

# 一种智能光网络中的亚毫秒光开关阵列

万鹏 晏辉鸣 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江大学光及电磁波研究中心, 浙江大学光电工程学系, 杭州 310027)

**摘要** 设计研制了一种亚毫秒级微机械光开关阵列. 该阵列驱动电压为 5 V, 开关时间小于 750  $\mu\text{s}$ , 插入损耗在 0.6 dB~0.8 dB 之间, 串扰 < -70 dB. 具有结构简单、成本低廉、可大规模集成的优点, 能很好地解决智能光网络节点连接设备 OADM 快速信号转换和串扰问题. 详细介绍了该光开关阵列实现原理, 报告了器件性能测试, 并应用 FEA 软件分析了开关单元中磁场和开关驱动过程.

**关键词** 智能光网络; 光开关; OADM; 微机械; 微加工

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

随着光网络发展, 一味追求超大容量的组网方式受到摒弃, 如何逐步建立一个经济有效的智能化网络 (ION) 倍受关注. 智能光网络把传输、交换、网络管理及光信令与路由控制融合在一起, 使传输网变成一个高可靠、易维护的“简单”网络<sup>[1]</sup>. 这种技术与其他联网技术相比显示出巨大优势. 然而要真正实现链路指配和动态网络恢复功能, 没有高效的硬件支持是不可能的. 目前, 由于光网络节点中使用的光分器件难以避免的缺陷和光开关存在串扰, 使得同一个信号的不同分量在 OADM 里面传播, 最终在出口处产生零差串扰<sup>[2]</sup>. 在光通信网络业务量的急剧膨胀的今天, 网络节点的尺寸越做越大, OADM 中速度瓶颈和零差串扰的凸现已经成为一个制约智能光网络发展的因素之一. 为了改善 OADM 中存在的问题, 一个可行的办法是在每路光通道中加入一个  $1 \times 2$  光开关来构成低串扰结构<sup>[3]</sup>, 这样具有低串扰性能的机械开关成为  $1 \times 2$  开关的理性选择. 基于此, 我们专门为低串扰 OADM 节点开发了微机械  $1 \times 2$  光开关阵列.

## 1 工作原理及基本结构

$1 \times 2$  开关单元的关键是如何实现快速稳定的光路切换. 在传统的机械式微镜光开关设计中, 微镜的移动方式大体上可以分为扭转型和移动型两种. 扭转型光开关以日本东京大学研制的一种扭镜型 MEMS 光开关<sup>[4]</sup>为代表. 微镜受到静电力的吸引, 由水平位置扭转直至与水平成  $90^\circ$ , 从而改变光路传输方向. 而移动型光开关的实现, 使用了驱动器驱使垂直微镜平行移动至输入输出光纤之间, 使光路发生改变. 这两种工作方式对于光路的切换非常

有效, 串音较小. 但这两种设计上的局限在于微镜的工作距离过长或转动角度过大, 不仅加重了驱动器及其附件的要求, 还使开关时间徘徊在数毫秒的水平<sup>[5]</sup>, 阻碍其进一步提高.

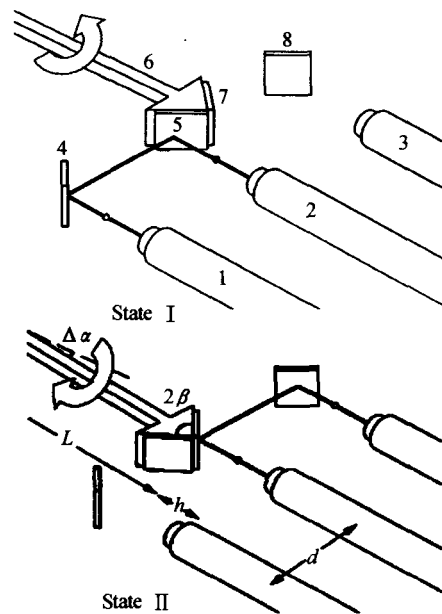


图 1 工作原理图  
Fig. 1 Operational principle

在比较现有光开关的工作特点基础上, 提出一种摆杆和微镜的设计思想, 将高切换速度的电磁驱动摆杆和硅基微镜相结合, 从而使光开关的响应时间达到亚毫秒量级, 这是传统机械式开关所不能实现的.

