扫描镜的主要结构参数。

表 1 二维微扫描镜主要结构参数

结构名称	参数符号	尺寸/ μm
器件层厚度	T_d	30
镜面直径	D_m	1250
可动框架直径	D_f	2500
扭转梁长度	L_b	400
扭转梁宽度	W_b	20
梳齿长度	L_c	90
梳齿宽度	W_c	5
梳齿间隙	G_c	4
重叠梳齿长度	L_o	80

1.1 阻尼

对微扫描镜而言, 阻尼主要来自于两个方面: 一种是由镜面排压气体所产生的压膜阻尼 (Squeeze-film Damping)^[10], 在微扫描镜运动过程中, 压强会产生变化, 从而导致其产生阻止扫描镜转动的力矩; 另一种为梳齿剪切气体所产生的滑膜阻尼 (Slide-film Damping)^[11]。微扫描镜的压膜阻尼的特征尺寸即提供转动的腔体深度为 $400 \mu\text{m}$, 而压膜阻尼的特征尺寸即梳齿之间的间隙只有 $4 \mu\text{m}$, 所以微扫描镜的阻尼主要来自梳齿之间产生的滑膜阻尼。

本文使用 CoventorWare 对梳齿滑膜阻尼进行仿真。对梳齿进行 Tetrahedrons 方式的网格划分,使用 DampingMM 求解器中的 Stokes flow 对梳齿间滑膜阻尼求解,得到微扫描镜转至 θ_i 时的瞬时阻尼系数 D_i 。因为微扫描镜各角度的瞬时阻尼系数不同,代入非线性方程后求解困难,需求得平均阻尼系数 D_a 。

微扫描镜运动近似于简谐运动,可通过式(8)得到转动至 θ_i 的时间。

$$\theta_i = \theta_{\max} \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

其中 f 为振动频率。

对不同时间下的阻尼系数进行数值积分后除以总时间,得到振幅为 θ_n 的平均阻尼系数。

$$D_a = 2f \cdot \sum_{i=1}^n (D_{i-1} + D_i) (t_i - t_{i-1}) \quad (9)$$

由以上公式得到的不同振幅对应的平均阻尼系数如图 3 所示。

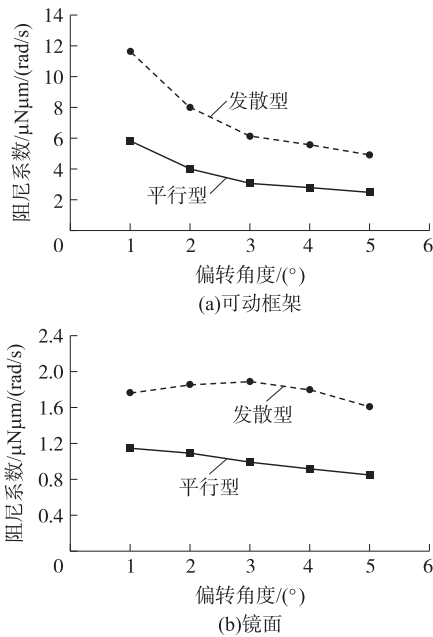


图 3 不同梳齿分布微扫描镜阻尼系数曲线

比较两种不同梳齿分布的微扫描镜,可看出发散型梳齿阻尼系数较平行型梳齿阻尼系数大,这主要是由于发散型结构比平行型结构在相同直径的可动框架和镜面上分布更多的梳齿对。从式(4)可知,在其他参数一定的情况下,为了增大扫描镜的振幅,需要减小阻尼系数,因此相对而言平行型结构更加符合大转角静电梳齿驱动器的设计要求。

1.2 静电力矩

梳齿驱动器所产生的静电力矩是影响扫描镜振幅的另外一个重要因素,当给梳齿驱动器施加静电力后,其静电力矩可由如下公式计算:

$$M = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial \theta} U(t) \quad (10)$$

