

MEMS 变形反射镜主要特性测试*

陈家凤¹, 陈海清²

(1 中南民族大学 电子信息工程学院, 武汉 430074)

(2 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要:介绍了基于微机电系统技术的微变形反射镜的基本结构和电极分布. 分析了微机系统变形镜的变形原理, 推导了微变形镜的镜面变形与外加驱动电压的关系. 分析了基于计算机控制的频闪显微干涉测量系统的组成及测试原理, 并利用该系统实现了对微变形镜静态电压一位移曲线、静态面形、动态离面变形以及谐振频率的测试. 实验表明, 测试结果与理论分析有很好的 consistency.

关键词:光学测量; MEMS 变形镜; 频闪显微干涉测量系统; 特性

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3245-5

0 引言

微机电系统 (Microelectromechanical System, MEMS) 变形镜 (MEMS Deformable Mirrors, MEMS-DMs) 是 MEMS 技术应用于自适应光学系统中的新型变形反射镜, 是自适应光学系统中的重要部件, 通过在可控驱动器上施加控制电压, 可产生所需的镜面变形, 从而改变反射光束的波前相位以达到校正畸变波前的目的. 因此, MEMS-DMs 的性能指标尤其是动态指标直接关系到整个自适应光学系统的性能. 所以采用合适的测试方法^[1-3]对 MEMS 变形镜的主要特性进行测试就显得至关重要. 本文的测试对象是 AgilOptics 公司生产的 MEMS-DMs. 测试内容包括微变形镜静态电压一位移曲线的测试、静态面形的测试、动态离面变形的测试以及谐振频率的测试. 由于 MEMS-DMs 具有整体重量轻、成本低、能耗低、惯性小、振幅低、响应频率高和集成度高等特点, 同时 MEMS-DMs 反射面的特点又决定了不能使用侵入式测量, 对测试仪器精度要求高. 因此, 针对 MEMS-DMs 自身的特点, 本文采用频闪显微干涉法^[4-6]对 MEMS-DMs 的主要特性进行测试.

1 MEMS-DMs 结构及变形理论

AgilOptics 公司提供的 MEMS-DMs 是采用微加工技术制作而成的平板静电驱动连续薄膜式变形镜, 其基本结构如图 1. 该变形镜的薄膜是通过在涂了氮化硅层的 1 mm 厚的硅片上远离掩模区域蚀刻

硅而形成. 为了提供高的光学反射率以及薄膜对激励的传导率, 在薄膜上下表面分别沉积了反射层和传导层. 然后在独立的硅片衬底阵列上形成镀金驱动电极阵列, 最后将薄膜和衬底阵列晶片用一个可传导的固定尺寸的间隔装置结合起来形成完整的变形镜. 该变形镜的电极分布及结构如图 2, 该变形镜具有 38 个驱动电极 (含公共极), 每个电极均为正六边形. 当在驱动电极上施加控制电压后, 电极与薄膜之间就会产生静电力引起薄膜向下凹陷, 从而在对应的区域产生所需要的变形.

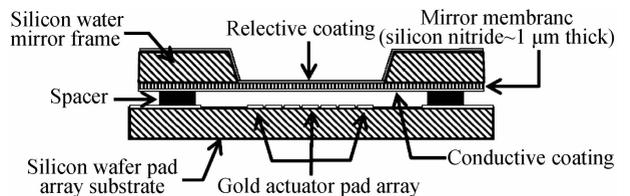


图 1 微变形镜剖面

Fig. 1 Cross section of an AgilOptics' Deformable Mirror

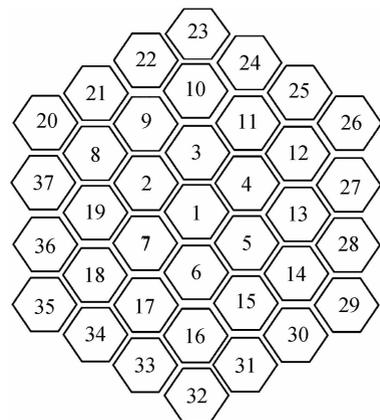


图 2 MEMS-DMs 电极分布

Fig. 2 Channel assignments for 37 actuator mirror

静电驱动式微变形镜的一个重要特征是能够准确地控制镜面变形. 对连续薄膜变形镜, 每个驱动电极施加电压后对膜面的变形均有影响. 由于

* 航天支撑技术基金 (041. 3JW05) 和中南民族大学自然科学基金 (YZY06003) 资助

Tel: 15972060768

Email: jfchen2003@yahoo. cn

收稿日期: 2008-09-23

修回日期: 2008-12-31

MEMS-DMs 的镜面厚度远小于镜面直径,因此可以认为变形镜的薄膜是弹性膜.又因为镜面薄膜的变形足够小,属于线性弹性变形,所以在镜面上任意一点的变形都垂直于原始镜面.当变形镜的变形量远小于薄膜与电极间的距离时,变形镜上每一点的变形量应与单个电极所加电压的平方成线性关系,而且膜面的整体变形可看成是各个电极单独作用的线性组合,因此连续薄膜变形镜上某点 (x, y) 的变形量 $u(x, y)$ 与外加电压 V_k 的关系为

