

MOEMS 光开关动力学过程分析*

孙东明 董 玮 郭文滨 刘彩霞 王国东 徐宝琨 陈维友[†]

(吉林大学集成光电子学国家重点实验室, 长春 130012)

摘要: 采用静电力驱动方式的 MOEMS 光开关, 从运动机制上来说, 是由静电力矩、恢复力矩、空气压膜阻尼力矩以及重力力矩等条件共同作用的结果. 对于微驱动器驱动条件的研究, 不能单纯地从力矩平衡的角度来分析, 应从动力学出发, 才能较好地描述其运动过程, 得到精确的驱动条件分析结果. 本文从 MOEMS 倾斜下电极扭臂式光开关出发, 介绍了动力学分析方法的过程. 通过数值求解方程, 得到器件的可动部分的运动速度等方面的结果, 将其在不同驱动条件下的运动状态描述出来, 从而达到确定光开关静电驱动条件的目的.

关键词: MOEMS; 动力学分析; 角速度; 倾斜下电极

PACC: 4283; 6120J

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)07-1448-06

1 引言

近年来, 基于 MOEMS 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^[1~6], 将成为光开关研发的重要方向. 在国内, 信息产业部电子第十三研究所以及中国科学院微系统与信息技术研究所等单位在 MEMS 领域的研究起步较早, 取得了一定的成果^[7,8]. 在多种类型的光开关中, 静电力驱动技术是较为广泛采用的一种. 但是, 从大量的报道来看, 关于光开关在给定驱动条件下的运动机理的分析为数不多, 而且都是从力矩平衡角度进行计算分析^[9]. 从力矩平衡角度出发, 归根结底是研究了运动的角加速度变化的问题, 而光开关可动部分的运动情况是由其角速度变化决定的. 因此从动力学角度出发, 研究在驱动条件下的角速度问题就显得非常有意义. 本文从 MOEMS 倾斜下电极扭臂式光开关出发, 详细介绍了动力学分析方法的过程, 通过采用数值方法求解方程, 得到光开关的可动部分的运动速度的结果, 将光开关在不同驱动条件下的运动状态描述出来, 从而达到确定光开关静电驱动条件的目的.

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, 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)). 图 1(c) 给出了倾斜下电极和悬臂梁的截面示意图. 微驱动器的结构参量数值如表 1 所示.

表 1 2 × 2 静电驱动微反射镜式光开关结构参量 μm
Table 1 Structural parameters of the 2 × 2 optical switch μm

扭臂的 长度 L	扭臂的 宽度 b	悬臂梁 长度 L_1	悬臂梁 宽度 w	平衡梁 长度 L_p	平衡梁 宽度 w_p	电极板 厚度 t	下电极 高度 H	极板间最 短距离 d
700	12	1900	1000	300	1000	10	55	0.05

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312023), 国家自然科学基金(批准号:69937019), 吉林省科技发展计划(批准号:20010319) 资助项目

