

文章编号: 0253-2239(2005)03-346-5

采用 CCD 技术的微型光机电系统光开关测试方法*

孙东明 董 玮 郭文滨 刘彩霞 王国东 徐宝琨 陈维友**

(吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

摘要: 在研制基于微型光机电系统技术的光电器件过程中, 需要精确测定器件在给定驱动条件下的运动情况。在对制作完成的光开关进行性能测试时, 由于微型光机电系统光开关的几何尺寸的限制, 如果要准确测定光开关微反射镜的运动位移, 将会有一定的困难。提出了一种采用线阵 CCD 技术的光学测量方法, 实现了对光开关悬臂梁在驱动电压作用下的旋转角度的精确测量。通过理论推导得到了悬臂梁扭转角度与可测量物理量的关系, 通过求解方程得到了各个物理量的数值选择对于测量结果的影响, 并且给出了测量时各个物理量的参考值。通过实验测量, 误差小于 10%, 表明这是一种具有实际意义的测量方案。

关键词: 集成光学; 微型光机电系统; 光开关; 线阵 CCD; 旋转角度; 测量

中图分类号: TN256; TN205 文献标识码: A

A Testing Method for a MOEMS Optical Switch Using CCD

Sun Dongming Dong Wei Guo Wenbin Liu Caixia Wang Guodong

Xu Baokun Chen Weiyu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, School of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130023)

Abstract: The movement status of the device needs to be determined accurately under the driven conditions in the design and fabrication of the optoelectronic devices based on the micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS). Because of the limitation of geometrical dimensions, there are some difficulties in accurate measurement on the driven conditions for MOEMS optical switch. This paper presents an optical method for the measurement of the angular rotation of the cantilever beam on the optical switch. Based on the theoretical analysis, the relations of the angular rotation and the measurable parameters are given, and the optimized results of the measurable parameters are performed. The measure error is less 10% and the experimental results obtained demonstrate that the feasibility of the proposed method to be used for evaluating the driven conditions of the MOEMS optical switch.

Key words: integration optics; MOEMS; optical switch; linear array CCD; torsion angle; measure

1 引 言

近年来, 基于微型光机电系统技术的光开关由于具有插入损耗小、消光比高、可扩展性好、易于集成等优点已经引起了人们广泛的兴趣^[1~4], 将成为光开关研发的重要方向。目前, 许多科研机构已经致力于这方面的研究, 并提出了许多类型的基于微型光机电系统技术的光开关^[5~9]。但是, 关于这些类型的光电器件的性能测试方法却是寥寥无几。由于微型光机电系统光开关的几何尺寸很小, 在静电电压等驱动方式

作用下而导致的位移更小, 因此, 采用普通方法根本无法得到器件的工作状态的真实反映。CCD 是一种用于探测光强分布的光电阵列, 具有灵敏度高, 动态响应范围宽, 空间分辨率高和实时信号采集等优点, 可在低光照度下工作, 广泛地应用在摄像学、光谱学、形状检测等领域^[10~13]。本文结合一种基于微型光机电系统技术的 2×2 静电驱动扭臂式光开关, 介绍了采用 CCD 技术测量装置的设计方案。通过理论分析, 优化了实际测量时应该采用的参量。

* 国家 863 计划(2002AA312020)、跨世纪优秀人才培养计划基金和吉林省科技发展计划(20010319)资助课题。

作者简介: 孙东明(1978~), 男, 在读博士生。主要研究方向为微型光机电系统光开关的设计研制。

** 通信联系人。E-mail: dongmingsun@email.jlu.edu.cn

收稿日期: 2004-04-19; 收到修改稿日期: 2004-07-14

2 器件模型及工作原理

图 1 为 2×2 静电驱动微反射镜式光开关的模型示意图。位于悬臂梁上微反射镜被放置于四根垂直放置的单模光纤之间,在没有施加驱动电压时,微反射镜保持位置不动,从入射光纤发出的光被微反射镜反射,改变方向后进入到镜面同一侧的出射光纤中,