$$u(x, y) = \sum_{k=1}^n V_k^2 \varphi_k(x, y) \quad (1)$$

设 $f(V_k) = V_k^2$, 则方程(1)可表示为

$$u(x, y) = \sum_{k=1}^n f(V_k) \varphi_k(x, y) \quad (2)$$

式(1)中的 $n=37$ 代表驱动电极的数目, V_k 是对第 k 个驱动电极施加的控制电压, $\varphi_k(x, y)$ 是第 k 个电极的面形影响函数^[7-8], 表示当单个电极(第 k 个)上施加单位控制信号而其它驱动电极仅由弹性约束时,变形镜镜面所引起的变形.将方程(2)用矢量-矩阵形式可表示为

$$u(x, y) = f(\mathbf{V}) \boldsymbol{\varphi}(x, y)^T \quad (3)$$

式中

$$\boldsymbol{\varphi}(x, y) = [\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y), \dots, \varphi_n(x, y)],$$

$$\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_n].$$

当变形镜的变形量非常微小时,变形镜的面形影响函数 $\varphi_k(x, y)$ 可用 Zernike 多项式表示为

$$\varphi_n(x, y) = \sum_{p=1}^m a_{kp} z_p(x, y) \quad (4)$$

式中 m 代表 Zernike 多项式的项数,取 $m=n-1=36$ (其中第一项是常数项), $z_p(x, y)$ 为第 p 项 Zernike 多项式,系数 a_{kp} 对应第 k 个电极作用时的第 p 项 Zernike 系数.将方程(4)用矢量-矩阵形式表示为

$$\boldsymbol{\varphi}(x, y)^T = \mathbf{A} \mathbf{z}(x, y)^T \quad (5)$$

式中 $\mathbf{z}(x, y) = [z_1(x, y), z_2(x, y), \dots, z_m(x, y)]$ 是 $1 \times m$ 阶 Zernike 多项式矢量, \mathbf{A} 是 $n \times m$ 阶面形影响矩阵.将方程(5)代入方程(3)可得

$$u(x, y) = f(\mathbf{V}) \mathbf{A} \mathbf{z}(x, y)^T = \mathbf{B} \mathbf{z}(x, y)^T \quad (6)$$

式中 $\mathbf{B} = f(\mathbf{V}) \mathbf{A}$ 表示变形镜表面面形的 $1 \times m$ 阶 Zernike 多项式系数矩阵.对 \mathbf{A} 求广义逆可得

$$f(\mathbf{V}) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1}$ 是控制电压矩阵.很显然,知道了变形镜的控制电压矩阵,就可以控制变形镜的各驱动电极上的电压以获得所需要的镜面变形,从而达到波前校正的目的.

2 测试系统

采用图3的频闪显微相移干涉系统对 MEMS-

DMs 的电压-位移静态曲线、静态表面面形及动态特性进行测试.若去掉遮光闸,则该系统是一个改进的泰曼-格林干涉仪,利用 PZT 使参考平面镜产生微位移可控制参考光束和测量光束的光程差,最终改变其相位差从而在测试过程中精确地产生相移步距为 $\pi/2$ 的一套 5 步相移干涉图像.为实现 MEMS-DMs 的动态测量,系统采用 658 nm 的脉冲激光二极管作频闪光源,并采用美国 NI 公司的 PCI-MIO-16E-1 型多功能数据采集卡实现计算机同步控制及数据采集,使频闪光的闪光频率与对 MEMS-DMs 施加的周期性激励信号的频率相同,控制激励周期内频闪光脉冲与周期性激励信号的相对延时,再配合 5 步相移干涉技术,即可利用普通 CCD 拍摄到激励周期内不同时刻的多套“冻结”的 5 步相移干涉图像.由于 MEMS 变形镜在周期性激励信号的作用下不仅存在离面运动,同时还存在平面内运动,因此还必须进行面内运动的测量.这时利用遮光闸遮住射向参考平面镜的光线,则测量系统变为频闪显微视觉系统,调整频闪光脉冲与该周期性激励信号的相对延时,可获得激励周期内不同时刻的多幅视觉图像,再利用数字图像相关技术即可进行面内运动测量.消除面内运动的影响后即可获得 MEMS-DMs 在激励周期内不同时刻的三维形貌图,最终可得到动态测试所需的特性参数.

