

文章编号 1004-924X(2008)11-2098-06

新型的波导矩阵光开关

张 鹰^{1,2}, 孙德贵³, 金 光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了实现波导矩阵光开关一对多、多对多的通信方式, 设计了一种新型的多路可用波导矩阵光开关。在分析马赫-曾德尔干涉仪(MZI)基本结构的基础上, 定义了两种开关形式。以二者作为结构单元, 设计了 2×2 、 4×4 矩阵光开关结构以实现 $1:k(k>1)$ 多路连接的功能。分析了 Banyan 网络中交叉连接损耗与交叉角度的关系, 对 MZI 结构进行了性能模拟和优化, 并由此对整个开关的插入损耗进行了分析。最后, 基于 PLC 技术制作出相应的 MZI 开关单元及 2×2 、 4×4 波导 SiO_2 光开关实物。测试结果表明, 2×2 光开关的插入损耗为 2.25 dB, 4×4 光开关的插入损耗为 4.3 dB, 开关时间均 < 1 ms, 该类光开关能够很好地实现多路开关的功能。

关键词: 集成光学; Banyan 网络; 波导矩阵; 光开关; 氧化硅波导

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A

A new type of optical waveguide matrix switch

ZHANG Ying^{1,2}, SUN De-gui³, JIN Guang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;* 3. *School of Optoelectrical Engineering, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022, China)*

Abstract: In order to realize one-to-many and many-to-many communications for optical waveguide matrix switch, a new type of optical waveguide matrix switch was designed. Two switch units were defined on analysis of the basic structure of Mach-Zehnder Interferometer (MZI). Then, based on this two units, the new structures of 2×2 and 4×4 optical matrix switches were proposed to realize the multiport interconnection of $1:k(k>1)$. The influences of the intersection angles among waveguide links on the intersection-induced optical loss of system were studied in Banyan network and the total insertion losses of system were discussed after the performance simulation and the optimization of MZI construction. Finally, SiO_2 -based MZI units, 2×2 and 4×4 optical matrix switches were fabricated based on Planar Lightwave Circuit (PLC) technology. The experimental results indicate that the insertion losses of 2×2 optical matrix switch and 4×4 optical matrix switch are 2.25 dB and 4.3 dB, respectively, and the response time is less than 1 ms. It concludes that this type of optical switch can

收稿日期: 2007-12-05; 修订日期: 2008-03-27.

基金项目: 中国科学院“百人计划”光通信器件研究项目

primely fulfill the multiport switch function.

Key words: integrated optics; Banyan network; multiport optical matrix switch; SiO₂ waveguide

1 引 言

随着现代光通信和密集波分复用技术(Density Wavelength Division Multiplexing, DWDM)的迅猛发展,光开关逐渐成为光通信系统中重要的核心部件^[1]。光开关是按一定要求将一个通道的光信号转换到另一个通道的器件,起着上下路信号和多路信号间光路交换的作用。传统机械及现代机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)光开关由于有移动部件,器件稳定性和开关速度与波导开关相比较差^[2-3]。平面光波线路(Planar Lightwave Circuit, PLC)技术^[4-5]利用波导材料的物理效应,无需移动部件,器件稳定性好,集成度高。其中硅基 SiO₂ 光波导技术具有与现有成熟的半导体工艺技术兼容性好、传输损耗低、成本低廉等优点,在构建多端口矩阵光开关中受到广泛重视和研究^[6-8]。

但是,传统的矩阵光开关是没有共享媒体(通信线路在物理上被分开)的空分型开关^[9],这样一来只能实现一对一的通信方式,比如在一个用户接收信息的同时其他的用户即无法获取同一信息,这对信息的及时传递造成不便。因而需要具有多路连接功能的矩阵光开关以实现一对多、多对多的通信方式。

