

显微栅线投影法用于微镜转角测量*

康新¹ 董萼良² 何小元²

(1 南京理工大学理学院力学与工程科学系, 南京 210094)

(2 东南大学土木工程学院工程力学系, 南京 210096)

摘要 采用显微栅线投影法结合相移技术测量了微镜在不同驱动电压下的转角, 并同理论值进行了比较, 平均误差为 4.5%, 结果表明: 测量值和理论值比较吻合.

关键词 微镜; 驱动电压; 转角; 栅线投影法

中图分类号 TN911 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 随着 MEMS 技术的快速发展, 微镜作为一种微型光学器件在很多领域得到越来越广泛的应用. 例如数字投影系统^[1]、光调制器^[2]、MEMS 光开关^[3,4]等. 为了分析微镜在非线性静电力驱动下的运动特性, 人们进行了深入研究^[5-12], 文献[10]采用一对平行板模型来模拟微镜转角和驱动电压之间的关系. 文献[11]应用有限元法(FEM)程序 ANSYS 来模拟微镜在静电力作用下的转动特性. 文献[5]利用激光干涉来测量微镜转角, 这种方法虽然测量灵敏度高, 但测量系统比较复杂. 文献[8]和[9]利用三角测量原理对微镜的这一参数进行了测量, 该方法采用一激光束聚焦在微镜上, 从微镜发出的反射光包含微镜的角位移信息, 然后用光电二极管接收反射光, 从反射光中提取微镜角位移信息. 本文用显微三维轮廓仪, 采用显微栅线投影法结合相移技术测量了微镜在不同驱动电压下的转角, 获得满意结果.

1 微镜转角与驱动电压间的函数关系

微镜由三层多晶硅工艺形成, 其结构如图1(a). 微镜下面是两个电极, 当电压加在微镜和右边电极上时, 在静电力的作用下, 微镜将绕其转轴顺时针旋转. 当电压加在微镜和左边电极上时, 微镜逆时针旋转. 这样可利用电极来控制微镜旋转方向. 微镜转动角度大小由驱动电压来控制. 图1(b)是微镜的截面图, 根据截面图可以推导出微镜转角和驱动电压间的函数关系为

$$V = k_0 \left\{ \Theta^3 \left[\frac{1}{1-\beta\Theta} - \frac{1}{1-\alpha\Theta} \right] + \ln \left[\frac{1-\beta\Theta}{1-\alpha\Theta} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

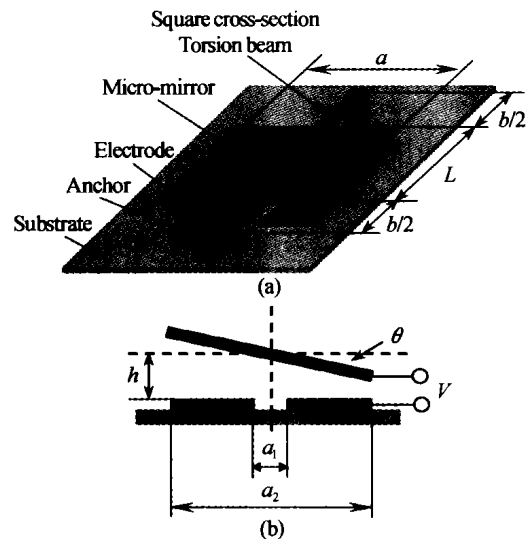


图1 (a) 微镜三维示意图, (b) 截面示意图
Fig. 1 (a) Schematic 3-D diagram of micro-mirror, (b) Cross-section view

式中, V 是驱动电压; $k_0 = \left(\frac{2S_0\theta_{\max}^3}{\epsilon_0 Lb} \right)^{1/2}$; S_0 是轴的抗扭刚度; θ_{\max} 是微镜的最大偏转角; ϵ_0 是空气介电常数, 大小为 $8.85C^2/(N \cdot m)$; L 是微镜的长度; b 是轴的总长度. $\Theta = \theta/\theta_{\max}$; θ 是在驱动电压 V 作用下微镜的转角; $\alpha = a_1/a$, a_1 是两个电极的间距, a 是微镜的宽度; $\beta = a_2/a$, a_2 是包括间距在内的两个电极的总宽度; k_0 主要与微镜的几何参数有关, 而 α 和 β 是对微镜转角和驱动电压间关系影响较大的两个参数. 也就是说, 电极的位置和尺寸对微镜转角随驱动电压变化的影响较大. 因此, 在微镜系统中, 电极的设计尤为重要. 对于一般圆轴, 扭转刚度为 GI_p , G 是剪切弹性模量, I_p 是圆轴截面的极惯性矩. 对于矩形截面的微扭转轴, 其扭转刚度为^[12]

$$S_0 = 2GI_p$$

式中

$$I_p = \begin{cases} tw^3 \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{w}{t} \left(1 - \frac{w^4}{12t^4} \right) \right] & (w \leq t) \\ t^3 w \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{w} \left(1 - \frac{t^4}{12w^4} \right) \right] & (w \geq t) \end{cases}$$

* 国家 863 计划资助项目(2002AA404140)

Tel: 025-84315590 Email: ckkang@seu.edu.cn

收稿日期: 2004-07-06

式中, t 为转轴高度, w 为转轴宽度. 这样就可以根据微镜器件的几何参数由式(1)来获得微镜转角和驱动电压之间的函数关系.