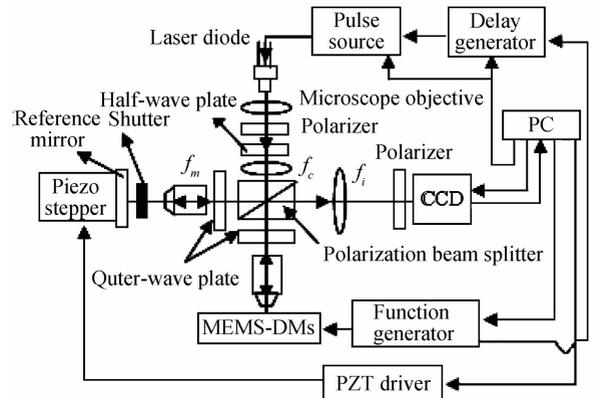


图3 频闪显微干涉测量系统

Fig. 3 Schematic map of stroboscopic interferometer system

在进行动态测试时,对应于激励周期内各时刻的干涉图样中任意点的光强分布函数可表示为

$$I_i(x, y, t) = A(x, y, t) + B(x, y, t) +$$

$$2 \sqrt{A(x, y, t)B(x, y, t)} \cos \{ \phi(x, y, t) + \theta \} \quad (8)$$

式中 $\phi(x, y, t)$ 为代表某一时刻被测 MEMS 变形镜表面高度信息的两相干光束的相位差, $A(x, y, t)$ 、 $B(x, y, t)$ 分别为从参考平面镜和被测 MEMS 变形镜反射回来的两束相干光束的光强分布. θ 为移相量.采用相移步距为 $\pi/2$ 的 5 步相移算法(即 Hariharan 算法)可得到与物体表面信息有关的各

时刻的缠绕相位 $\Psi(x, y, t)$.

$$\Psi(x, y, t) =$$

$$\arctan \frac{2(I_t(x, y, t) - I_1(x, y, t))}{2I_3(x, y, t) - I_5(x, y, t) - I_1(x, y, t)} \quad (9)$$

式中 $I_1(x, y, t), I_2(x, y, t), \dots, I_5(x, y, t)$ 分别代表对应不同相移量时各时刻的光强分布. 很显然从式(9)得到的相位值是用反正切函数表示的, 其相位值被缠绕在主值区域 $[-\pi, +\pi]$ 中. 因此为了获得反映物体信息的真实相位 $\phi(x, y, t)$, 就必须将相位主值恢复为绝对相位, 即必须进行相位解缠^[9-10]. 在采用加权小波变换^[11]及时间相位解缠算法进行相位解缠并消除面内运动的影响后, 通过式(10)即可获得被测 MEMS-DMs 表面任意一点在各时刻的高度 $h(x, y, t)$, 从而得到其表面形貌及离面变形等参数. 式(10)中的 λ 为光源的波长.

$$h(x, y, t) = \frac{\phi(x, y, t)}{4\pi} \lambda \quad (10)$$

3 MEMS-DMs 特性测试实验

MEMS-DMs 的光学影响函数矩阵已由方迪等^[12]进行了测试. 本文主要是利用图 3 的频闪显微干涉测量系统实现对 MEMS-DMs 的静态电压-位移曲线、静态形貌、动态离面变形以及谐振频率的测试. 图 4 是在测试微变形镜静态形貌时(变形镜各个电极均未加控制电压时)采用频闪显微干涉系统并利用 5 步相移干涉法测得的其中一幅干涉图, 图 5 是利用式(9)得到的缠绕相位图, 图 6 是进行相位解缠操作后并利用式(10)得到的变形镜原始表面形貌图.