[†] 本文通信作者: Email: dongmingsun@email.jlu.edu.cn
2004-10-15 收到, 2004-12-06 定稿

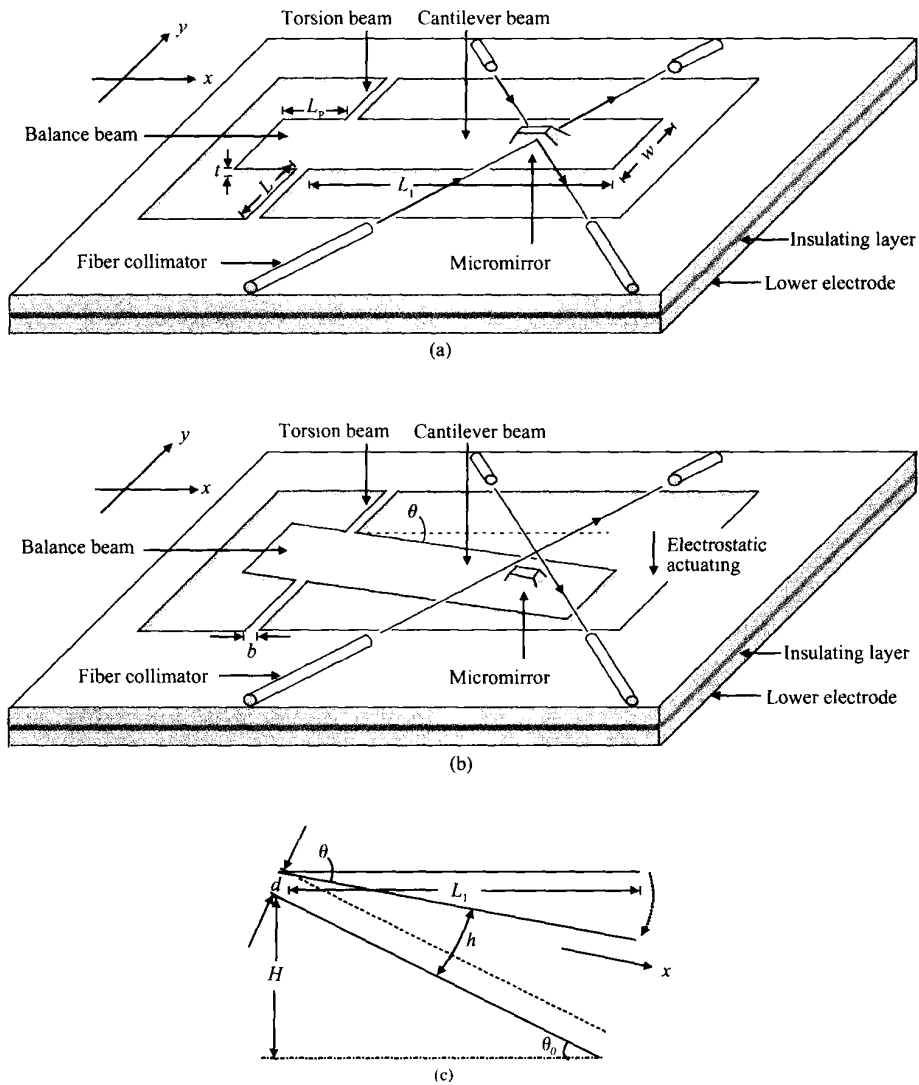


图 1 2 × 2 静电驱动微反射镜式光开关的模型示意图 (a) 反射状态; (b) 传输状态; (c) x-z 平面上的下电极和悬臂梁
 Fig.1 Sketch diagrams of a 2 × 2 optical switch with electrostatic actuating (a) Reflection state; (b) Transmission state; (c) Lower electrode and cantilever beam in the x-z plane

3 力矩的分析公式

在动力学分析过程中,有四种力矩对悬臂梁的运动发生作用,即静电力矩 M_E 、扭臂的恢复力矩 M_T 、上下电极间的空气压膜阻尼力矩 M_D 和悬臂梁、平衡梁的重力力矩 M_G 、 M_B 。下面分别给出力矩的表达式。

3.1 静电力矩 M_E

在外加驱动电压的条件下,悬臂梁受到静电力矩作用,其表达式为^[10]

$$M_E = \frac{\epsilon_0 V^2 w}{2(\epsilon_0 - \epsilon)^2} \left\{ \ln \left[1 + \frac{L_1}{d} \sin(\epsilon_0 - \epsilon) \right] - \frac{L_1 \sin(\epsilon_0 - \epsilon)}{d + L_1 \sin(\epsilon_0 - \epsilon)} \right\} \quad (1)$$

其中 $\epsilon_0 = \sin^{-1} \left(\frac{H}{L_1} \right)$ 为下电极倾斜的角度; ϵ 为悬臂梁在施加驱动电压后的扭转角度; ϵ_0 为真空介电常数,其值为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/M}$; V 为施加的驱动电压。

3.2 恢复力矩 M_T

由于悬臂梁的运动使得扭臂扭转变形,产生恢复力矩,两侧扭臂产生的恢复力矩表达式为^[11]

$$M_T = 2 \times \frac{Gtb^3}{3L} \left[1 - \frac{192}{5} \times \frac{b}{t} \tanh\left(\frac{t}{2b}\right) \right] \quad (2)$$

其中 G 为硅的剪切模量,其值为 7.3×10^4 MPa.