图 1 为该光开关单元的工作原理图. 光束由光纤准直器 2 (Fujian JDSU CASIX, INC. Part #: CLS-250-0550-20-FC/PC-M) 输入, 经微镜两次反射后耦合进相应准直器. 光路的选择通过摆杆 6 来实现——摆杆末端与电磁驱动器相连, 摆杆顶端的对称结构镶有两个微反射镜 5 和 7 (两微镜面与中轴线夹角稍小于  $45^\circ$ ), 可以进行光路切换. 当电磁驱动单元接受到 +5V 信号时, 摆杆逆时针摆动, 在精

确限位装置的固定下,使摆杆左微镜 5 以  $45^\circ$  切入光路,入射光经两次反射后耦合到输出光纤准直器 1 (如图 1 状态 I). 当驱动单元为  $-5\text{ V}$  信号时,摆杆顺时针复位,光束进入右侧光路,耦合到准直器 3 (如图 1 状态 II).

## 2 开关单元结构设计和仿真

在光开关的设计过程中,结构参数的适当选取可充分提高开关性能. 因此在开关的试制作前,对开关的结构和可实现的技术参数特别是开关速度之间的关系进行了理论分析.

### 2.1 开关机理与速度的相关性

与传统的微镜横向切入光路方法相比,使用摆杆加微镜的方法在设计上对于提高响应速度作用很大. 当摆杆偏离工作状态  $\Delta\alpha$  角度后,引起出射光束横向偏移

$$\Delta d = (d+h)\text{tg}(2\Delta\alpha) - \sin\beta \times L \times \Delta\alpha$$

其中,  $L$  为摆杆的长度,  $\beta$  为摆杆顶端反射单元的半角,  $d$  为两光纤准直器间横向间距,  $h$  为准直器顶端和微镜之间的纵向距离.

根据加工条件,选取开关结构参数  $d=5\text{ mm}$ ,  $h=2.5\text{ mm}$ ,  $\beta=41^\circ$ ,  $L=10\text{ mm}$ , 得到  $\Delta d \approx 5\Delta\alpha$  (单位分别为  $\text{mm}$ ,  $\text{rad}$ ); 同时,光束转动  $2\Delta\alpha$  角度. 由此可见,相对于传统的横向切入式和摆镜光开关机理,采用此种复合工作方式,可同时得到角度与横向位移衰减,显著提高开关速度达数倍以上,这是该设计达到亚微秒开关速度的关键.

### 2.2 利用有限元(FEA)法对驱动过程进行模拟

在开关的设计中,微镜的摆动速度至关重要,而摆动速度又取决于电磁驱动器的优良性能. 对于电磁驱动的结构分析,借助于大型有限元(FEA)分析软件 ANSYS<sup>[6]</sup> 对其驱动过程进行数值模拟,进而修正结构参数,得到最优化设计结果.

驱动机构由线圈、永磁体和衔铁组成. 在永磁体磁场作用下,衔铁被磁化. 当线圈加上  $+5\text{ V}$  的脉冲信号时,衔铁两端分别收到斥力和引力,从而产生扭矩带动摆杆逆时针摆动;当线圈加上  $-5\text{ V}$  的脉冲信号时,衔铁两端受力反向,摆杆顺时针方向摆动;脉冲信号消失后,衔铁由于剩磁作用紧贴于精确限位装置,维持原状态不变,实现断电自锁. 磁性衔铁通过激光点焊与 Y 型摆杆紧密连接.

在用 ANSYS 进行工程模拟的时候,按照下列步骤进行求解<sup>[7]</sup>:

1) 建立永磁体、衔铁、铁心、线圈和空气隙的物理模型,分别对不同的区域赋予相应的材料特性;2) 以合理的拓扑结构划分网格,在感兴趣的求解区域

适当提高网格密度;3) 施加电流载荷,指定磁场边界条件;4) 选用合理的求解器对磁场进行求解;5) 用虚功法逐点求解每个单元所受的磁场力. 通过对位置坐标加权求和,得到衔铁所受的磁力扭矩. 图 2 显示了驱动器内部磁场分布情况,由此可进一步得出摆杆所受扭矩与摆杆倾角的曲线关系,如图 3.

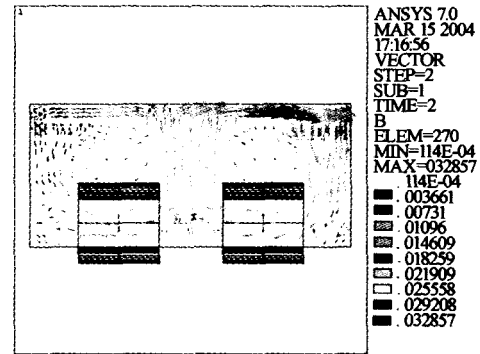


图 2 驱动器内部磁场 H 分布

Fig. 2 Distribution of magnetic field inside actuator

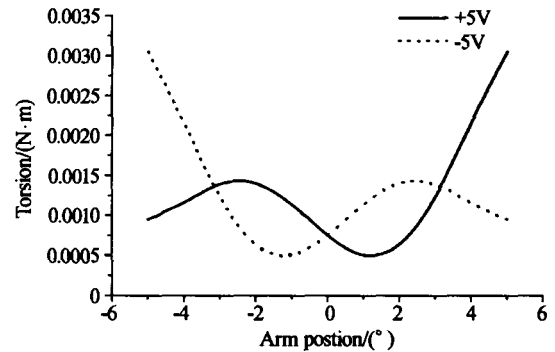


图 3 电磁力矩和衔铁倾角的关系曲线

Fig. 3 The magnetic torsion as a function of arm position

从图中可以看出,摆杆逆时针转动( $+5\text{ V}$  信号脉冲)和顺时针转动( $-5\text{ V}$  信号脉冲)的力矩曲线是对称的. 以顺时针的转动(图中虚线)为例进行分析:在触发信号前,衔铁位于  $-5^\circ$  位置. 收到触发信号后,衔铁在斥力和引力的综合作用下开始加速转动( $-5^\circ \sim -3^\circ$ , 斥力占主导优势);在  $0^\circ$  位置附近,由于斥力随距离衰减很快,力矩较小;越过  $0^\circ$  后,引力占主导优势,摆杆继续加速直到  $+5^\circ$  位置.

将力矩-角度曲线进行 5 次多项式拟和,得到力矩-角度函数(角度单位为弧度)

$$F(\theta) = 7.2824 \times 10^{-4} + 0.02329 \times \theta + 0.23354 \times \theta^2 - 9.22158 \times \theta^3 - 8.79474 \times \theta^4 + 601.37885 \times \theta^5$$

根据角加速度方程  $\frac{d^2\theta}{dt^2} = F(\theta)/I$  和  $t=0\text{ s}$  处的边界条件:  $\theta = -0.087$ ,  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  (试验测量摆杆的转动惯量  $I = 2.578\text{ g} \cdot \text{mm}^2$ ) 数值法求解  $\theta$  关于  $t$  的微分方程得到角度时间曲线.

从图 4 可以看出,开关时间的理论计算结果在  $700\ \mu\text{s}$  左右.

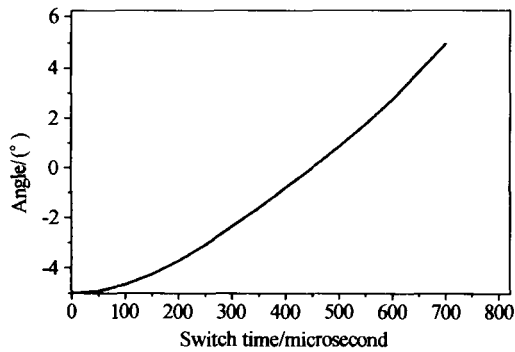


图4 摆杆角度-时间曲线

Fig. 4 The angle of pole as a function of switch time

### 3 光开关阵列的制作及测试

#### 3.1 开关的加工和装配

亚毫秒级光开关阵列成品(如图5)尺寸仅为 $60\text{ mm}\times 36\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ ,与传统光开关比较,该设计达到了较高的集成度,相当小的厚度.此开关阵列单元结构中光纤准直器同侧放置,紧凑了光路并压缩了尺寸.该阵列集成 $1\times 2$ 光开关器件的壳体和基底采用精密数控微雕刻机进行微加工,其加工精度为 $3\text{ }\mu\text{m}$ ;关键部位,如摆杆和精密限位装置采用电火花加工机加工.在装配和封装过程中使用激光点焊技术,这种封装技术以Nd:YAG晶体为激光工作物质,其输出能量为 $60\text{ J}$ ,合金焊接最大深度可达 $5\text{ mm}$ 以上,最小焦斑直径为 $0.2\text{ mm}\sim 0.3\text{ mm}$ .

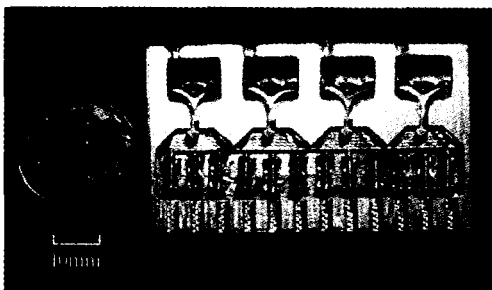


图5 开关阵列样品照片

Fig. 5 A prototype of the optical switch array

#### 3.2 开关性能测试

分别对每个单元进行测量,插入损耗在 $0.6\text{ dB}\sim 0.8\text{ dB}$ 之间,串扰 $< -70\text{ dB}$ .使用数字示波器得到了如图6所示的开关响应曲线.曲线2(下)为触发电脉冲信号,曲线1(上)为输出光信号.图中显示开关的响应时间约为 $750\text{ }\mu\text{s}$ ,略慢于理论计算时间 $700\text{ }\mu\text{s}$ ,这是由于理论计算未计入运动部件摩擦力等各种损耗因素所致.考虑到微电磁机械结构动态计算的复杂性,此模型给出了相当精确的估算.

同时,光信号曲线的上升段非常平滑,没有出现其他机械式光开关常见的振荡情况.整个驱动结构已经经受了百万次试验,性能稳定.

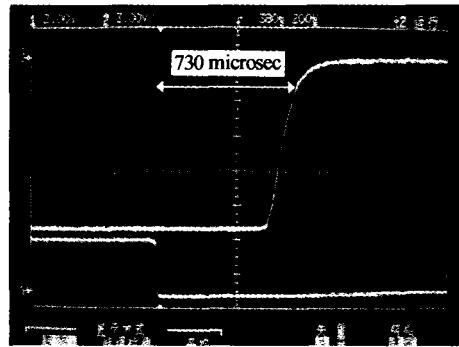


图6 开关响应

Fig. 6 Switching response to a trig signal

### 4 结论

成功研制了一种微加工型 $1\times 2$ 光开关阵列.经过理论分析和性能测试,结果表明该阵列开关响应时间小于 $750\text{ }\mu\text{s}$ ,插入损耗为 $0.6\text{ dB}\sim 0.8\text{ dB}$ ,回波损耗为小于 $-70\text{ dB}$ .与现有传统微机械光开关相比,其突出特点在于成本较低,结构新颖,响应快速;满足了智能光网络对节点连接设备低串扰快响应的要求,可以进行规模生产,具有很好的市场前景.

#### 参考文献

- 1 He Jianwu, Mei Jie, Gu Wanyi, *et al.* A novel distributed restoration method in intelligent optical networks. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1464~1469
- 2 Fang Laifu, Xu Rong, Liu Xueyuan, *et al.* Homodyne Crosstalk in all Optical Network. *Acta Photonica Sinica* 2000, **29**(5): 454~458
- 3 Lei Zong, Yanhe Li, Hanyi Zhang, *et al.* Low crosstalk structure for integrated OXC/OADM in WDM optical transport networks. *Optics Communication*, 2001, **195**(8): 179~186
- 4 Toshiyoshi H, Fujita H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, **5**(4): 213~237
- 5 胡军武 吴涛. 光开关和光开关阵列技术的发展研究. 光通信研究, 2001, **108**(12): 58~62  
Hu J W, Wu T. *Study on Optical Communications*, 2001, **108**(12): 58~62
- 6 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安: 西北工业大学出版社, 2001  
Wang Guoqiang. *Practical numerical simulation techniques by ANSYS*. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2001
- 7 晏辉鸣, 万鹏, 吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型 $1\times 2$ 光开关. 光子学报, 2004, **33**(5): 536~539  
Yan H M, Wan P, Wu X K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 536~539

## Sub-millisecond Optical Switch Array for ION

Wan Peng, Yan Huiming, Wu Xinkun

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Center of Optical and Electromagnetic Research,  
Department of Optical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2004-05-17

**Abstract** A sub-millisecond optical switch operation was reported for an array of  $1 \times 2$  switches for intelligent optical network (ION). By utilizing a micromachined wedge-shaped double side micro-mirror to implement an input optical beam path change, the design achieved a high level integration of multiple switches on a single substrate, and significantly reduced mirror traveling distance or angle for switch operation and thus shortened the switch time. An array of four  $1 \times 2$  switches was fabricated on an aluminum substrate with an overall size of only  $60 \times 36 \times 7 \text{ mm}^3$ . Performance of the switch array prototype was reported, featuring a fast switch time of less than  $750 \mu\text{s}$  and extremely low cross-talk  $< -70 \text{ dB}$  with an insertion loss of between 0.6 and 0.8 dB. An analysis on switch time was conducted using a commercial finite element analysis software package ANSYS and a good agreement was obtained between the measured and calculated switch time.

**Keywords** ION; OADM; Optical switch; Micromachining



**Wan Peng** received his B. E. degree in 2003 and is currently pursuing the Ph. D. degree in optical engineering at Zhejiang University. His research interests are fiber-optic devices and optic communication systems.