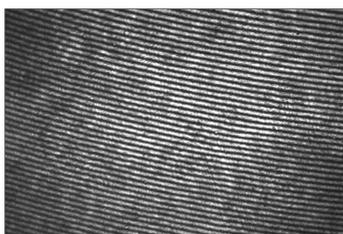


图 4 干涉图
Fig. 4 Interferogram map

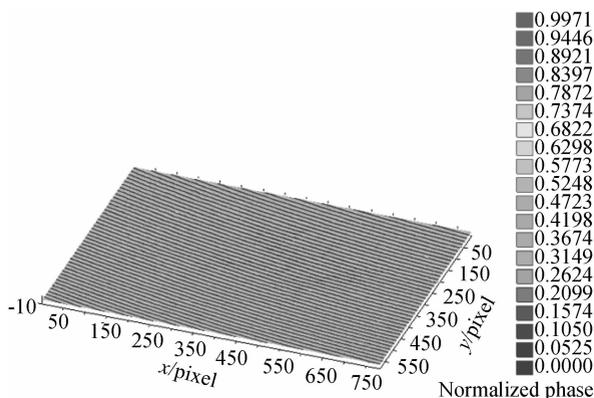


图 5 缠绕相位图
Fig. 5 Wrapped phase map

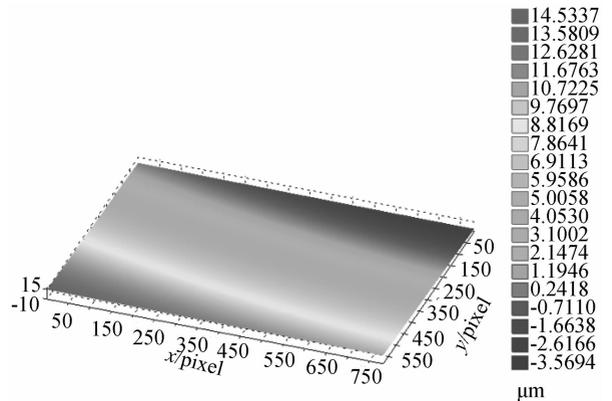


图 6 静态形貌图
Fig. 6 Static surface shape map

在进行静态响应曲线测试时, 本文测试的是变形镜中心位置的变形与中心电极所施加的电压的关系曲线. 在 0~200 V 工作电压范围内, 每间隔 10 V 给中心电极施加一个驱动电压, 利用频闪显微干涉系统及 5 步相移算法以及相位解缠算法可测试出此时对应的变形镜中心位置的变形量(单位 μm), 从而可得到变形镜中心电极施加电压后的静态电压-位移曲线(图 7). 显然, 从图 7 可以看出: 微变形镜的电压-位移关系是非线性的, 且变形镜中心位置的变形与中心电极所加电压的平方成线性关系, 这与前面分析的变形镜的变形理论非常吻合.

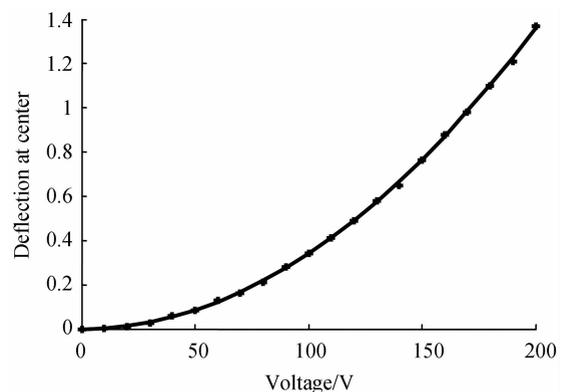


图 7 电压-位移静态曲线
Fig. 7 Static curve of voltage-displacement

在进行变形镜动态测试时, 系统通过函数发生器为变形镜提供频率为 1 kHz、有效值为 20 V、直流偏置为 100 V 的正弦激励信号. 在激励周期内采样 16 个点, 可得到对应不同时刻的 16 套(每套 5 幅)干涉图像, 利用 Hariharan 算法、相位解缠算法及相位-高度转换公式并消除平面内运动的影响后可得到变形镜表面各点在各时刻的离面变形. 图 8 是将变形镜各驱动电极均加上该激励信号时得到的镜面中心位置的动态离面变形图. 对该中心位置的离面变形进行 20 次重复测量, 其重复误差不大于 5 nm. 通过改变激励信号的频率可实现对 MEMS 变形镜的谐振频率的测量, 实验测得变形镜的谐振