其中 C 为全部梳齿电容, U 为电压。

可见静电力矩与梳齿电容变化率和电压成正比。在计算电容变化率时,由于存在边缘场效应,很难给出准确的表达式,但可首先使用 CoventorWare 提取扫描镜不同角度时的电容值,然后使用差分计算出电容变化率,最后通过如下经验公式进行拟合获得其表达式。

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = -b_1 \theta \exp(-b_2 |\theta|^{b_3}) \quad (11)$$

其中 b_1 、 b_2 和 b_3 为拟合参数。

图 4 为两种结构梳齿驱动器所对应的电容及电容变化率与扫描镜不同转角之间的对应关系。可以看出发散型结构的电容及电容变化率相比于平行型结构偏大,即在其他参数一定的情况下发散型结构可以提供更大的静电力,使扫描镜具有更大的偏转角度。

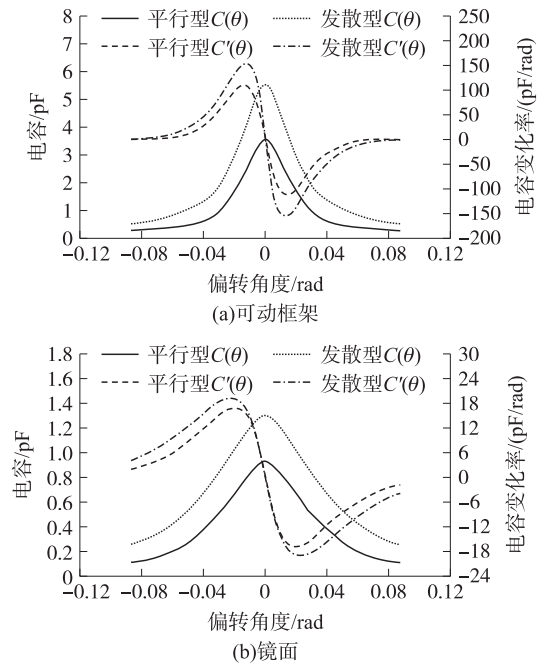


图 4 不同梳齿分布微扫描镜电容-转角特性及电容变化率曲线

1.3 非线性动力学分析

通过前面的分析可知:阻尼系数和静电力矩是影响梳齿驱动器振幅的两个重要因素,如果仅仅为了减小阻尼系数,应该采用平行型结构;如果为了获取大的静电力矩,应该采用发散型结构。为了客观及综合的评价两种梳齿分布结构对于增大驱动器振幅的程度,本文将得到的阻尼系数和静电力矩表达式代入到式(1)中使用 ode45 函数进行求解,微扫描镜的幅频特性曲线如图 5 所示(此时驱动电压为 30 V,其他电压时幅频特性曲线类似)。

显然, 发散梳齿分布微扫描镜可动框架和镜面的最大机械转角都要比平行梳齿分布微扫描镜可动框架和镜面的最大机械转角稍大, 因此为了增大微扫描镜的振幅, 应该采用发散型梳齿分布结构。此外, 微扫描镜的幅频特性表现出了迟滞特性, 即当驱动频率由高到低加载时与从低到高加载时微扫描镜的截止频率不一致, 会出现一段不稳定的工作频率范围, 这是由于微扫描镜属于参数激励系统而导致的。