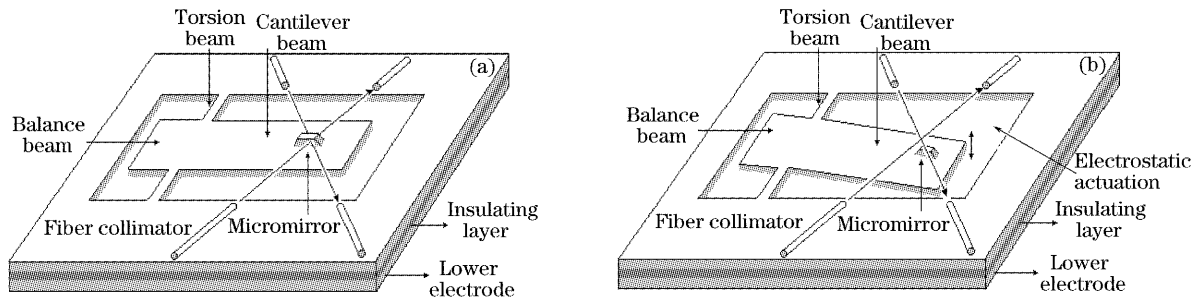


图 1 2×2 静电驱动微反射镜式光开关的模型示意图。(a) 反射状态, (b) 传输状态

Fig. 1 The sketch map for the optical switch of the electrostatic drive. (a) Reflection state, (b) transmission state

表 1 2×2 静电驱动微反射镜式光开关结构参量

Tabl 1 Optimum values of parameters of 2×2 MOEMS optical switch

Parameters	Value
Length of the torsion beam / μm	700
Width of the torsion beam / μm	12
Length of the cantilever beam / μm	1900
Width of the cantilever beam / μm	1000
Thickness of the upper electrode / μm	10
Length of the balance beam / μm	300
Width of the balance beam / μm	1000
Distance between the upper and lower electrodes / μm	55

3 实验装置介绍

实验装置如图 2 所示,其中插入图给出了光开关俯视的扫描电镜 (SEM) 图。水平放置于光学平台上的 5 mW 的 He-Ne 激光器发出一束红光经过光线汇聚装置及衰减片等光学元件,经反射镜改变传输方向入射到光开关的悬臂梁上。其中,反射镜与水平方向的夹角可以调节并精确读出。入射光线经过悬臂梁表面反射后被 CCD 摄像头接收,数字信号经过视频采集卡导入计算机进行图像处理。当悬臂梁和下电极板之间施加驱动电压时,悬臂梁在静电力作用下绕扭臂旋转,反射光线的出射方向发生偏转,通过 CCD 导入计算机的图像处理,可以达到测量驱动电压和悬臂梁扭转角度关系的目的。整个装置放置于光学平台上,CCD 摄像头和被测器件通过光学导轨连接,经过多维微调架精确调节,我们可以

这是开关的反射状态[图 1(a)]。在上电极和下电极之间有驱动电压输入时,悬臂梁受到静电力产生的静电力矩而向下弯曲,带动微反射镜移开光通路,入射光沿直线传播进入出射光纤,这是开关的直通状态[图 1(b)]。光开关的结构参量如表 1 所示。

读出光线入射点和 CCD 间的距离 L_1 。由于在测量中,只需要在 CCD 上读出光线的纵向位移,所以我们选用了 GYD-LG2048B14PCI 数字式线阵 CCD 摄像机,有效像元个数是 2048,光敏元尺寸是 $11 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,相邻光敏元中心距离为 $13 \mu\text{m}$,积分时间 $5 \sim 300 \text{ ms}$ 可调,时间步距重复精度为 $2 \mu\text{s}$,能够满足高分辨率和高速读出的应用需要。

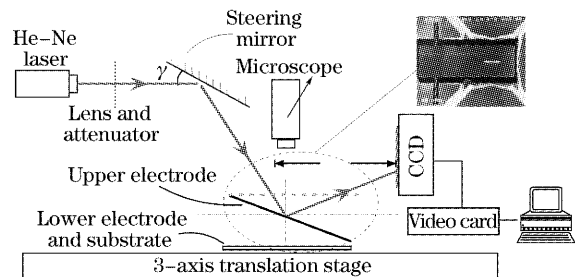


图 2 实验装置仪器设备示意图,插入图为光开关的扫描电镜图

Fig. 2 The sketch map for the experimental equipment, the insert is the SEM of the optical switch