3.3 空气压膜阻尼力矩 M_D

由于空气流场的存在,导致悬臂梁绕扭臂运动时,电极之间的气体压力分布发生变化,形成阻碍悬臂梁运动的阻尼挤压效应,即空气压膜阻尼效应.对于不可压缩及粘度不变的气体,经过适当简化,压膜雷诺方程^[12,13]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

其中 h 为悬臂梁和下电极之间的距离; p 为空气阻尼效应导致的气膜压力; η 为空气动力粘度,在室温条件下,其数值为 1.79×10^{-5} PaS. 通过求解雷诺方程,可得空气压膜阻尼力矩为

$$M_D = C \dot{\theta} = \frac{4}{3} \times \frac{wL_1^2}{(\theta - \theta_0)^3} \quad (4)$$

其中 $C = \frac{4}{3} \times \frac{wL_1^2}{(\theta - \theta_0)^3}$ 为空气压膜阻尼系数; $\dot{\theta}$ 为悬臂梁扭转的角速度.

3.4 重力力矩 M_G, M_B

悬臂梁和平衡梁由于受到重力作用,产生重力力矩,其表达式分别为

$$M_G = \int_0^{L_1} t w g x \cos \theta dx = \frac{t w g \cos \theta L_1^2}{2} \quad (5)$$

$$M_B = \int_0^{L_p} t w g x \cos \theta dx = \frac{t w g \cos \theta L_p^2}{2} \quad (6)$$

其中 ρ 为硅材料密度; g 为重力加速度. 由于重力力矩的作用,会导致悬臂梁产生一个初始的角位移,设置一个平衡梁的目的就在于减小这种自重弯曲效果.

4 动力学分析原理

根据刚体扭转动力学方程式^[14]:

$$F \times L = I \ddot{\theta} \quad (7)$$

对于微驱动器在施加驱动电压时的情况,可以得到如下方程式

$$M_E + M_G - M_T - M_B - M_D = I \ddot{\theta} \quad (8)$$

其中 $I = \frac{1}{3} L_1^3 w t$ 为悬臂梁的转动惯量; $\ddot{\theta}$ 为悬臂梁扭转的角加速度. 设定 $M = M_E + M_G - M_T - M_B$,

那么方程(8)变为

$$M = I \ddot{\theta} + C \dot{\theta} \quad (9)$$

方程(9)是描述悬臂梁受到的力矩和角速度、角加速度的关系式,对于悬臂梁运动的任意时刻都是成立的,下面给出求解方程(9)的数值方法.

设定运动时间为 t ,将运动过程按照时间来剖分成 n 等分,每一个剖分时间段为 $\Delta t = t/n$,在第 i 个剖分点,运动的角度定义为 θ_i ,于是有

$$\dot{\theta}_i = \frac{\theta_{i+1} - \theta_{i-1}}{2 \Delta t} \quad (10)$$

$$\ddot{\theta}_i = \frac{\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (11)$$

将公式(10),(11)带入(9)式得

$$\ddot{\theta}_{i+1} = \frac{\left[2I \dot{\theta}_i + \left(\frac{C(\dot{\theta}_i) \Delta t}{2} - I \right) \ddot{\theta}_{i-1} + M(\theta_i) \Delta t^2 \right]}{I + \frac{C(\dot{\theta}_i) \Delta t}{2}} \quad (12)$$

其中 $C(\dot{\theta}_i)$ 和 $M(\theta_i)$ 是 θ 的函数. 由此,我们得到了关于 $\theta_{i+1}, \dot{\theta}_i$ 和 $\ddot{\theta}_{i-1}$ 的迭代公式. 给定初始化条件 $\theta_0 = 0$, 设定 Δt 的大小,根据方程(10)可以求得 $\dot{\theta}_1$. 于是根据公式(12)迭代关系,可以求出任意时刻的偏转角度 θ . 由迭代次数可以得到运动时间及每一时刻运动的角速度、角加速度,即将悬臂梁的运动情况实时描述出来.

