

MOEMS 光开关响应时间的分析计算

孙东明, 董 玮, 刘彩霞, 郭文滨, 张歆东, 纪 平, 徐宝琨, 陈维友

(吉林大学集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区, 吉林长春 130023)

摘 要: 本文结合静电驱动扭臂式 MOEMS 光开关, 给出了响应时间的计算方法, 得出开关时间的计算公式. 分析了器件几何参数对开关时间的影响, 给出了开关时间随参数的变化趋势. 通过优化结构给出一组几何参数, 保证了驱动电压在 10V 左右, 开关时间可以达到 1 至 2ms.

关键词: MOEMS; 扭臂结构; 倾斜下电极; 静电驱动; 开关时间

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 03722112 (2003) 12167203

The Calculation of Switching Time for a MOEMS Optical Switch

SUN Dongming, DONG Wei, LIU Cai Xia, GUO Wenbin, ZHANG Xindong, JI Ping, XU Baokun, CHEN Weiyu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China)

Abstract: The switching time calculation method of the electrostatic driven MOEMS optical switch with torsion beam structure was presented, and the formula of the switching time was given. We gave the switching time for different structures. Finally optimization structure parameters are given, the electrostatic driving voltage is about 10V and the switching time is 1~2ms.

Key words: MOEMS; torsion beam; slant low electrode; electrostatic driving; switching time

1 引言

随着光通讯技术的迅猛发展, 光开关作为光网络的重要环节受到人们高度重视. 传统的光开关由于体积大、速度慢、价格昂贵等缺点, 已不能满足光网络技术迅速发展的要求. 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人们广泛的兴趣^[1~4], 将成为光开关研发的重要方向. 在 MOEMS 光开关研究中, 硅基静电驱动是目前广泛采用的一种. 常见的静电驱动方式有: 梳状电极、SDA (scratch drive actuator)^[5]、悬臂驱动和扭臂驱动等. 梳状电极和 SDA 具有精度高、开关灵敏、驱动电压低等优点, 但是结构比较复杂. 悬臂和扭臂驱动的驱动电压高于前两者, 但结构相对简单、工艺上容易实现. 通过设计倾斜下电极扭臂式静电力驱动结构可以有效降低驱动电压^[6]. 同时, 光开关响应时间决定了光开关的灵敏度, 可以直接影响光网络互联的信息传输质量, 是光开关一个比较重要的性能参数. 本文结合扭臂式静电驱动光开关给出开关响应时间的分析方法.

2 倾斜下电极扭臂式光开关

图 1 给出 2@2 倾斜下电极扭臂式光开关^[6]的结构示意图. 微反射镜位于上电极, 放置于四根垂直交叉光纤的交叉光路上. 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偏移离开光通路, 由此达到开关的目的. 如图 1 所示, 响应时间可定义为:

$$T = T_{off} + T_{on} \quad (1)$$

其中, T_{off} 为悬臂梁在外加驱动电压作用下向下运动到指定位置的时间; T_{on} 为在去掉外加驱动电压后悬臂梁向上回到平衡位置的时间.

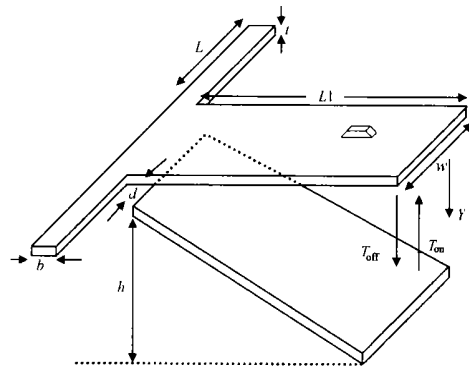


图 1 2@2 倾斜下电极扭臂结构

3 理论分析

3.1 关于 T_{off} 的分析

光开关外加驱动电压时, 悬臂梁在静电力、重力作用下受到三种力矩作用: 重力力矩 M_G 、静电力矩 M_E 和扭臂力矩 M_T .

收稿日期: 20021022; 修回日期: 20030324

基金项目: 跨世纪优秀人才培养计划基金; 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20010319); 国家科技部/863 计划资助项目 (No. 2002AA312020

(23)) 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重力力矩的表达式:

$$M_G = \int_0^{L_1} Qwgx \cos H dx = \frac{Qwg \cos H L_1^2}{2} \quad (2)$$

其中 Q 为材料密度, w 为悬臂梁的宽度, L₁ 为悬臂梁的长度, t 为悬臂梁的厚度, H 为上电极受静电力作用而产生的倾斜角度.