4 几何光路的计算分析及讨论

图 3 给出了经过简化的几何光路图,其中推导中使用到的物理量均给出标定。

下面推导悬臂梁扭转角度与测量的物理量的关系,为了不失一般性,我们设定在没有施加驱动电压时,悬臂梁由于自身重力原因而自然向下倾斜角度为 θ_1 ;施加驱动电压后,扭转角度为 θ_2 。由图中几何关系,可以得到

$$\beta = 2\alpha - \pi/2, \tag{1}$$

$$\beta + \theta_1 = \pi/2 - (\gamma_1 + \theta_1), \tag{2}$$

其中 β 为入射光线与垂直方向的夹角, α 为反射镜与垂直方向的夹角, γ_1 为没有施加驱动电压时反射光线与水平方向的夹角。

$$H_1 = -L_1 \tan(2\theta_1 + 2\alpha), \tag{3}$$

$$H_2 = -L_2 \tan(2\theta_2 + 2\alpha), \tag{4}$$

$$\Delta H_1 = L_0 \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(2\alpha)}{\sin(2\alpha + \theta_2)}, \tag{5}$$

其中 L_0 为初始条件下入射光线在悬臂梁上的入射点与扭臂的垂直距离。

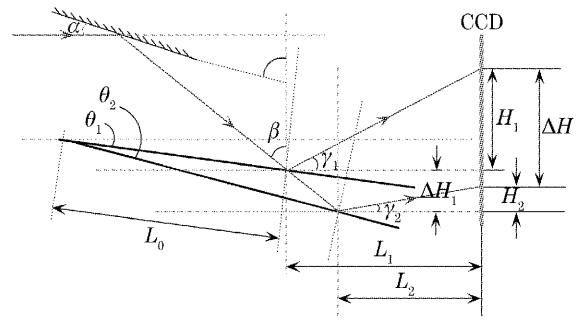


图 3 实验测试设备几何光路简图

Fig. 3 The geometrical optics of experimental equipment

通过图中的几何三角关系, 推导得到

$$\Delta H = \left[L_1 + L_0 \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(2\alpha)}{\sin(2\alpha + \theta_2)} \tan(2\alpha) \right] \tan(2\theta_2 + 2\alpha) - L_1 \tan(2\theta_1 + 2\alpha) + L_0 \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(2\alpha)}{\sin(2\alpha + \theta_2)}, \tag{6}$$

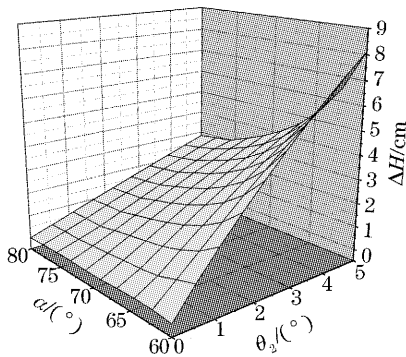


图 4 反射镜的倾角 α 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线

Fig. 4 Relations of the angle of the reflector α , the torsion angle of cantilever beam θ_2 and the distance of the points of incidence on CCD ΔH

(6) 式是需要得到的扭转角度 θ_2 与其他可测量物理量的隐函数形式。

通过求解(6)式, 我们具体讨论可测量物理量与扭转角度 θ_2 的关系。图 4 给出了反射镜的倾角 α 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线。由图中曲线变化趋势可以看出, 当反射镜的倾角 α 逐渐减小时, 随着悬臂梁扭转角度 θ_2 的增大, CCD 测定距离 ΔH 会显著增大。当我们施加驱动电压时, 测定其他物理量后, 通过计算得到悬臂梁扭转角度 θ_2 , 这一过程属于放大测量过程, 需要合理选择放大程度。

图 5 显示了入射点与 CCD 的垂直距离 L_1 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线, 可以看出随着 L_1 的增大, 随着悬臂梁扭转角度 θ_2 的增大, ΔH 会有一定程度的增大。图 6 给出了入射光线在悬臂梁上的入射点与扭臂的垂直距离

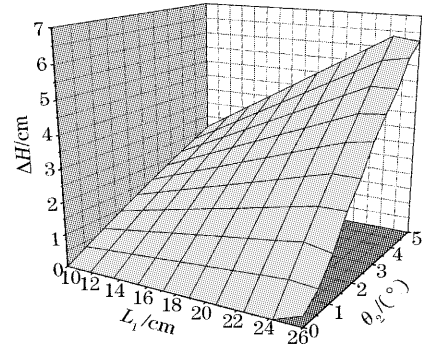


图 5 入射点与 CCD 的垂直距离 L_1 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线

Fig. 5 Relations of the distance between the point of incidence and CCD L_1 , the torsion angle of cantilever beam θ_2 and the distance of the points of incidence on CCD ΔH