5 计算结果与讨论

当施加驱动电压后,各种因素产生的力矩的综合作用使悬臂梁运动. 其中, M_E 和 M_G 对其运动产生正向加速作用, M_T, M_D 和 M_B 对其运动产生反向阻碍作用. 图 2 给出了 $M_E + M_G$ 与 $M_T + M_D + M_B$ 的比值在悬臂梁运动的不同位置的变化曲线. 由图中曲线变化趋势可以看出,比值随悬臂梁偏移量变化较为复杂. 由力矩计算公式可知, M_T 随偏移量呈线性增大的关系; M_E 随偏移量呈非线性增大,在偏移角度较大时显著增大; M_D 只有在空气薄膜较窄和悬臂梁运动速度较大的情况下,才会明显表现出来. 由图可以看出,在驱动电压为 10V 时,比值在最低点大于 1; 驱动电压为 9V 和 8.46V 时,比值小于 1,即在悬臂梁运动的某些位置,阻碍运动的力矩要大于促进运动的力矩,悬臂梁运动的角速度小于零. 这种现象可以在图 3 中的角速度随悬臂梁偏移量变化曲线同样看出. 角加速度随悬臂梁扭转偏移量增

加,先减小后增大,其中在特定的区域内角加速度小于零;在接近运动的终点时,空气阻尼显著增大,导致角加速度迅速减小.图 3 曲线中的虚线表示当不考虑空气阻尼效应,驱动电压为 9.05V 时角加速度变化情况,在偏移量约为 20 μm 时,其角加速度约为零.

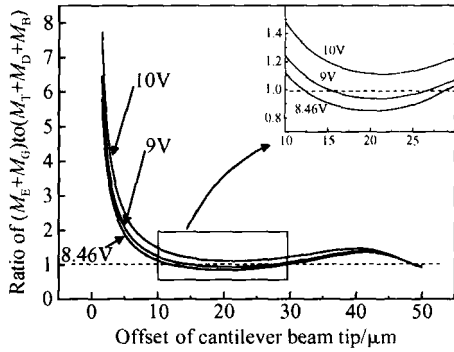


图 2 $(M_E + M_G) / (M_T + M_D + M_B)$ 随悬臂梁扭转的偏移量的变化关系

Fig. 2 Relations between $(M_E + M_G) / (M_T + M_D + M_B)$ and the offset of the cantilever beam tip

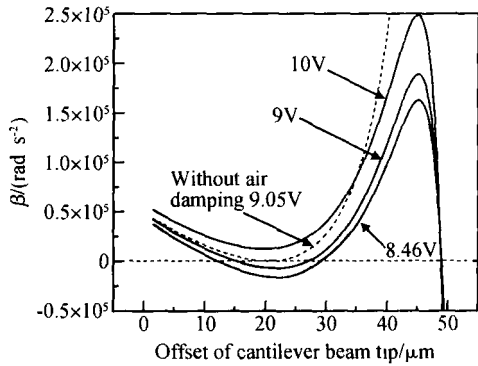


图 3 角加速度 随悬臂梁扭转的偏移量的变化关系

Fig. 3 Relations between β and the offset of the cantilever beam tip

图 4 给出了悬臂梁运动的角速度和偏移量的关系曲线.正因为图 3 中的角加速度的变化,才决定了角速度在图 4 的变化趋势.在运动的初始阶段,角速度随偏移量增大而增大;然后对于不同的驱动电压有着不同的变化趋势.在驱动电压较大时(如 10V),角速度增加的趋势减缓;在驱动电压减小时(如 9V, 8.7V),角速度反而有减小的趋势,在驱动电压为 8.46V 时,角速度减小到接近于零;从驱动电压为 8.45V 的曲线可以看出,角速度减小到零然后变为负值.可以看出,当驱动电压小于 8.46V 以后,悬臂

梁不能运动到指定工作位置,而是进行反复振荡;由于空气阻尼作用的存在,运动的速度越来越小.由此可以断定,当运动的角速度为零时,所施加的驱动电压即为光开关工作的临界阈值电压.由图可以看出采用表 1 给出的结构参量的条件下,临界阈值电压约为 8.46V.图中标记的 Δ 表示由于悬臂梁自身重力作用而产生的初始偏转位移.