静电力矩的表达式^[9]:

$$M_E = \frac{\epsilon_0 V^2 w}{2} Q \int_0^{L_1} \left\{ \left[\frac{d}{\sin(H_0 - H)} + X \right] (H_0 - H) \right\}^2 dX$$

$$= \frac{\epsilon_0 V^2 w}{2(H_0 - H)^2} \left\{ \ln \left[1 + \frac{L_1}{d} \sin(H_0 - H) \right] - \frac{L_1 \sin(H_0 - H)}{d + L_1 \sin(H_0 - H)} \right\} \quad (3)$$

其中 $H_0 = \sin^{-1} \left(\frac{h}{L_1} \right)$ 为下电极倾斜的角度, h 为下电极倾斜的高度, ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 81.85 \times 10^{-12} \text{F/M}$, V 为施加电容极板间的驱动电压.

扭转力矩的表达式^[7]:

$$M_T = \frac{Gcb^4 H}{L} \left[1 - \frac{192}{P^5 a} \tanh \left(\frac{Pa}{2} \right) \right] \quad (4)$$

其中 G 为硅的弹性模量 $G = 71.3 \times 10^4 \text{MPa}$, b 为扭臂宽度, t 为扭臂的厚度, A 是与 t/b 有关系数^[8].

悬臂梁的转动惯量 I 的表示式:

$$I = \frac{1}{3} Q L_1^3 w t \quad (5)$$

根据刚体扭转动力学方程^[9]:

$$\int E F @ L = IB \quad (6)$$

$$\text{得 } M_G + M_E - 2M_T = IB \quad (7)$$

将式(2)、(3)、(4)和式(5)代入式(7),可以得到:

$$\frac{Qwg \cos H L_1^2}{2} + \frac{\epsilon_0 E V^2 w}{2(H_0 - H)^2} \left\{ \ln \left[1 + \frac{L_1}{d} \sin(H_0 - H) \right] - \frac{L_1 \sin(H_0 - H)}{d + L_1 \sin(H_0 - H)} \right\} - \frac{2Gcb^4 H}{L} \left[1 - \frac{192}{P^5 a} \tanh \left(\frac{Pa}{2} \right) \right] = \frac{1}{3} Q L_1^3 w B \quad (8)$$

3.1.2 关于 T_{on}的分析

当停止外加驱动后,悬臂梁受到两种力矩作用:重力力矩 M_G, 扭臂力矩 M_T. 根据式(6)可得:

$$2M_T - M_G = IB \quad (9)$$

把式(2)、(4)、(5)代入式(9)可得:

$$\frac{2Gcb^4 H}{L} \left[1 - \frac{192}{P^5 a} \tanh \left(\frac{Pa}{2} \right) \right] - \frac{Qwg \cos H L_1^2}{2} = \frac{1}{3} Q L_1^3 w B \quad (10)$$

通过以上分析,我们已经得到关于角加速度 B(t) 的方程式(8)和式(10). 根据角加速度 B(t)、角速度 X(t)、角度 H(t) 三者之间的关系:

$$X(t) = X_0 + \int_0^t B(t) dt \quad (11)$$

$$H(t) = H_0 + \int_0^t X(t) dt \quad (12)$$

可以计算出开关响应时间 T_{on}和 T_{off}.

4 结果与讨论

我们具体分析器件的几何结构参数及驱动电压对开关响应时间的影响.

图2显示了开关时间随扭臂宽度的变化关系曲线. 可见随着宽度增大, T_{on}有减小的趋势, 而 T_{off}有增大的趋势. 图3给出了开关时间与扭臂长度的变化关系曲线. 可见随着长度增大, T_{on}有增加的趋势, 而 T_{off}有微弱减小的趋势, 开关时间随悬臂梁长度、宽度的变化也有相似的趋势.

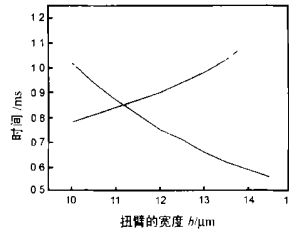


图2 开关时间与扭臂宽度的关系

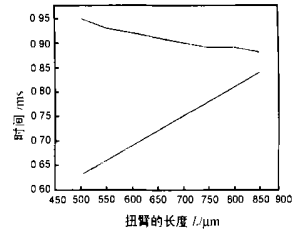


图3 开关时间与扭臂长度的关系

根据式(1)将 T_{on}和 T_{off}求和得到响应时间 T. 我们给出响应时间在不同驱动电压下随几何参数的变化关系. 图4、5给出了响应时间与扭臂宽度、长度在不同驱动电压下的变化关系曲线. 由图2可知 T_{on}和 T_{off}变化趋势相反, 所以导致响应时间先减小再增大.

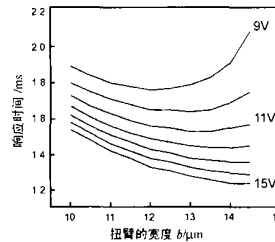


图4 响应时间与扭臂宽的关系

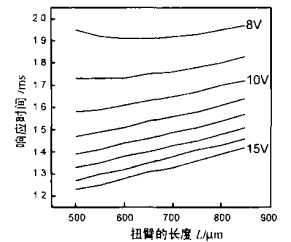


图5 响应时间与扭臂长度的关系

图6、7给出了响应时间与悬臂梁长度、宽度的变化关系曲线.