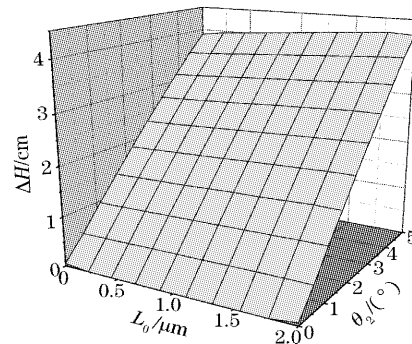


图 6 初始条件下入射光线在悬臂梁上的入射点与扭臂的垂直距离 L_0 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线

Fig. 6 Relations of the distance of incidence on cantilever beam L_0 , the torsion angle of cantilever beam θ_2 and the distance of the points of incidence on CCD ΔH

L_0 、悬臂梁扭转角度 θ_2 和 CCD 测定距离 ΔH 的关系曲线。由图中的曲线变化趋势可以看出,入射点的变化对于 CCD 测定距离 ΔH 的影响很小,由此,我们在实际测量中,只需准确测定 L_0 的大小即可。

5 测量结果

在实际测量中,我们根据上面的讨论结果,合理地选定以下基本参量: α 为 75° , L_0 为 $1500 \mu\text{m}$, L_1 为 15 cm 。图 7 描述了 2048 个线阵光敏元接收到的光强信号。其中图 7(a)和图 7(b)分别为施加驱动电压前后,CCD 所接收到的光信号的位置。由图可以看出在施加驱动电压前后,光强峰值在 2048 个线阵光敏元的位置有一定的改变,其数值可以由图中直接读出,由此我们得到了 CCD 测定距离 ΔH ,将

其他测定值一并代入方程(6)即可求得悬臂梁的偏移角度,达到了测定光开关悬臂梁的运动情况的目的。

$$\Delta H = (1856 - 480) \times 13 \mu\text{m} = 1.7888 \text{ cm},$$

计算得出悬臂梁的偏转角度为 1.78° ,从理论计算上,悬臂梁向下偏转的角度 $\theta = \arcsin(55/1900)$ 为 1.66° ,测量误差小于 10% 。产生这样的偏差除了测量方面的误差外,还有两点值得注意:1) 悬臂梁与下电极板的间距为 $55 \mu\text{m}$,在光开关实际组装过程中存在一定误差,极板之间可能因为填充胶水而间距增大;2) 悬臂梁在驱动电压作用下,向下弯曲与下电极板接触后可能会弯曲变形,导致有效偏转角度增大。以上多种因素的共同作用导致实际测量结果比理论值偏大。

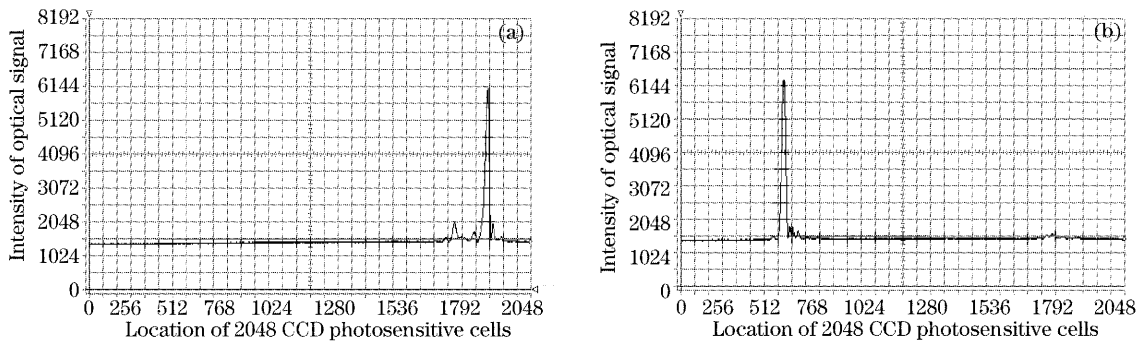


图 7 (a) 未施加驱动电压时 CCD 接收的光信号,(b) 施加驱动电压后 CCD 接收的光信号。横坐标为线阵 CCD 2048 个光敏元的位置,纵坐标为光信号强度

Fig. 7 (a) The drawing of the CCD optical signal without the actuating voltage, (b) the drawing of the CCD optical signal with the actuating voltage. The abscissa is the location of the 2048 CCD photosensitive cell, and the y-axis is the intensity of the optical signal