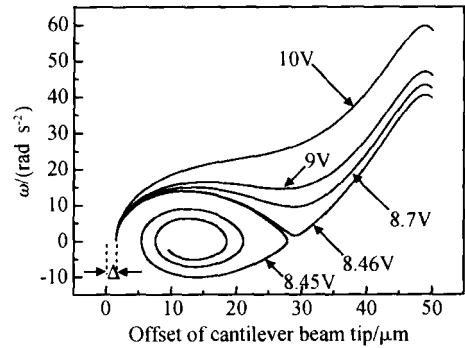


图 4 角速度 随悬臂梁扭转的偏移量的变化关系

Fig. 4 Relations between ω and the offset of the cantilever beam tip

图 5 给出了在驱动电压为 8V (小于临界阈值电压)条件下,空气压膜阻尼效应对悬臂梁运动情况的影响.可以看出,当不考虑阻尼时,悬臂梁进行理想的周期性振荡;而实际情况中,阻尼力矩会使悬臂梁运动的振幅越来越小,最后稳定在特定的偏转位置上,这与图 4 给出的角速度曲线变化的趋势相吻合.

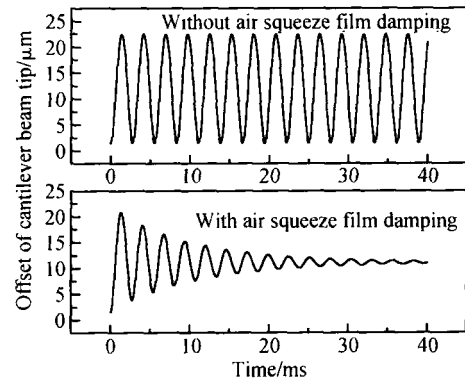


图 5 空气压膜阻尼效应对悬臂梁偏移量随时间变化影响的对比关系 驱动电压为 8V.

Fig. 5 Offset of the cantilever beam tip versus the time without or with the effect of the squeeze film damping The actuating voltage is 8V.

按照传统的力矩平衡的方法,即

$$M_E + M_G - M_T - M_B = 0 \quad (13)$$

可以得到驱动电压和偏移量的变化曲线关系,如图 6 所示.由图中可以看出,其阈值电压约为 9.05V,与采用动力学方法得到的阈值电压 8.46V 不但存在差异,而且在原理上也是根本不同的.力矩平衡方法是取力矩相等的条件来得到阈值电压,图 3 中的虚线也有此反映,即在电压 9.05V 时在特定位置角加速度为零;而动力学方法在计算阈值电压时,是取角速度为零的临界值.在悬臂梁实际扭转过程中,判断其是否可以运动以及运动的方向是由角速度表征的,而不是由角加速度来确定的,显然,本文所描述的动力学计算阈值电压的方法是与实际问题相符合的.

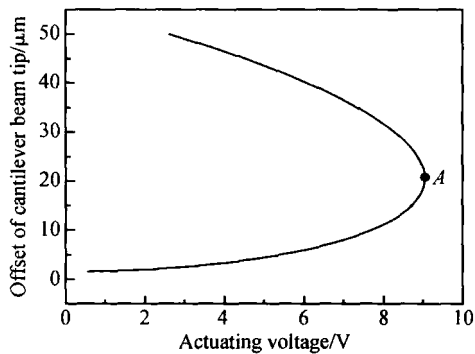


图 6 驱动电压与悬臂梁偏移量的关系曲线

Fig. 6 Curve of the actuating voltage versus the offset of the cantilever beam tip

6 结论

本文从 2×2 MOEMS 光开关的模型出发,分析了在给定驱动电压条件下,悬臂梁在多种力矩共同作用下的运动情况.通过给出静电力矩、恢复力矩、空气压膜阻尼力矩和重力力矩的分析公式,得到了描述运动条件的动力学方程.在介绍了动力学方程的解法后,对悬臂梁在不同驱动电压下的运动情况进行了详细的讨论,得到了求解临界阈值电压的方法.通过与传统上介绍的力矩平衡方法的对比和讨论,明确了采用动力学方法来求解阈值电压是更接近于微驱动器运动的物理本质,具有一定的理论意义,对 MOEMS 光开关的设计和研制也具有一定的现实意义.