图8给出了响应时间与下电极高度的变化关系曲线. 可见随着驱动电压变大, 响应时间变短; 随着下电极高度增加, 响应时间变长.

由上面的讨论可知, 为了提高光开关的速度, 在设计器件的结构尺寸时, 需要合理选择扭臂的长度和宽度、悬臂梁长度和宽度、下电极的高度. 由于工艺条件的限制, 必须合理的选择结构尺寸的大小.

这里给出一个优化实例, 优化目标是静电驱动电压为 10V, 在这个条件下, 尽可能提高光开关的速度. 我们优化了器件的结构得到如下参数: 扭臂的长度、宽度、厚度各为 700Lm、12Lm、10Lm, 悬臂梁的长度、宽度、厚度各为 1900Lm、1000Lm、10Lm, 上下电极间最近距离为 0.05Lm, 下电极高度为 55Lm. 采用以上设计参数, 我们得到 T_{on}为 0.9ms, T_{off}为 0.75ms, 响应时间为 1.65ms.

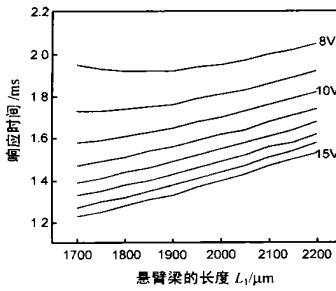


图 6 响应时间与悬臂梁长度的关系

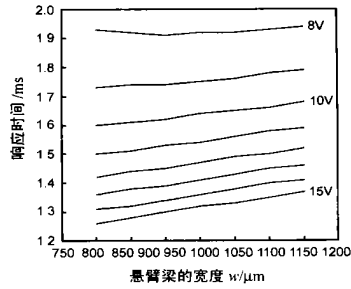


图 7 响应时间与悬臂梁宽度的关系

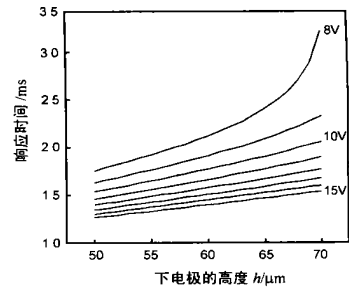


图 8 响应时间与下电极高度的关系

5 结论

本文给出了 MOEMS 光开关响应时间的计算方法。由倾斜下电极扭臂式光开关的具体结构出发,给出了响应时间的计算分析公式。根据具体数据参数给出了计算结果,并分析了响应时间随参数改变的变化趋势。在保证光开关工作时静电驱动电压为 10V 的条件下,通过优化几何结构参数,得到如下数据参数:扭臂的长度、宽度、厚度各为 700 μm 、12 μm 、10 μm ,悬臂梁的长度、宽度、厚度各为 1900 μm 、1000 μm 、10 μm ,上下电极间最近距离为 0.05 μm ,下电极高度为 55 μm 。采用以上结构,作为光开关的一个重要性能参数的响应时间 $T < 2\text{ms}$ 。通过以上方法优化设计的光开关在我们实验室正处于制作之中。

参考文献:

- [1] C R Giles, et al. A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in lightwave subsystems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(1): 18- 25.
- [2] ShiSheng Lee, et al. Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(1): 7- 13.
- [3] C Marxer, et al. Vertical mirrors fabricated by reactive ion etching for fiber optical switching applications[A]. in Proc. 10th Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)[C]. 1997. 49- 54.
- [4] L Y Lin, et al. High-density micromachined polygon optical crossconnects exploiting network connection - symmetry[J]. IEEE Photon.

Technol. Lett, 1998, 10: 1425- 1427.

- [5] T Akiyama, et al. Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS[J]. Journal of MEMS, 1998, 7(4): 373- 379.
- [6] 孙东明,等.MOEMS 光开关静电驱动的优化设计[J]. 光电子技术, 2002, 22(4): 223- 227.
- [7] Toshiyoshi H, et al. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix[J]. Journal of MEMS, 1996, 5(4): 231- 237.
- [8] 张大伦. 材料力学(上册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. 183 - 184.
- [9] 徐行. 力学[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1983. 357- 359.

作者简介:



孙东明 男, 1978 年 12 月生于吉林镇赉, 2001 年获吉林大学电子工程系学士学位, 现为集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区研究生, 所学专业为微电子学与固体电子学, 主要研究方向为 MOEMS 光开关的设计研制. Email: dongmingsun@email.jlu.edu.cn.

陈维友 男, 1965 年 1 月生于吉林, 教授, 博士生导师, 研究兴趣为光电子器件物理及模型, 光电子器件和光子器件计算机辅助分析与设计, 信息光电子器件研究.