2 测量原理及结果

2.1 测量原理

本文利用不同驱动电压所对应的条纹图之间的相位差来计算微镜的转角. 这里, 条纹相位差实际代表微镜的离面位移差, 通过计算相位差即可确定微镜的转角变化. 文中条纹图处理采用四步相移算法, 测量光路为交叉光轴结构, 相位差和离面位移的转换关系可参考文献[13].

文中所测微镜是矩形平面, 用栅线投影法所得条纹图都是矩形区域的数字信息. 由于微镜是平面结构, 所以在微镜转动过程中, 和转动角度有关的条纹相位的变化也是呈平面分布的. 这样通过对相位差的平面拟合即可确定因电压变化而引起的微镜转角变化, 避免只用局部相位信息来确定微镜转角所带来的误差, 从而提高测量准确.

设已知矩形区域为 n 行 m 列, 区域内 $n * m$ 个网格点 (x_i, y_j) ($i = 0, 1, 2, \dots, n - 1; j = 0, 1, 2, \dots, m - 1$) 上的函数值为 $z(i, j)$, 根据实际需求, 设所拟合平面平行于 x 轴, 平面方程为

$$z = ay + b$$

式中, a, b 为拟合系数. 用最小二乘法拟合结果为

$$a = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} z_{ij} y_j - mn \bar{z} \bar{y}}{n \sum_{j=0}^{m-1} y_j^2 - mn \bar{y}^2} \quad (2a)$$

$$b = \bar{z} - a \bar{y} \quad (2b)$$

式中, $\bar{z} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} z_{ij} / (m * n)$, $\bar{y} = \sum_{j=0}^{m-1} y_j / m$

根据拟合平面的斜率 a 可求得平面的倾角, 通过比较倾角的变化, 即可确定微镜在驱动电压下的转动角度.

2.2 测量结果

本文测量所用仪器是作者所在课题组研制的显微三维轮廓仪. 该仪器由远距离显微镜(LWDM)、调节系统(Optic Zoom)、CCD 摄像机、正弦栅线投影系统、计算机及图像采集卡、光源、测试台、标定系统等组成, 主要用于微小样品的三维形貌及变形测量. 该系统高度方向测量分辨率可达 $0.1 \mu\text{m}$, 测量范围为: $5 \sim 500 \mu\text{m}$. 样品的平面测量范围为 $0.5 \sim 5 \text{mm}$. 同时, 该系统测量原理简单, 操作方便, 并配有相应的软件, 可用于 MEMS 结构的变形和形貌测量.

图 2 是本文所测微镜, 镜面尺寸是 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 材料为多晶硅. 图中电极板(Pads)用于给

微镜加电压. 图 3 是用显微三维轮廓仪投影到微镜上的正弦条纹, 从图中可看出电压的变化引起条纹明显的移动.

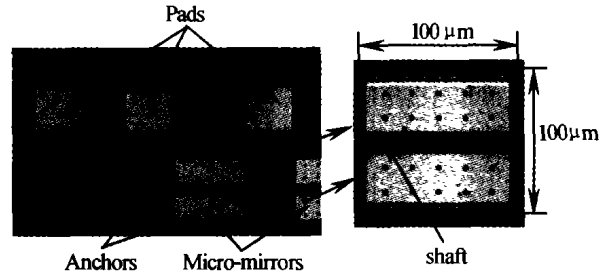


图 2 微镜及微镜电极板
Fig. 2 The micro-mirror and electrode pads



图 3 投影到微镜上的条纹图
Fig. 3 The fringe patterns projected on the micro-mirror

图 4 是微镜加 28 V 电压时的倾斜情况, 所测量的角位移是 1.9015° . 图 5 是微镜相应于 28 V 时拟合的倾斜斜面 ($k = 0.0332$). 图中中间一段没有数据参与平面拟合, 因为这一段是微镜转轴的横截面. 从图 3 中可看出, 微镜转轴处条纹信息很差, 为减小误差, 文中在条纹处理过程中忽略了该段区域的信息.

