

具有倾斜下电极的扭臂驱动结构的设计与制作*

董 玮 阮圣平 张歆东 刘彩霞 贾翠萍 潘建旋 张 龙 孙东明 纪 平 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联合实验室, 长春 130023)

摘要: 分析了扭臂驱动结构的上电极端部位移与外加电压之间的关系, 提出了一种具有倾斜下电极的驱动结构, 并通过倾斜一定角度的(111)硅片的各向异性腐蚀制作了倾斜下电极. 理论分析和实验结果表明, 倾斜下电极的 pull-in 电压几乎比平面下电极的 pull-in 电压降低一半.

关键词: 微机械; 光开关; 扭臂; 倾斜下电极

EEACC: 2560Z; 4180; 4250

中图分类号: TN256; TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)11-1196-04

1 引言

随着光通信和光网络技术的发展, 光开关的地位也越来越重要, MOEMS(微光电子机械系统)光开关由于具有插入损耗和串话小、消光比高、稳定性好、透明性和可扩展性好、易于集成、偏振不灵敏等优点, 将成为全光网络的主流器件之一^[1-3]. MOEMS 光开关的驱动方式主要有热驱动、电磁驱动和静电驱动等^[4-6]. 热驱动的优点是驱动力和位移较大, 缺点是升温速度和散热速度之间的矛盾不易解决, 响应速度较慢. 电磁驱动由于要制作线圈, 驱动结构的尺寸较大, 同时还存在电磁干扰等问题. 因此, 静电驱动是目前 MOEMS 光开关中最广泛采用的一种驱动方式. 常见的静电驱动方式有: 梳状电极、SDA (scratch drive actuator)、悬臂驱动和扭臂驱动等^[7-9]. 梳状电极和 SDA 驱动精度高、开关动作快、驱动电压低, 但是结构较复杂. 悬臂和扭臂驱动结构简单、工艺容易实现, 但驱动电压较高.

本文介绍了一种采用倾斜下电极结构降低驱动电压的方法, 并且通过偏一定角度的(111)硅片各向异性腐蚀制作倾斜下电极.

2 光开关工作原理

图 1 为我们制作的 2×2 微机械光开关的结构示意图. 上电极、扭臂、微反射镜和光纤槽在同一硅片上, 它们是采用体硅微机械加工的方法在(100)硅片上制作的^[10]. 在没有电压输入时, 上电极的位置不动, 微反射镜处在光通路上, 入射光被微反射镜反射, 改变方向后进入到镜面同一侧的光纤中, 这是开关的反射状态. 当上电极和下电极之间有电压输入时, 在静电力的作用下, 上电极带动微反射镜向下运动移开光通路, 入射光沿直线传播进入前方的光纤, 这是开关的直通状态.

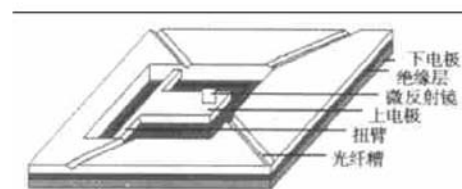


图 1 2×2 微机械光开关的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2×2 micromechanical optical switch

* 国家 863 计划(No. 2002AA312023)、国家自然科学基金(批准号: 69937010)和吉林省科学计划(No. 20010319)资助项目

董 玮 女, 1973 年出生, 讲师, 博士研究生, 现从事 MOEMS 光通信器件的研究.

2002-12-11 收到, 2003-02-20 定稿

3 驱动结构的设计和分析

静电力分析如图 2 所示, 当上电极和下电极之间加电压为 V 时, 上电极的倾角为 θ , dx 微元受到

的静电力为

$$q(x) = \frac{\epsilon_0 W dx}{2} \left(\frac{V}{d - x \sin \theta} \right)^2 \quad (1)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$; W 为上电极的宽度; d 为上、下电极之间的初始间隔。