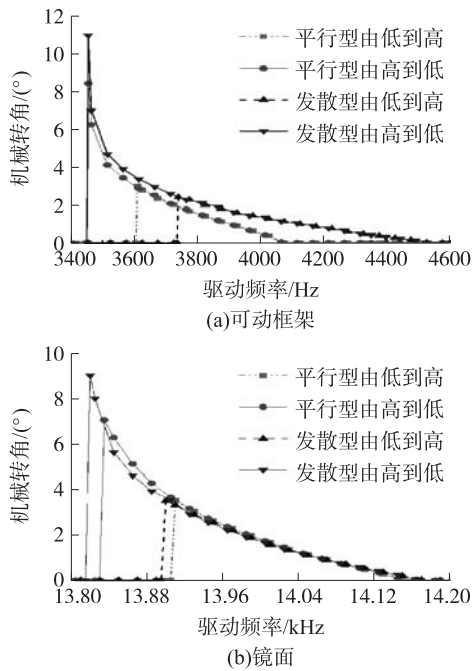


图 5 不同梳齿分布微扫描镜幅频特性曲线

2 制作工艺

微扫描镜制作使用 SOI 硅片, 工艺过程主要包括: 一是在硅片器件层制作实现电隔离的沟道; 二是在硅片基底层制作扭转镜旋转所需要的空腔结构; 三是在硅片器件层制作微扫描镜的梳齿镜面等结构。图 6 给出了微扫描镜的工艺流程示意图。

图 6(a) 为刻蚀沟道, 对硅片的器件层进行 ICP 刻蚀, 直至刻至氧化层; 图 6(b) 为氧化, 利用湿法氧化, 在沟道侧壁形成氧化绝缘层, 厚度约为 200 nm; 图 6(c) 为多晶硅填充, 用 LPCVD 在 ICP 刻蚀出的

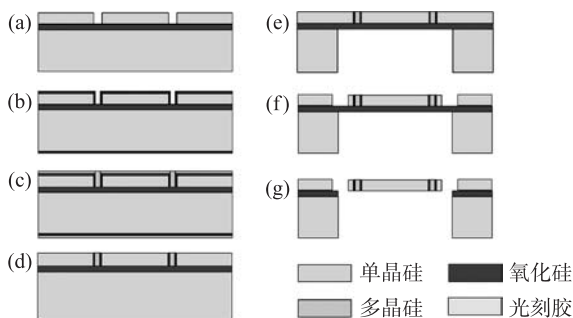


图 6 二维微扫描镜工艺流程图

沟道中回填多晶硅介质, 形成最终的隔离结构; 图 6(d) 为化学机械抛光, 在 SOI 硅片的器件层和基底层分别进行抛光, 去除硅片表面形成的氧化层和 LPCVD 沉积的多晶硅层; 图 6(e) 为刻蚀基底层硅, 用铝掩膜在 ICP 刻蚀系统中干法刻蚀基底层硅, 直至刻蚀到氧化层形成背腔; 图 6(f) 为刻蚀器件层硅, 在 ICP 刻蚀系统中干法刻蚀器件层硅, 直至刻蚀到背腔内铝层形成扫描镜结构; 图 6(g) 为释放, 使用 HF 腐蚀氧化层, 形成可动结构, 因梁的刚度较大, 梳齿不会出现粘附现象。

通过 SOI 工艺制作的平行型梳齿和发散型梳齿分布的微扫描镜 SEM 图和实物图分别如图 7、图 8 所示。

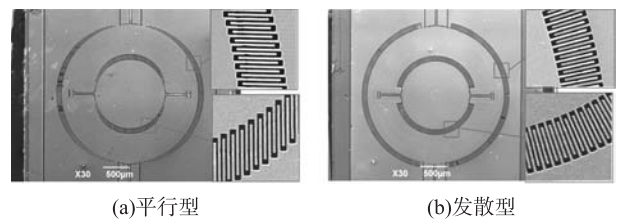


图 7 不同梳齿分布二维微扫描镜 SEM 图



图 8 不同梳齿分布二维扫描镜实物图

3 性能测试分析

3.1 实验装置

为了测试制作出的微扫描镜的机电特性, 本文采用激光三角法^[12]测量其扫描角度, 实验装置示意图如图 9 所示, 其中激光器与微扫描镜之间的距离为 122 cm。