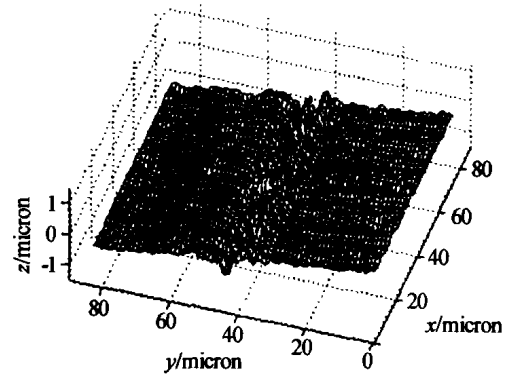


图 4 微镜加 28 V 电压时的偏转
Fig. 4 The rotation of the micro-mirror for 28 V

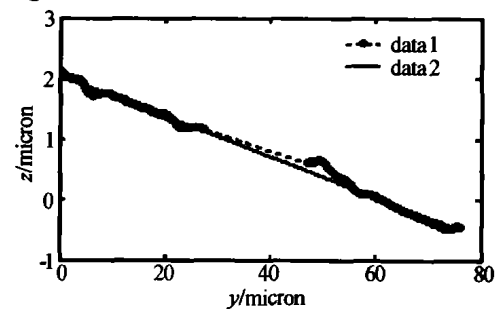


图 5 28 V 时微镜的倾斜(斜率 $k = 0.0332$)
Fig. 5 The slope of micro-mirror for 28 V ($k = 0.0332$)

本文所测微镜器件的几何参数见表 1, 由这些几何参数及式(1)可得微镜转角与驱动电压之间的

函数关系,对于多晶硅, G 约为 66 GPa. 实验数据见表 2.

表 1 微镜的几何参数(单位 μm)

微镜宽度 a	100
微镜长度 L	100
微镜和电极板间初始距离 h	2.75
转轴总长 b	130
转轴高度 t	1.5
转轴宽度 w	2
系数 α	0.06
系数 β	0.68

表 2 驱动电压和微镜转角的实验数据

驱动电压/V	8	12	16	18	20	22	24	26	28
斜率/ $(\times 10^{-3})$	-0.33	-2.1	-4.9	-7.6	-10.6	-14.0	-18.1	-24.3	-33.2
转角/ $(^\circ)$	0.0189	0.1203	0.2807	0.4354	0.6073	0.8021	1.0369	1.3920	1.9015

出,实验值和理论值有一定的偏差. 在 18 V 以前,实验值较理论值偏小,而在 18 V 之后,实验值较理论值偏大. 引起误差的原因很多,其中一个主要原因是,微镜转轴除发生扭转变形外,还有弯曲变形,这在理论解中是没有考虑到的. 另外,微镜器件的实际结构和理论分析中所用理想模型也有一定差异. 用下式计算,所得平均误差为 4.5%.

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta\theta_i|}{\theta_{28}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $n=9$ 为测量点数, θ_{28} 是驱动电压为 28 V 时微镜转角的理论值. $\Delta\theta_i$ 是在每个测量点处理论值和实验值的差值. 总体来看,实验值和理论值还是比较吻合的.

3 结论

微镜在非线形静电力驱动下的运动特性直接影响微镜的工作性能. 本文用显微栅线投影法测量了微镜在不同驱动电压下的角位移,并同理论分析进行了对比,平均误差为 4.5%. 工作表明:显微栅线投影法用于微镜转角测量,不仅测量方法简单,而且具有相当的准确. 作者所在课题组研制的显微三维轮廓仪完全可用于 MEMS 器件测量,为 MEMS 研究提供了有效手段.

参考文献

- Hwang K H, Koo M K, Kimnd S G. High-brightness projection display system based on the Thin-Film Actuated Mirror Array (TFAMA). *Proc of SPIE*, 1998, **3513**: 171 ~ 180
- Kurth S, Hahn R, Kanfmann C, et al. Silicon mirrors and micromirror array for spatial laser beam modulation. *Sens Actuators A*, 1998, **66**(1-3): 76 ~ 82
- Cohn R W. Link analysis of a deformable mirror device

图 6 是实验值和理论值的比较. 从图 6 中可看

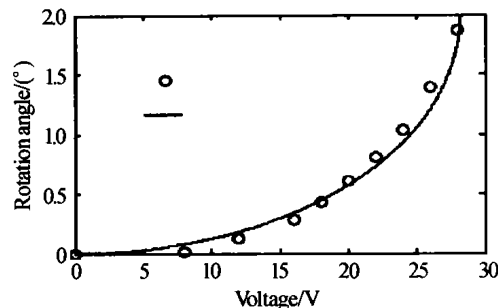


图 6 微镜转角和驱动电压间的关系曲线
Fig. 6 The relationship between the rotation angle of the micro-mirror and the pull-in voltage