通过对 Mach-Zehnder 干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)的优化设计,可令其实现功率的平均分配,利用两种不同的 MZI 单元组成的矩阵网络可实现 $1:k(k>1)$ 的多路连接。本文首先分析并设计了两种 MZI 结构,并将其作为基本单元组成 2×2 、 4×4 的多路可用矩阵光开关。基于 PLC 技术实验制作出相应的波导 SiO₂ 光开关,测试结果表明,该类光开关插入损耗低,开关速度快,体积较小,能够很好地实现多路开关的功能。

2 器件设计及原理

2.1 器件单元结构及原理

本文采用的 MZI 的基本结构如图 1 所示,主

要由两个 3 dB 耦合器和两条等长的波导臂组成,其中一条波导臂上蒸镀金属薄膜,通过热光效应来改变通过光的相位。由二波导臂产生的相位差可以表示为: $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot L$,其中, λ 为真空中波长, Δn 是加电后引起的折射率变化, L 为金属薄膜长度。未加电时,从 1 输入的光经过 3 dB 耦合器功率均分进入二波导臂,二波导臂产生的相位差为零,经过第二个 3 dB 耦合器由 2' 输出;若对金属薄膜加电,使得 $\Delta\varphi = \pi$,则从 1' 输出。本文把具有这种切换功能的光开关记为光开关 a;如果加电后使得 $\Delta\varphi = \pi/2$,则从 1'、2' 各输出原光功率的一半,记为光开关 b,如图 2 所示。

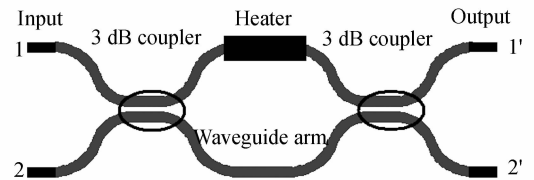
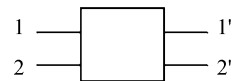


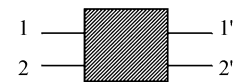
图 1 Mach-Zehnder 干涉仪结构

Fig. 1 Construction of MZI



(a) 加电后光信号从 1' 输出

(a) After applying voltage, signal comes out from port 1'



(b) 加电后光信号功率平分由 1'、2' 输出

(b) After applying voltage, signal with average half power comes from port 1' and 2'

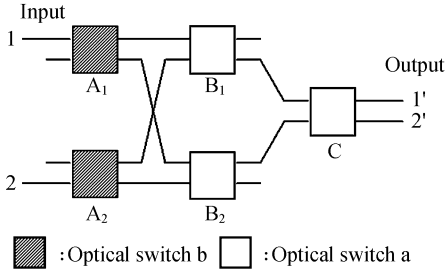
图 2 MZI 单元功能示意图

Fig. 2 Function of MZI unit

2.2 2×2 多端口输出光开关

设计的 2×2 多端口输出光开关如图 3(a) 所示,由光开关 a、b 共同完成开关动作。它的基本功能是一个输入信号可以有 3 种输出选择:功率全部由 1' 或 2' 输出以及 1'、2' 平均分配功率输出。(此处可设计成不加电时 1' 和 2' 就能有输出信

号)。对于二输入端均有信号的情况,一个输出端口可以选择任意一个输入信号,输入与输出之间的开关选择关系在图 3(b)中给出,图 3(c)将之与普通光开关做了比较。



(a) 结构与功能

(a) Construction and function

Input	Output			
1	1'	2'	1', 2'	0
2	2' or 0	1' or 0	0	1', 2'

(b) 开关状态选择(“0”表示没有输出)

(b) Choice of switch state (“0” implies no output)

	Output	Input	
Ordinary 2×2 switch	1'	1	2
	2'	2	1
2×2 multi-port Optical switch	1'	1	2
	2'	1 or 2	1 or 2