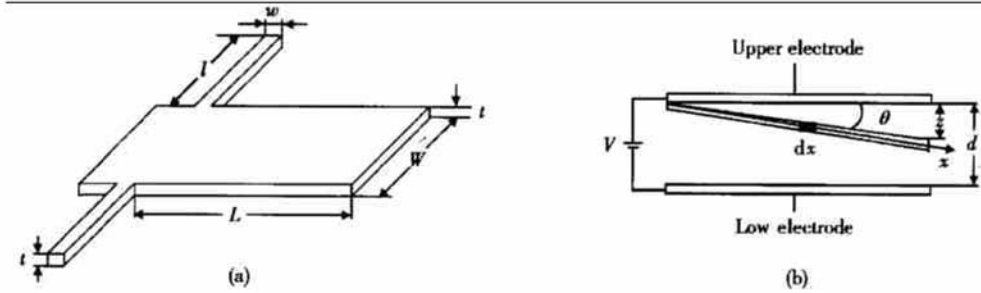


图 2 静电力分析示意图 (a) 扭臂结构的形状和尺寸; (b) 变形前后上、下电极的相对位置

Fig. 2 Schematic diagram of analyzing electrostatic force (a) Shape and dimension of the torsion beam; (b) Relative situation of upper and low electrodes

将 dx 微元受到的静电力矩 $xq(x)$ 在 $x = [0, L]$ 上积分可得到总的静电力矩

$$T_e = \frac{\epsilon_0 W V^2}{2} \int_0^L \frac{x dx}{(d - x \sin \theta)^2} = \frac{\epsilon_0 W V^2}{2 \sin^2 \theta} \left[\ln \left| 1 - \frac{L \sin \theta}{d} \right| + \frac{L \sin \theta}{d - L \sin \theta} \right] \quad (2)$$

当 $\theta \ll 1$ 时, 公式(2)可简化为

$$T_e = \frac{\epsilon_0 W V^2}{2 \theta^2} \left[\ln \left| 1 - \frac{L \theta}{d} \right| + \frac{L \theta}{d - L \theta} \right] \quad (3)$$

扭臂的恢复力矩为

$$T_m = 2 \times \frac{G w t^3}{3 l} \theta \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \times \frac{t}{w} \tanh \left(\frac{\pi w}{2 t} \right) \right] \quad (4)$$

式中 G 为单晶硅的剪切弹性模量; l 、 w 和 t 分别为扭臂的长、宽和厚。

由静电力矩和扭臂的恢复力矩平衡, 可以得到外加电压与上电极倾斜角度之间的关系:

$$V = \left[\frac{4 G w t^3 \theta^3 \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \times \frac{t}{w} \tanh \left(\frac{\pi w}{2 t} \right) \right]}{3 \epsilon_0 W l \left[\ln \left| 1 - \frac{L \theta}{d} \right| + \frac{L \theta}{d - L \theta} \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中 $\sin \theta = \frac{z}{L}$, z 为上电极端部的位移。

从(5)式可以看出, 扭臂和上电极的尺寸都会影响驱动电压, 而电压对扭臂的厚度 t 最敏感, 与 t 的三次方成正比, 但考虑到整个器件的结构尺寸、强度以及开关时间的限制, 这些参数的选择都受到一定的制约。此外, 驱动电压还随上下电极之间的初始间

隔 d 的减小而降低, 因此也可以通过调整 d 来减小驱动电压。但当上下电极间距离 d 过小时, 上电极向下偏转的角度不能很大, 微反射镜不能从光通路中有效地移开, 使开关的插入损耗和通道之间的串扰加大。从静电力分析图 2(b) 中可以看出, 当上电极发生偏转时, 靠近扭臂一侧的上电极与下电极之间的距离总是很大, 因此这部分的静电力比较小, 于是我们通过改变下电极的形状, 即下电极有一个最初的倾角来降低驱动电压, 如图 3 所示, 这样在扭臂一侧上下电极之间的距离就可以大大减小, 从而可以降低驱动电压。这时驱动电压与倾斜角度之间的关系可近似地表示为

$$V = \left[\frac{4 G w t^3 \theta (\theta_1 - \theta)^2 \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \times \frac{t}{w} \tanh \left(\frac{\pi w}{2 t} \right) \right]}{3 \epsilon_0 W l \ln L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中 θ_1 为下电极的最初倾角, 它的值由上电极的尺寸和反射镜需要移动的距离决定。