- based optical crossbar switch. *Opt Eng*, 1992, **31**: 134 ~ 140
- 鲍俊峰, 邹勇卓, 吴兴坤. 一种超小型 1×2 微机械光开关. *光子学报*, 2004, **33**(8): 949 ~ 951
Bao J F, Zou Y Z, Wu Q K. *Acta Photonica Sinica* 2004, **33**(8): 949 ~ 951
- Tay C J, Quan C, Wang S H, et al. Determination of a micromirror angular rotation using laser interferometric method. *Optics Communications*, 2001, **195**: 71 ~ 77
- Degani O, Nemirovsky Y. Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuation based on new analytical pull-in expression. *J Microelectromechanical Syst*, 2002, **11**(1): 20 ~ 26
- Pan F, Kubby J, Peeters E, et al. Design, modeling and verification of MEMS silicon torsion mirror. *Proc of SPIE*, 1997: 114 ~ 124
- Shin J W, Chuang S W, Kim Y K, et al. Design and fabrication of micromirror array supported by vertical spring. *Sens Actuators A*, 1998, **66**(1-3): 144 ~ 149
- Degani O, Socher E, Lipson A, et al. Pull-in study of an electrostatic torsion microactuator. *J Microelectromechanical Syst*, 1998, **7**(4): 373 ~ 379
- Zhang X M, Chau F S, Quan C, et al. Modeling of the optical torsion micromirror. *Proc of SPIE*, 1999: 109 ~ 116
- Fischer M, Giousouf M, Schaepperle J, et al. Electrostatically deflectable polysilicon micromirrors-dynamic behavior and comparison with the result of FEM modeling with ANSYS. *Sens Actuators A*, 1998, **67**(1-3): 89 ~ 95
- Jaeklin V P, Linder C, Rooij N F, et al. Line-addressable torsional micromirrors for light modulator arrays. *Sens Actuators A*, 1994, (41-42): 324 ~ 329
- 康新, 何小元, C. Quan. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1444 ~ 1447
Kang X, He X Y, Quan C. *Acta Optical Sinica*, 2001, **21**(12): 1444 ~ 1447

The Measurement of Rotation Angle of Micro-mirror Using Fringe Projection

Kang Xin¹, Dong Eliang², He Xiaoyuan²

¹ Department of Mechanics and Engineering Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

² Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096

Received date: 2004-07-06

Abstract The fringe projection method is adopted to measure the rotation angle of the micro-mirror which is driven by pull-in voltage, and the measurement results are compared with the results obtained by theoretical analysis. It is shown that the experimental results are in good agreement with the theoretical analysis.

Keywords Micro-mirror; Pull-in voltage; Rotation angle; Fringe projection method



Kang Xin was born in Hebei China. She received her Ph. D. degree from Dept. of Engineering Mechanics, Southeast University in 2003. Her research interests include 3-D shape and deformation measurement using optical method and image processing techniques.

· 简讯 ·

大模场光子晶体光纤激光器研究获得新进展

李 康 王屹山 赵 卫 陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

彭钦军 崔大复 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

大模场光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是通过设计光子晶体光纤的微结构来获得大模场单模面积的一种新型特种光纤. 目前 PCF 的模场面积可以做 $1500 \mu\text{m}^2$ 以上, 比传统单模光纤的模场面积大一个数量级, 因此大模场 PCF 可以承受和传输更高的激光功率, 并且具有高转换效率、高亮度、高光束质量等优点. 同时利用 PCF 的微结构可设计特性, 把大模场 PCF 的包层设计成高数值孔径的双包层结构, 可大大提高泵浦耦合效率.

我们利用大模场双包层掺镱光子晶体光纤开展了高功率高亮度光纤激光的产生研究. 激光器单横模运转输出功率达到 50 W, 中心光束为近高斯场分布, 测得 M^2 因子为 1.2 ± 0.1 . 实验中采取传统的 F-P 腔型结构, 采用双色镜 (976 nm 透过率为 97%, $1.03 \sim 1.08 \mu\text{m}$ 波段反射率为 99.5%) 作为一端高反射腔镜, 另外一端利用光纤端面作为激光输出腔镜. 实验采用了最新的大模场双包层光子晶体光纤, 长度 3 m, 内包层 $150 \mu\text{m}$, 外包层 $450 \mu\text{m}$, 模场直径高达 $23 \mu\text{m}$, 内包层的数值孔径高达 0.6, 纤芯数值孔径 0.05. 泵浦源采用波长 976 nm 大功率 LD 阵列, 尾纤纤芯直径 $400 \mu\text{m}$, 耦合方式采用最佳匹配的显微物镜组. 当泵浦功率为 175 W 时, 获得 50 W 的激光输出, 中心波长为 $1.04 \mu\text{m}$, 斜率效率大于 75%, 激光阈值为 0.9 W. 实验中发现显微物镜组耦合效率较低, 改进工作正在进行中.

(收稿日期: 2004-12-03)