(c) 与普通光开关对比

(c) Comparison with ordinary switch

图 3 2×2 多端口输出光开关

Fig. 3 2×2 multi-port optical switch

若假定 1、2 均有输入信号,正常情况下 1'、2' 没有输出。考虑从 1 输入的信号, A₁ 不加电时,进入 B₂ 的上端口,若 B₂ 不加电则没有输出。若 B₂ 加电则进入 C 的下端口,由 1' 输出;若再对 C 加电则由 2' 输出。若对 A₁ 加电,则信号功率平均分配进入 B₁ 和 B₂,对 B₁ 不加电而对 B₂ 加电,信号继续进入 C 的上下二入口,由 1'、2' 输出同一信号,只是功率分别减半。这样,2' 在 1' 接收 1 输入信号的同时也可以获得由 1 输入的信号,

从而克服了传统矩阵光开关同一输入信号无法在多端口同时输出的弊端。

2.3 4×4 开关结构分析及设计

图 4 给出了 4×4 多端口输出光开关的结构示意图,它可以很好地实现一入多出的开关功能,其开关机理与前面 2×2 多端口输出光开关类似,这里不再赘述。值得指出的是采用该结构不仅可以在任一输出端选择所需信号,而且对同一输入信号可在不同的输出端同时输出,从而避免了多个端口对同一信号的竞争。

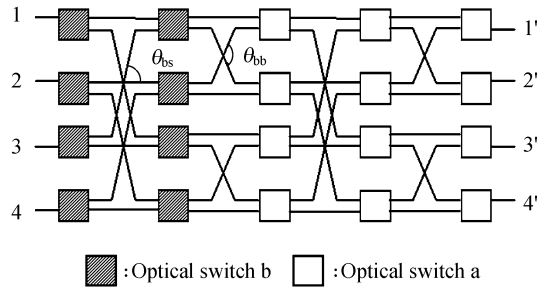


图 4 4×4 多端口输出光开关结构

Fig. 4 Construction of 4×4 multi-port optical switch

本文采取的网络结构为蝶形交叉连接的 Banyan 网络结构,它既可以克服传统 Crossbar 结构光路损耗一致性差的缺点,又以较少的联接级数优于光路补偿型 Crossbar 结构,降低插入损耗。对于基于平面光波线路的光互连网络,波导间的交叉也会引入光波损耗,称之为交叉损耗。在 Banyan 网络结构中只存在两种交叉,即斜波导和直波导交叉以及两反方向斜波导交叉,交叉角分别为 θ_{bs} 和 θ_{bb} ,蝶形交叉的特点是同一级上的 θ_{bs} 和 θ_{bb} 分别相同。在实际连接波导时,通过合理设计,可避免两条斜波导和一条直波导同时交叉的情况,并且使不同级连接的交叉角 θ_{bb} 相同,显然有 $\theta_{bs} = \theta_{bb}/2$,两种交叉角损耗分别表示为 $L_{inter}(\theta_{bs})$ 和 $L_{inter}(\theta_{bb})$ ^[10]。

本文利用 OptiBPM 软件对交叉角引起的光损耗随交叉角度变化情况进行了仿真,设定芯层和包层折射率差为 0.75%,波导截面尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$,结果如图 5 所示。可以看出,随着波导交叉角度的增大,交叉引起的损耗迅速减小,当交叉角 $> 30^\circ$ 时,交叉损耗 $< 0.1 \text{ dB}$ 。本文设计 $\theta_{bs} = 30^\circ$,此时 $L_{inter}(\theta_{bs}) = 0.09 \text{ dB}$, L_{inter}

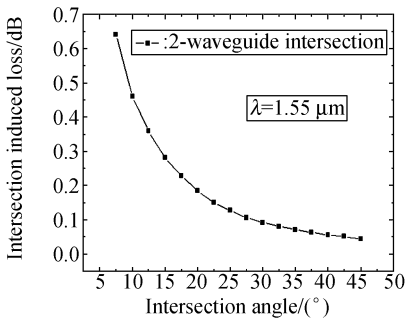


图 5 交叉角损耗随角度变化曲线

Fig. 5 Intersection-induced optical losses versus intersection angles

(θ_{bb}) < 0.01 dB, 在端口数较少时对插入损耗的影响可忽略不计。

考虑开关中几个主要的光损耗, Banyan 网络插入损耗可表示为:

$$IL_{BN} = TL_{inter} + TL_{switch} + TL_{prop} + 2L_{WFC}, \quad (1)$$

其中, TL_{inter} 为连接波导交叉损耗, TL_{switch} 为 MZI 开关单元损耗, TL_{prop} 为波导传输损耗, L_{WFC} 为波导光纤耦合损耗。