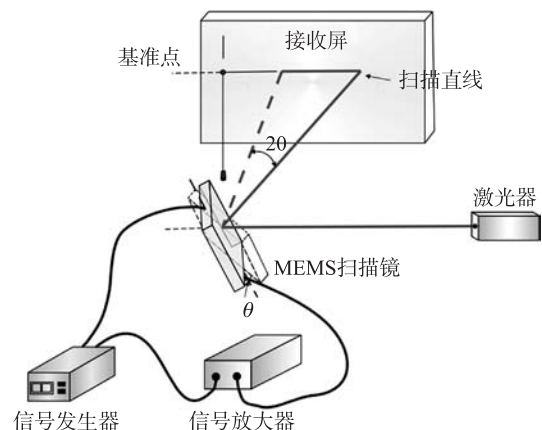


图 9 实验装置示意图

3.2 幅频特性测试

当驱动信号为幅值是 30V 的方波信号时,通过从不同方向改变频率,并记录各频率下的微扫描镜的机械转角,得到如图 10 所示的微扫描镜的幅频特性曲线。从图 10 中可以看出,发散梳齿可动框架和镜面的最大振幅都较平行梳齿可动框架和镜面大,与仿真结果较吻合,些许误差是由于仿真时计算其转动惯量未考虑梳齿,且制造过程中 ICP 刻蚀和化学机械抛光会造成器件尺寸误差。显然,无论是可动框架上还是镜面上分布的梳齿驱动器,发散型结构都要比平行型结构提供扫描镜更大的振动幅值,即使发散型结构的阻尼系数相对较大。这是由于发散梳齿较平行梳齿而言,静电驱动力矩增大对扫描镜的影响要稍大于阻尼系数增大对扫描镜的影响。

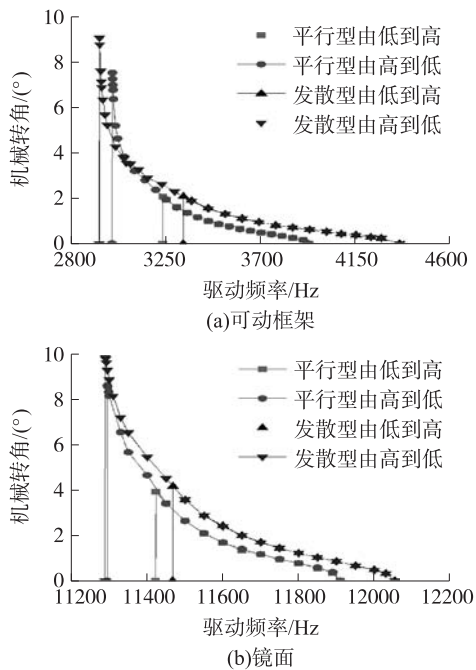


图 10 不同梳齿分布微扫描镜幅频特性测试曲线

3.3 电压-最大转角测试

图 11 给出了两种结构微扫描镜在不同电压下的最大机械角度,即驱动频率接近谐振频率二倍频时的测试结果。从测试结果可以看出最大角度与驱动电压近似线性关系,且发散型结构的振幅始终大于平行结构的振幅,并随着电压的增大两者之间的振幅相差越来越大。为防止扭转角度过大使器件损坏,测试时驱动电压最大加至 42 V,此时发散型微扫描镜的可动框架和镜面的最大角度为 12.3°、13.49°,平行型微扫描镜的可动框架和镜面的最大角度为 10.25°、11.68°,显然改变梳齿结构可以有效地增大微扫描镜的扭转角。

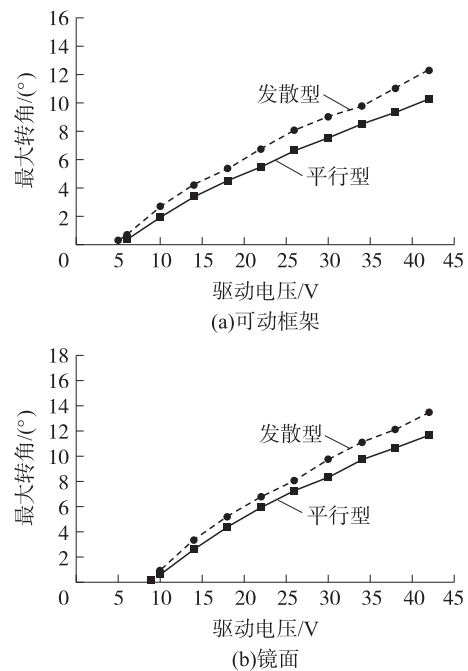


图 11 不同梳齿分布微扫描镜电压-最大转角曲线

4 总结

本文对不同梳齿分布的微扫描镜进行了动力学分析,仿真分析了影响微扫描镜最大转角的阻尼、静电驱动力和幅频特性曲线;仿真结果显示发散型梳齿分布的静电驱动力和阻尼系数都较平行型梳齿分布大,发散型梳齿分布的最大转角较平行型梳齿分布大。通过 SOI 工艺制备了样件后,测得幅频特性曲线与仿真结果较吻合,在不同电压下发散型微扫描镜的机械转角仍然较平行型大,因此可以通过改变梳齿分布的方法得到更大的扫描角度。本文对于提高采用垂直梳齿驱动器的 MEMS 器件的振幅有着重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 李晓莹,孙瑞康,燕斌,等.一种垂直梳齿驱动 V 型梁微镜设计[J].传感技术学报,2011,24(5):658-664.
- [2] Davis W, Brown D, Helsel M, et al. High Performance Silicon Scanning Mirror for Laser Printing[C]//SPIE Conf on MOEMS and Miniaturized Systems VI,2007,6466:64660D1-64660D7.
- [3] Arslan A, Brown D, Davis W O. Comb-Actuated Resonant Torsional Microscanner with Mechanical Amplification[J]. J Micro-Electromech Syst,2010,19(4):936-943.
- [4] Li X Y, Jin Q, Qiao D Y, et al. Design and Fabrication of a Resonant Scanning Micromirror Suspended by V Shaped Beams with Vertical Electrostatic Comb Drives[J]. Microsyst Technol, 2012,18:298-302.
- [5] Deisseroth K, Feng G, Majewska A, et al. In vivo Brain Imaging Using a Portable 2.9 g Two-Photon Microscope Based on a Micro-

- electromechanical Systems Scanning Mirror[J]. Opt Lett, 2009, 34(15): 2309-2311.
- [6] Yee Y, Nam H J, Lee S H, et al. PZT Actuated Micromirror for Fine-Tracking Mechanism of High-Density Optical Data Storage [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 89(1-2): 166-173.
- [7] Hah D, Sophia T Y Huang, Tsai J C, et al. Low-Voltage, Large-Scan Angle MEMS Analog Micromirror Arrays with Hidden Vertical Comb-Drive Actuators[J]. J Microelectromech Syst, 2004, 13(2): 279-289.
- [8] Jung W, Kim J, Jeon M. Handheld Optical Coherence Tomography Scanner for Primary Care Diagnostics[J]. Biomedical Engineering, 2011, 58(3): 741-744.
- [9] Schenk H, Wolter A, Lakner H. Design Optimization of an Electrostatically Driven Micro Scanning Mirror [C]//SPIE Conf on MOEMS and Miniaturized Systems II, 2001, 4561: 35-44.
- [10] 李丽伟, 朱荣, 周兆英, 等. MEMS 密闭腔内微气流的挤压膜阻尼效应研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(11): 1835-1839.
- [11] Cho Y H, Pisano A P, Howe R T. Viscous Damping Model for Laterally Oscillating Microstructures[J]. J Microelectromech Syst, 1994, 3(2): 81-87.
- [12] Ji C H, Choi M, Kim S C, et al. Electromagnetic Two-Dimensional Scanner Using Radial Magnetic Field [J]. J Microelectromech Syst, 2007, 16(4): 989-996.



乔大勇(1977-),男,博士,教授,主要研究方向为微机电系统集成设计技术、微/纳制造技术、主动微光学器件、先进 MEMS 封装和片上能源技术, dyqiao@nwpu.edu.cn;



杨璇(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为微型光学器件, yangxuan3108@163.com。