频率为 1 kHz, 与该变形镜的固有频率一致, 从而验证了测量方法的可行性及测试结果的准确性。

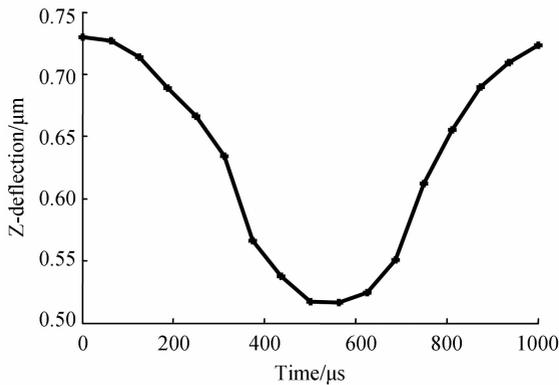


图 8 离面变形

Fig. 8 Out-of-plane deflection

4 结论

通过分析 MEMS 微变形反射镜的变形原理, 推导了变形反射镜光学影响函数矩阵, 从而得到了电压控制矩阵, 为自适应光学系统利用微变形镜进行波前校正提供了理论依据. 针对 MEMS 变形镜具有尺寸小、响应频率高及低振幅的振动特性的特点, 利用所构建的频闪显微干涉系统实现了对 MEMS-DMs 的静态电压-位移曲线、静态面形、动态离面变形以及谐振频率的测试, 实验结果验证了与理论分析的一致性以及测试结果的准确性、可靠性。

参考文献

- [1] JIAO Guo-hua, LI Yu-lin, HU Bao-wen. Mirau phase-shifting interferometer for profile measurement of microlenses array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10):1924-1927.
焦国华, 李育林, 胡宝文. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10):1924-1927.
- [2] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1139-1143.
喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6):1139-1143.
- [3] DUAN Cun-li, CHEN Fang, QI Rui-li, et al. A new moiré stripe method of measuring 3-D object shapes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7):1425-1428.
段存丽, 陈芳, 祁瑞利, 等. 利用莫尔条纹测量物体三维貌方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7):1425-1428.
- [4] HART M R, CONANT R A, LAU K Y, et al. Stroboscopic interferometer system for dynamic MEMS characterization[J]. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical System*, 2000, **9**(4):409-418.
- [5] REMBE C, MULLER R S. Measurement system for full three-dimensional motion characterization of MEMS [J]. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(5):479-488.
- [6] XIE Yong-jun, BAI Jin-peng, SHI Tie-lin, et al. Measurement system for 3D static and dynamic characterization of MEMS. [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5):570-574.
谢勇君, 白金鹏, 史铁林, 等. MEMS 三维静态动态测试系统[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5):570-574.
- [7] LI En-de, DUAN Hai-feng, DAI Yun, et al. Analysis of characteristics of micromachined membrane deformable mirror [J]. *High power laser and particle beams*, 2006, **18**(7):1099-1103.
李恩德, 段海峰, 戴云, 等. 微加工薄膜变形镜特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7):1099-1103.
- [8] YU Yang, CAO Gen-rui. A study on the corrective capability and optimization of active mirror [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(2):229-233.
于洋, 曹根瑞. 主动光学反射镜面形的校正能力及其优化设计 [J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(2):229-233.
- [9] BALDI A, BERTOLINO F, GINESU F. On the performance of some unwrapping algorithms [J]. *Optics and lasers in Engineering*, 2002, **37**(4):313-330.
- [10] KIM S B, KIM Y S. Least squares phase unwrapping in wavelet domain [J]. *IEE Proc -Vis Image Signal Process*, 2005, **152**(3):
- [11] CHEN Jia-feng, CHEN Hai-qing. Weighted least squares phase unwrapping algorithm based on multiresolution wavelet transform[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(4):514-517.
陈家凤, 陈海清. 基于小波变换的加权最小二乘相位解缠算法 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(4):514-517.
- [12] FANG Di, CHEN Hai-qing, LI Jun, et al. The measurement of some important parameters of mems deformable mirror[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3):21-26.
方迪, 陈海清, 李俊, 等. 微变形反射镜主要性能测试研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3):21-26.

Primary Characteristics Measurement of MEMS Deformable Mirrors

CHEN Jia-feng¹, CHEN Hai-qing²

(1 College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

(2 Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The fundamental structure and channel assignments for actuator mirror of deformable mirrors based on microelectromechanical system (MEMS) technique are introduced. The deformation principle of MEMS deformable mirrors (MEMS-DMs) is analyzed. The relation between the deformation of the mirror surface and the voltages applied to the mirror electrodes is deduced. The composition and testing principle of the computer-controlled stroboscopic microscopic interferometer system are analyzed. The static voltage versus displacement curve, surface shape map and out-of-plane deflections and resonant frequency of MEMS-DMs are measured. The experiment shows that the test results agree well with the theory analysis.

Key words: Optical measurement; MEMS deformable mirrors; Stroboscopic microscopic interferometer system; Characteristics



CHEN Jia-feng was born in 1968. She is an associate professor at South-Central University for Nationalities with the Ph. D. degree. Her research interests focus on optoelectronic detecting and information processing.