图 8 显示了在给定脉冲电压信号情况下,CCD 接收到光强峰值位置随时间变化的动态曲线。由图

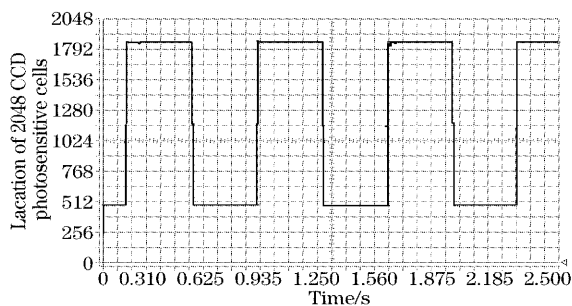


图 8 在脉冲驱动电压信号下接收到的动态曲线。横坐标为时间,纵坐标为线阵 CCD 2048 个光敏元的位置

Fig. 8 The dynamic curve under the impulse voltage signal. The abscissa is the time, and the y-axis is the location of the 2048 CCD photosensitive cells

中较为平整的波形图可以看出,光开关在给定脉冲电压条件下,工作性能比较稳定。此外,通过测试系统还可以实现对光开关的响应时间和器件寿命等方面的测试,这里不一一详述。

6 结 论

本文介绍了一种采用线阵 CCD 技术的光学测量方法,实现了对微型光机电系统光开关悬臂梁在驱动电压作用下的旋转角度的精确测量。通过理论推导得到了悬臂梁扭转角度与可测量物理量的关系,通过求解方程得到了各个物理量的数值选择对于测量结果的影响,并且给定了测量时各个物理量的参考值, α 为 75° , L_0 为 $1500 \mu\text{m}$, L_1 为 15 cm 。通过对实际测量结果的介绍,测量误差小于 10% ,表明这是一种具有实际意义的测量方案。

参 考 文 献

- 1 Mark N. Horenstein, Seth Pappas, Asaf Fishov *et al.*. Electrostatic micromirrors for subaperturing in an adaptive optics system[J]. *J. Electrostatics*, 2002, **54**: 321~332
- 2 C. J. Tay, C. Quan, S. H. Wang *et al.*. Determination of a micromirror angular rotation using laser interferometric method [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**: 71~77
- 3 Wei Dong, Shengping Ruan, Xindong Zhang *et al.*. Design and fabrication of slant-counter electrodes for optical switches [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2004, **41**(4): 273~275
- 4 Brian McCarthy, Victor M. Bright, John A. Neff. A multi-component solder self-assembled micromirror [J]. *Sensors and Actuators (A)*, 2003, **103**: 187~193
- 5 J. Li, Q. X. Zhang, A. Q. Liu. Advanced fiber optical switches using deep RIE(DRIE) fabricatin[J]. *Sensors and Actuators (A)*, 2003, **102**: 286~295
- 6 Cao Zhonghui, Bao Junfeng, Yuan Ye *et al.*. A non-silicon based 1×4 MEMS optic switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1042~1044 (in Chinese)
曹钟慧, 鲍俊峰, 袁野等. 非硅基底 1×4 微机电系统光开关 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1042~1044
- 7 Sun Dongming, Dong Wei, Guo Wenbin *et al.*. Optimization and design of electrostatic drive for a MOEMS optical switch [J]. *Optoelectronic Technology*, 2002, **22**(4): 223~227 (in Chinese)
孙东明, 董玮, 郭文滨等. MOEMS 光开关静电驱动优化设计 [J]. *光电子技术*, 2002, **22**(4): 223~227
- 8 Martin Hoffmann, Edgar Voges. Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2002, **12**: 349~360
- 9 X. M. Zhang, F. S. Chau, C. Quan *et al.*. A study of the static characteristics of a torsional micromirror [J]. *Sensors and Actuators (A)*, 2001, **90**: 73~81
- 10 Hao Caiyan, Yang Bingxin, Zhang Guorui *et al.*. Image quality of space line CCD camera with imaging methods of fine signal sampling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1407~1411 (in Chinese)
郝云彩, 杨秉新, 张国瑞等. 线阵 CCD 相机细分采样成像的像质研究 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1407~1411
- 11 Shisheng Lee, Longsun Huang, Changjin Kim *et al.*. Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(1): 7~13.
- 12 Zhang Yaoyu, Zhang Minghua, Qiao Yanfeng. Research of a CCD laser collimation system with high precision [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(2): 168~170 (in Chinese)
张尧禹, 张明慧, 乔彦峰. 一种高精度 CCD 激光自准直测量系统的研究 [J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 168~170
- 13 Zhang Kun. Design and fabrication of low visible light and antiblooming CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(2): 91~93 (in Chinese)
张坤. 低光照和抗晕 CCD 的设计和制作 [J]. *半导体光电*, 2003, **24**(2): 91~93