参考文献

- [1] Horenstein M N, Pappas S, Fishov A, et al. Electrostatic micromirrors for subaperturing in an adaptive optics system. *J Electrostatics*, 2002, 54: 321
- [2] McCarthy B, Bright V M, Neff J A. A multi-component solder self-assembled micromirror. *Sensor and Actuators A*, 2003, 103: 187
- [3] Hill M, O'Mahony C, Berney H, et al. Verification of 2-D MEMS model using optical profiling techniques. *Opt Lasers Eng*, 2001, 36: 169
- [4] Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W. On the expandability of free-space micromachined optical cross connects. *J Lightwave Technol*, 2000, 18: 482
- [5] Xu Y, Wu J H, Liu L T, et al. Design and fabrication of a F-P optical switch based on MOEMS technology. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(8): 840 (in Chinese) [徐杨, 吴霁虹, 刘理天, 等. 基于 MOEMS 技术的一种 F-P 光开关的设计与制作. *半导体学报*, 2002, 23(8): 840]
- [6] Zuo Y H, Huang C J, Cheng B W, et al. 1. $3\mu\text{m}$ Si-based MOEMS optical tunable filter with a tuning range of 90nm. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(11): 1140
- [7] Liang C G, Xu Y Q, Yang Y J. Fabrication of MEMS optical switches. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(12): 1551 (in Chinese) [梁春广, 徐永青, 杨拥军. MEMS 光开关. *半导体学报*, 2001, 22(12): 1551]
- [8] Huang S S, Guo N X, Huang H, et al. A micromachined piezoresistive accelerometer and its design optimization. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2003, 7/8: 305 (in Chinese) [黄树森, 郭南翔, 黄晖, 等. 一种微机械压阻式加速度传感器及其设计优化. *微纳电子技术*, 2003, 7/8: 305]
- [9] Zhang X M, Chau F S, Quan C, et al. A study of the static characteristics of a torsional micromirror. *Sensor and Actuators A*, 2001, 90: 73
- [10] Toshiyoshi H, Fujita H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix. *J Microelectromech Syst*, 1996, 5(4): 231
- [11] Lee S S, Huang L S, Kim C J, et al. Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors. *J Lightwave Technol*, 1999, 17: 7
- [12] Starr T. Squeeze-film damping in solid-state accelerometer. *IEEE Workshop on Solid-State Sensor and Actuator*. Hilton Head Island, SC, USA, 1990: 44
- [13] Pan F, Kubby J, Peeters E, et al. Squeeze film damping effect on the dynamic response of a MEMS torsion mirror. *J Micro-mech Microeng*, 1998, 8: 200
- [14] Kibble T W B. *Classical mechanics*. 2nd ed. London: Mc Graw-Hill Book Com, 1973: Chapter 10

Characteristic on Dynamic Response of a MOEMS Optical Switch *

Sun Dongming , Dong Wei , Guo Wenbin , Liu Caixia , Wang Guodong , Xu Baokun , and Chen Weiyu[†]

(*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract : This paper presents theoretical analysis on the dynamic response of a MOEMS optical switch with a slant lower electrode. Descriptive analytical formulae for the dynamic characteristic of the cantilever beam are derived. By solving the dynamic equation ,the movement characteristics of the optical switch are described. From the computed results ,a method of determining the critical actuating voltage is presented. This method is more accurate for the study of the MOEMS optical switch than previous ones.

Key words : MOEMS; dynamic analysis; angular speed; slant lower electrode

PACC : 4283 ; 6120J

Article ID : 0253-4177(2005)07-1448-06

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312023) ,the National Natural Science Foundation of China (No. 69937019) ,the Science Development Plan of Jilin Province (No. 20010319)

[†] Corresponding author ,Email :dongmingsun@email.jlu.edu.cn

Received 15 October 2004 ,revised manuscript received 6 December 2004