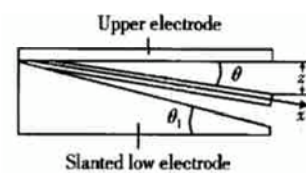


图 3 倾斜下电极的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the slanted low electrode

图 4 给出了 $\theta_1 = 2.5^\circ$, $W = 700\mu\text{m}$, $L = 1500\mu\text{m}$, $d = 60\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$, $l = 600\mu\text{m}$, $t = 10\mu\text{m}$ 时, 平面下电极和倾斜下电极时的驱动电压 V 与上

电极端部位移 z 之间的关系曲线. 从图中可以看出, 倾斜下电极的 pull-in 电压(曲线拐点处的电压)几乎比平面下电极的 pull-in 电压降低一半.

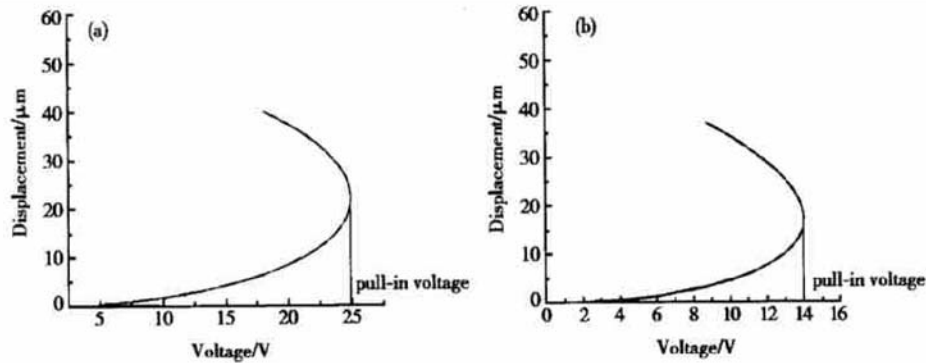


图 4 驱动电压与上电极端部位移之间的关系曲线 (a) 平面下电极; (b) 倾斜下电极

Fig. 4 Relative curves between applied voltage and displacement at the end of upper electrode (a) Flat low electrode; (b) Slanted low electrode

4 制作和测试

选取偏 2.5° 的 (111) 硅片, 其法线方向为由 $\langle 111 \rangle$ 方向向最近的 $\langle 110 \rangle$ 方向偏转 2.5° . 制作步骤如下: (1) 双面 LPCVD 生长氮化硅 140nm 作为腐蚀的掩模; (2) 反应离子刻蚀氮化硅形成下电极图形, 使用的气体是 CF_4 和 O_2 ; (3) 在 75°C 下, 35% 的 KOH 溶液中腐蚀制作下电极, 见图 5; (4) 生长上下电极的金属层和绝缘层之后, 把带有微反射镜和扭臂结构的上电极硅片和下电极硅片在边缘粘合在一起.



图 5 倾斜下电极的 SEM 图

Fig. 5 SEM image of slanted low electrode

图 6 给出了采用倾斜下电极时, 实验测得的驱动电压和上电极端部位移之间的关系曲线. 从图中可以看出, 实验测得的 pull-in 电压为 13.2V , 比理论计算的 pull-in 电压 14V 略低一些, 这主要是因为

器件的制作尺寸与设计尺寸之间存在偏差, 特别是扭臂厚度的偏差, 因为在所有结构参数中, 驱动电压对扭臂的厚度最敏感.