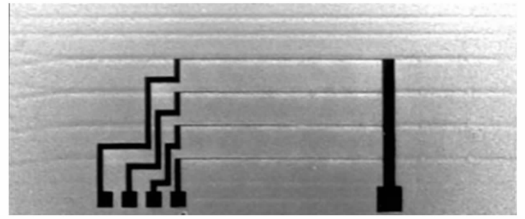
值得指出的是采用该结构不仅小于普通结构器件体积, 而且通过合理选择驱动电极后获得的光开关还是严格无阻塞的^[11]。

3 器件优化和实验结果

MZI 作为矩阵光开关的基本单元, 其结构和性能对整个光开关器件的结构和性能有很大影响, 本文利用 OptiBPM 软件对 MZI 结构进行了性能模拟和优化^[12]。取波导截面尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$, 波导芯层和包层的折射率差为 0.75%, 获得的最小 MZI 结构光损耗为 0.41 dB。根据仿真计算出该结构 4×4 矩阵光开关的理想系统光损耗为 2.62 dB, 此处的仿真并未考虑 TL_{prop} 和 L_{WFC} 两项。

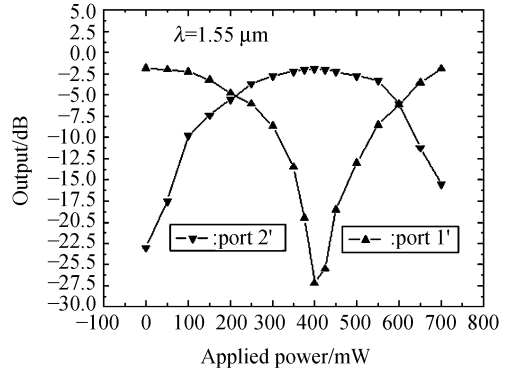
据此, 本文做出了实际 MZI 型 SiO_2 开关单元, 如图 6(a) 所示, 其长度为 12 mm, 在 MZI 的一个波导臂上蒸镀金属钛作为加热器, 加热器长 3.3 mm, 宽 $20 \mu\text{m}$ 。从端口 1 输入 1 550 nm 的光信号, 两个输出端口光功率随加电功率的变化曲线如图 6(b) 所示。

显然, 曲线的峰值对应开关 a 的工作状态, 两曲线的交点对应开关 b 的工作状态。实验中, 得



(a) MZI 单元实物图(4 组)

(a) Chip photo of 2×2 optical switch



(b) MZI 单元输出光功率随功耗变化曲线

(b) Optical outputs versus applied powers of MZI unit

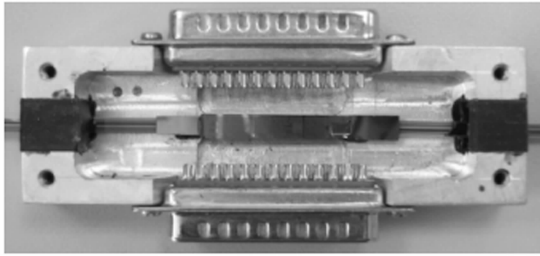
图 6 MZI 开关单元及其测试结果

Fig. 6 MZI unit and its measured results

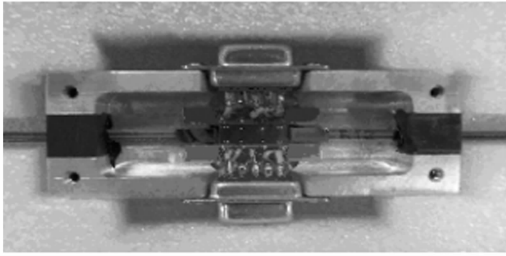
到开关单元 a 的插入损耗为 1.9 dB, 串扰为 27 dB, 最高功耗为 400 mW; 开关 b 的插入损耗为 2.07 dB, 最高功耗为 200 mW。

满足商业标准的 SiO_2 波导传输损耗^[13] 为 $L_{prop} = 0.1 \text{ dB/cm}$, 波导-光纤耦合损耗 $L_{WFC} = 0.5 \text{ dB/point}$ 。根据前面模拟结果, 理论上开关 a 和开关 b 的插入损耗均为 1.53 dB, 而实验结果比理论值略大。造成插入损耗偏大的原因是由于器件解理后未进行抛光处理及光纤与波导对接时存在对准偏差。

根据前面所述, 采用 Banyan 网络结构, 以上述 MZI 单元制作 $2 \times 2, 4 \times 4$ 多端口矩阵光开关, 封装后的器件实物如图 7 所示。对 2×2 开关, 输入 1 550 nm 的光信号, 得到的插入损耗为 2.25 dB, 响应时间为 0.8 ms, 串扰为 43 dB, 最高功耗为 700 mW。表 1 列出了 4×4 光开关部分通道的插入损耗、偏振相关损耗和串扰的测试结果。其平均插入损耗(IL)为 4.3 dB, 平均偏振相关损耗(PDL)为 0.4 dB, 平均串扰(XT)为 37 dB。器件的插入损耗比理论计算值稍大, 主要原因是



(a) 2×2



(b) 4×4

图 7 光开关器件实物图

Fig. 7 Device photos of optical switches

器件封装中,光纤与波导件对准不是特别理想。同时,实验中得到平均开关功率约 670 mW/channel,开关时间 <1 ms。

表 1 4×4 光开关测试数据

Tab. 1 Measured data of 4×4 optical switch

Channel	1-1'	1-2'	1-3'	1-4'	2-1'	2-2'	2-3'	2-4'
IL (dB)	5.16	4.83	4.29	3.96	4.25	4.13	3.89	3.95
PDL (dB)	0.4	0.43	0.53	0.26	0.57	0.34	0.53	0.21
	1-1'	-22.46	-29.46	-26.62	—	—	—	—
	1-2'	-35.67	—	-32.15	-29.61	—	—	—
	1-3'	-46.24	-44.41	—	-23.63	—	—	—
XT	1-4'	-52.31	-53.19	-37.93	—	—	—	—
(dB)	2-1'	—	—	—	—	-22.48	-45.16	-44.82
	2-2'	—	—	—	—	-37.05	—	-28.17
	2-3'	—	—	—	—	-42.13	-43.64	—
	2-4'	—	—	—	—	-51.40	-50.13	-35.34

参考文献:

- [1] 孙德贵, 刘志福, Ho Seng Tiong, 等. 自聚焦超晶格波导电光调制器[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 386-392. SUN D G, LIU ZH F, HO S T, *et al.*. Electro-optic modulator with self-assembled superlattice waveguides[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 386-392. (in Chinese)
- [2] SYMS R R A, MOORE D F. Optical MEMS for telecoms[J]. *Materials Today*, 2002, 5(7-8): 26-35.
- [3] MIYA T. Silica-based planar lightwave circuits: passive and thermal active devices[J]. *IEEE*, 2000, 6(1): 38-45.

图 8 给出了分别在 1 530、1 550 和 1 570 nm 波长时, 4×4 器件的插入损耗随外加功率的变化曲线, 其中光信号从端口 2 输入, 从端口 4 输出。可以看出, 3 条曲线基本重合, 说明其波长一致性很好, 最小插入损耗约 4.0 dB。

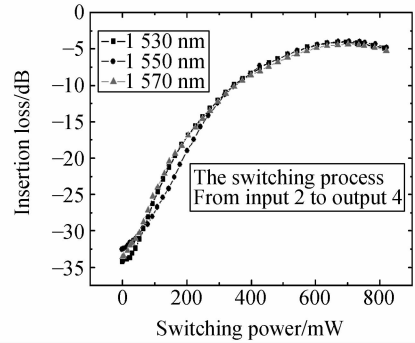


图 8 4×4 开关插入损耗测试结果

Fig. 8 Insertion losses versus applied powers of 4×4 optical switch

4 结 论

利用两种不同的 MZI 单元组成的矩阵网络可实现 1:k ($k>1$) 的多路连接, 完成一对多、多对多的通信方式。基于 PLC 技术制作了 SiO₂ 波导光开关, 采用 Banyan 网络结构, 不但降低器件尺寸而且还是严格无阻塞的。实验中测得的 4×4 矩阵光开关平均插入损耗为 4.3 dB, 开关功率约 670 mW/channel, 开关时间 <1 ms, 在 1 530~1 570 nm 波长一致性很好。测试结果与仿真结果基本吻合, 该类光开关能够很好地实现多路开关的功能, 为设计 8×8、16×16 等更大规模矩阵光开关和有效应用一对多、多对多的通信方式提供了依据。该项工作正在朝进一步降低插入损耗的方向努力。

- [4] KASAHARA R, YANAGISAWA M, GOH T, *et al.*. New structure of silica-based planar lightwave circuits for low-power thermo-optic switch and its application to 8×8 optical matrix switch[J]. *Lightwave Technol.*, 2002, 20: 993 - 1000.
- [5] EARNSHAW M P, SOOLE J B D, CAPPUZZO M, *et al.*. 8×8 optical switch matrix using generalized Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEEE*, 2003, 15(6): 810-812.
- [6] LAI Q, HUNZIKER W, MELCHIOR H. Low-power compact 2×2 thermo-optic silica-on-silicon waveguide switch with fast response [J]. *IEEE*, 1998, 10(5): 681-683.
- [7] EARNSHAW M P, SOOLE J B D, CAPPUZZO M, *et al.*. Compact low-loss 4×4 optical switch matrix using multimode interferometers [J]. *Electron. Lett.*, 2001, 37(2): 115-116.
- [8] SYAHRIAR A, SYMS R R A. Thermo-optic interferometric switches fabricated by electron beam irradiation of silica-on-silicon [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(5): 841-846.
- [9] 行松健一. 光开关与光互连[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
XING S J Y. *Optical Switch and Optical Internet*[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [10] SUN D G, DENG W Y, E S L, *et al.*. Study for performance of the thermo-optic matrix switches with flexible switching units and Banyan networks [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(1): 014602.
- [11] CHANG F H, GUO J Y, HWANG F K. Wide-sense nonblocking for multi-logd N networks under various routing strategies[J]. *Theoretical Computer Science*, 2006, 352: 232-239.
- [12] 张燕君, 陈才和, 吴波, 等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 77-82.
ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, *et al.*. Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electro-optic integrated acceleration seismic geophone [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 77-82. (in Chinese)
- [13] KAWACHI M. Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components[J]. *Opt Quant Electron*, 1990, 22: 391-416.

作者简介:张 鹰(1978—),男,吉林长春人,在读博士,主要从事光波导器件、光开关及光学设计等方面的研究。E-mail: eagle1978@sina.com.

导师简介:孙德贵(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: deguisun_b@yahoo.com

● 下期预告

惯性冲击驱动管内移动机器人

刘品宽,温志杰,李 锦

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

设计了一种以压电双层膜为基本结构的管内移动机器人。通过惯性冲击原理达到运动驱动的目的。该机器人的基本结构由一个典型的压电双层膜结构、惯性质量串联构成。工作时,压电双层膜的变形由惯性冲击转化为整体结构的直线位移。从理论上详细分析了惯性冲击原理的核心问题:惯性冲击力与管壁、机器人之间的摩擦力的关系,并通过 MATLAB 和 ANSYS 等软件对整个系统的动态响应做出了仿真。相关的验证表明,所提出的管内移动机器人运动步长可以达到 $0.15 \mu\text{m}$,具有精密运动和高效率的优点,可以在工业中广泛应用。