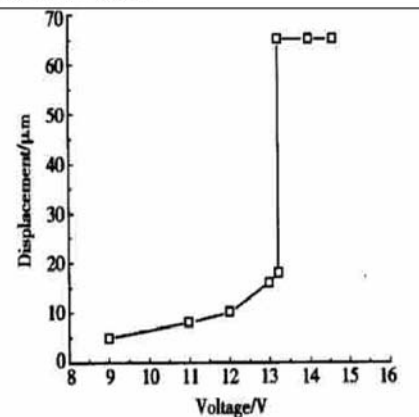


图 6 上电极端部位移与驱动电压之间的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between applied voltage and displacement at end of upper electrode

从图 6 中还可以看出, 当驱动电压小于 pull-in 电压时, 上电极处于稳定区域, 随着驱动电压增加, 上电极的端部位移增加; 当驱动电压大于 pull-in 电压时, 上电极迅速地下降并与下电极接触. 这就是 pull-in 现象.

5 结论

扭臂结构微机械光开关的驱动电压随着上下电

极之间距离减小而降低,但当上下电极间距离过小时,上电极向下偏转的角度不能很大,微反射镜不能从光通路中有效地移开,使开关的插入损耗和通道之间的串扰加大.本文提出了一种倾斜下电极的驱动结构,并通过倾斜一定角度的(111)硅片的各向异性腐蚀制作了倾斜下电极.理论分析和实验结果表明,倾斜下电极的 pull-in 电压几乎比平面下电极的 pull-in 电压降低一半.

参考文献

- [1] Hecht J. All-optical networks need optical switches. *Laser Focus World*, 2000, 189(5): 174
- [2] Lin L Y, Tkach R W. On the expandability of free-space micromachined optical cross connects. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(4): 482
- [3] Liang Chunguang, Xu Yongqing, Yang Yongjun. Fabrication of MEMS optical switches. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22: 1551 [梁春广, 徐永青, 杨拥军. MEMS 光开关. *半导体学报*, 2001, 22: 1551]
- [4] Kopka P, Hoffmann M. Coupled U-shaped cantilever actuators for 1×4 and 2×2 optical fiber switches. *J Micromechan Microeng*, 2000, 10: 260
- [5] Maekoba H. Self-aligned vertical mirror and V-grooves applied to an optical-switch: modeling and optimization of bistable operation by electromagnetic actuation. *Sensors and Actuators A*, 2001, 87: 172
- [6] Wei Huazheng, Guo Fangmin, Lai Zongsheng, et al. CAD of RF micromechanical switches. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23: 947 [魏华征, 郭方敏, 赖宗声, 等. MEMS 光开关. *半导体学报*, 2002, 23: 947]
- [7] Degani O, Sicher E, Lipson A. Pull-in study of an electrostatic torsion microactuator. *J Microelectromech Syst*, 1998, 7(4): 373
- [8] Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W. Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(4): 525
- [9] Toshiyoshi H, Fujita H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix. *J Microelectromech Syst*, 1998, 5(4): 231
- [10] Dong Wei, Chen Weiyu, Han Yang, et al. Fabrication of reflective micromirror in micromechanical optical switches. *Proc SPIE*, 2002, 4928: 103

Design and Fabrication of Torsion Beam Actuator Based on Slanted Low Electrode*

Dong Wei, Ruan Shengping, Zhang Xindong, Liu Caixia, Jia Cuiping, Pan Jianxuan,
Zhang Long, Sun Dongming, Ji Ping and Chen Weiyou

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Sciences & Engineering,
Jilin University, Changchun 130023, China)

Abstract: The relation between the applied voltage and the displacement at the end of upper electrode is studied. The actuator with the slanted low electrode is proposed and fabricated with certain tilting angle (111) silicon. Theoretical analysis and experiment results indicate that the pull-in voltage based on the slanted low electrode actuator is half of that based on the flat low electrode.

Key words: micromechanics; optical switches; torsion beam; slanted low electrode

EEACC: 2560Z; 4180; 4250

Article ID: 0253-4177(2003)11-1196-04

* Project supported by National Research and Development Plan for High Technology of China (863 Plan) (No. 2002AA312023), National Natural Science Foundation of China (No. 69937010) and Jilin Province's Science Development Plan (No. 20010319)

Dong Wei female, was born in 1973, PhD candidate. Her current research interests are in MOEMS optical communication device.

Received 11 December 2002, revised manuscript received 20 February 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics