

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0266-06

# 全排列无阻塞双榕树网光学实现方法设计

杨俊波<sup>1</sup> 杨建坤<sup>1</sup> 李修建<sup>1</sup> 常胜利<sup>1</sup> 苏显渝<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)  
(<sup>2</sup> 四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 榕树网在光互连网络中具有广泛的应用。讨论了榕树网的功能特点和连接关系,给出了其网络结构的拓扑示意图,并通过榕树网与逆榕树网的串联构成了全排列无阻塞的双榕树网络。利用偏振分束器(PBS)、相位型空间光调制器(PSLM)和反射镜设计了榕树网各级节点开关和各路由级的交换模块。它们均采用类似的结构和相同的偏振控制技术,具有结构简单、控制方便、易扩展与集成、与信号光偏振态无关和可双向交换等特点。对 $2 \times 2$ 节点开关单元的性能参数进行了测试,实验数据表明该节点开关具有插损小、串扰低、可靠性好等特点。由它所构成的全排列无阻塞双榕树网在光计算和光互连网络中会有一些的应用。

**关键词** 光通信;光网络;榕树网;相位型空间光调制器;偏振光分束器

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0266

## Design of Implementation of Full-Permutation Non-Blocking Double Banyan Optical Network

Yang Junbo<sup>1</sup> Yang Jiankun<sup>1</sup> Li Xiujian<sup>1</sup> Chang Shengli<sup>1</sup> Su Xianyu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Tech-Physical Research Center Science College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*  
<sup>2</sup> *Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

**Abstract** Banyan network shows promising characteristics in the practical application of optical information systems and optical interconnection networks. The properties and the connection relationships of banyan network are investigated in detail, and its topological schematic diagram is also proposed. By a cascade of the banyan network and the inverse banyan network, a full-permutation non-blocking double banyan network can be constructed. Based on the identical polarization controlling technology and the same spatial structure, the node switch and the routing stage are discussed and designed by using phase spatial light modulator (PSLM), polarizing beam-splitter (PBS), and mirror. The module designed here has a number of advantages: less optical components, compact in structure, efficient in performance, bidirectional operation, and insensitive to the polarization of signal beam. The tested parameters for the  $2 \times 2$  optical switch show that the full-permutation non-blocking double banyan network proposed here should be helpful in the design of large-scale optical interconnection network because of low insertion loss, low crosstalk, and high-performance.

**Key words** optical communications; optical network; banyan network; phase spatial light modulator; polarizing beam-splitter

## 1 引 言

自由空间光互连网络以其高宽带、高并行、低串

话等特性在高速通信交换系统、并行计算机系统和光信息处理中具有重要的应用。它在完成信息的高速

**基金项目:** 国家自然科学基金(60673147,60907003)和国防科技大学预研基金(JC09-02-12)资助课题。

**作者简介:** 杨俊波(1974—),男,博士,讲师,主要从事信息光学与光互连网络等方面的研究。

E-mail: yangjunbo008@sohu.com

**导师简介:** 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

互连与交换的同时,能够有效地解决电子网络固有的电磁干扰,时钟扭曲,RLC 延时及带宽瓶颈等问题。光互连网络根据拓扑结构特点分为全混洗 Omega 网络,Comega 网络,Gamma 网络,Crossover,Banyan 榕树等类型<sup>[1~5]</sup>。各种光网络因其连接函数、时间代价、网络复杂度等不同,在实际应用中有着不同的运用。与混洗交换网络 and 全交叉网络相比,榕树网络的结构相对简单、实现成本更低、能量损失更小,在光子交换系统以及并行处理计算机系统中有着广泛的应用前景。然而榕树网各路由级连接函数互不相同,因此其光学实现具有一定的难度。迄今为止已有大量文献<sup>[6~9]</sup>对其拓扑结构理论以及光学实现方法进行了详细的研究,做了很多有益的工作。不仅证明了榕树网络与 Omega 网络,全交叉网络,Benes 等网络的拓扑等价,而且还提出了榕树网具体的光学实现方式<sup>[10~18]</sup>。这些方法大多是利用对入射光偏振态的控制实现所需的路由与交换,其信号控制简单,但是设计的模块对信号光的偏振态非常敏感。不仅对入射的信号光的偏振态有所限制,而且对不同偏振态的入射光,模块将采取不同的控制参数,出射光的偏振态也将受到影响而发生改变。本文同样采用成熟的偏振控制技术实现信号光的交换与路由,不过由于对光学模块的设计进行了合理的优化,因此本文设计的全排列无阻塞双榕树网光学实现模块具有与信号光偏振态无关和可实现双向交换等特点,相信在光计算和光互连网络中会有一些的应用。

## 2 榕树网的特点

榕树网是一种多级规则的互连网络,对于输入输出通道数为  $N(N = 2^n = 8)$  的榕树网( $n$  为正整数),其网络拓扑如图 1 所示。它由  $\lg^N$  级路由级和  $\lg^N + 1$  级节点级所构成,每一节点级包含 8 块  $2 \times 2$  的节点开关。定义  $K_j^i$  表示第  $j$  节点级中第  $i$  节点的位置,其中  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1; j = 0, 1, 2, 3$ 。榕树网相邻节点级间采用直通或蝶互连两种连接方式,分别用  $K_{iS}^j$  和  $K_{iB}^j$  表示,而  $K_{iS}^j$  和  $K_{iB}^j$  的输出通道对应下一级,即  $K_{i+1}^{j+1}$  级的输入通道。则榕树网络各级的互连关系可以定义为<sup>[19]</sup>

第一路由级:

$$k_{iS}^0 = k_i^1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

$$k_{iB}^0 = \begin{cases} k_{i+N/2}^1, & i < N/2 \\ k_{i-N/2}^1, & N/2 \leq i < N \end{cases}, \quad (2)$$

第二路由级:

$$k_{iS}^1 = k_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

$$k_{iB}^1 = \begin{cases} k_{i+N/4}^2, & i < N/4, N/2 \leq i < 3N/4 \\ k_{i-N/4}^2, & N/4 \leq i < N/2, 3N/4 \leq i < N \end{cases}, \quad (4)$$

第三路由级:

$$k_{iS}^2 = k_i^3, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (5)$$

$$k_{iB}^2 = \begin{cases} k_{i+N/8}^3, & \text{for even } i \\ k_{i-N/8}^3, & \text{for odd } i \end{cases}. \quad (6)$$

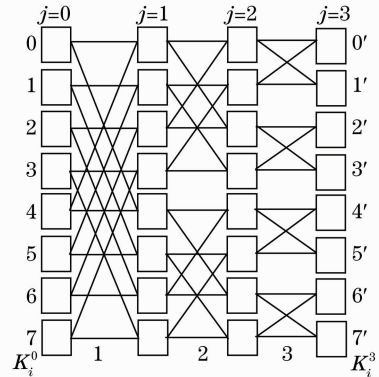


图 1  $N=8$  榕树网拓扑图

Fig. 1 Schematic diagram of the banyan network for  $N=8$

榕树网是一种阻塞型网络,单个的 Banyan 网络不能完成输入/输出通道间光信号的全排列输出与互连,即在互连网络中存在路径冲突与阻塞,使有些输出排序得不到实现。可以通过 Banyan 网络与逆 Banyan 网络的串联,构成的双 Banyan 网络有效地解决路径的冲突与阻塞<sup>[20,21]</sup>,实现输入信号光全排列无阻塞的交换与排序。图 2 为全排列无阻塞型双榕树网的拓扑结构图,很明显该互连网络由  $2\lg^N - 1$  级路由级构成(省略掉连接处重复的  $N$  个节点开关)。

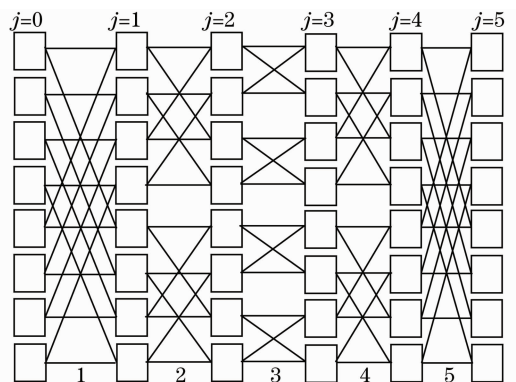


图 2 全排列无阻塞双榕树网络拓扑图

Fig. 2 Schematic diagram of full-permutation non-blocking double banyan network

### 3 榕树网节点开关的设计

节点开关是光互连网络中实现光信号交换的最基本的功能单元,它的设计和开发对于构建全光网络及实现全光交换都具有重要的作用。本文设计的与偏振无关的双向 $2 \times 2$ 光开关如图3所示。它由2块偏振分束器(PBS1和PBS2),2块相位型空间光调制器(PSLM1和PSLM2),4块全反射镜(mirror 1~mirror 4)构成。相位型空间光调制器在外加电压作用下,它的每个像素处于激活态,可以产生 $\pi$ 的相位差,使通过它的偏振光的偏振态发生改变,设此时状态是“1”;反之,无外加电压时,PSLM的每个像素处于非激活态,不产生相位差,因此不改变通过它的信号光的偏振态,此时状态为“0”。通过对PSLM1和PSLM2上外加电压的控制,可以很方便地调整通过的信号光的偏振态,实现所需的路由,完成特定的信号交换。

表1为与偏振无关双向 $2 \times 2$ 光开关实现直通和交叉功能时PSLM1和PSLM2对应的状态。下面对该 $2 \times 2$ 光开关的功能原理进行讨论。

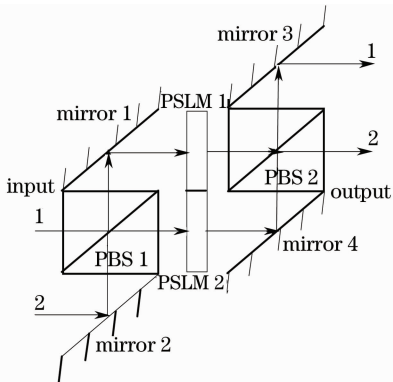


图3 与偏振无关双向 $2 \times 2$ 光开关

Fig. 3 Polarization-independent bidirectional  $2 \times 2$  optical switch

表1 与偏振无关双向 $2 \times 2$ 光开关状态表

Table 1 State-table of polarization-independent bidirectional  $2 \times 2$  optical switch

Input order	PSLM		Output order
	1	2	
(1 2)	0	0	(1 2)
(1 2)	1	1	(2 1)

当相位型空间光调制器PSLM1和PSLM2的状态均被设置为“0”时,输入端口1的信号光被偏振光分束器PBS1分成P光分量和S光分量。其中S光分量被PBS1反射,向上传输又被mirror 1反射,到达PSLM1,由于PSLM1的状态是“0”,所以S光保持偏振态不变,继续向右传输被PBS2反射,继

被mirror 3反射后,从输出端口1输出;同时,输入端口1信号光的P光分量通过PBS1后,到达PSLM2,同样,由于PSLM2的状态为“0”,所以P光保持偏振态不变,继续向右传输,从而被mirror 4反射,向上传输直接通过PBS2后,又被mirror 3反射,最终也从输出端口1输出。由此可知,输入端口1信号光的S光和P光分量,通过各自的路径后,最终在同一输出端口1会合,完成了从输入端口1进入的信号光从输出端口1输出的直通连接。同理,输入端口2信号光的S光和P光分量,通过各自的路径后,最终将在同一输出端口2会合,完成输入信号光2的直通连接。由上面的分析可知,当相位型空间光调制器PSLM1和PSLM2的状态均被设置为“0”时,该 $2 \times 2$ 光开关实现直通功能,而且该光开关功能的实现与信号光的偏振态无关。

当相位型空间光调制器PSLM1和PSLM2的状态均被设置为“1”时,输入端口1的信号光被偏振光分束器PBS1分成P光分量和S光分量。其中S光分量被PBS1反射,向上传输又被反射镜mirror 1反射,到达PSLM1,由于PSLM1的状态是“1”,S光变为P光,继续向右传输直接通过PBS2,从输出端口2输出;同时,输入端口1信号光的P光分量通过PBS1后,到达PSLM2,同样,由于PSLM2的状态为“1”,P光变成S光,继续向右传输,从而被mirror 4反射,向上传输又被PBS2反射,最终也从输出端口2输出。由此可知,输入端口1信号光的S光和P光分量,通过各自的路径后,S光变成P光,而P光变成S光,最终在同一输出端口2会合,完成了从输入端口1进入的信号光从输出端口2输出的交叉连接。同理,输入端口2信号光的S光和P光分量,通过各自的路径后,S光变成P光,而P光变成S光,最终在同一输出端口1会合,完成了输入信号光2从输出端口1输出的交叉连接。由上面的分析可知,当相位型空间光调制器PSLM1和PSLM2的状态均被设置为“1”时,该 $2 \times 2$ 光开关实现交叉功能,该光开关功能的实现与信号光的偏振态无关。

由 $2 \times 2$ 光开关结构的对称性可知,当将输出端口与输入端口交换,即将输出端作为输入端输入两束信号光时,根据系统光路的可逆性,在原来的输入端口同样可以得到直通和交叉连接的光信号输出。因此,该 $2 \times 2$ 光开关不仅与信号光的偏振态无关,而且具有双向交换的功能。该光开关的结构非常紧凑,控制简单,装配和调试都很方便。由4块相同的 $2 \times 2$ 光开关可构成8信道的全排列无阻塞双榕树网络的节点级,如图4所示。

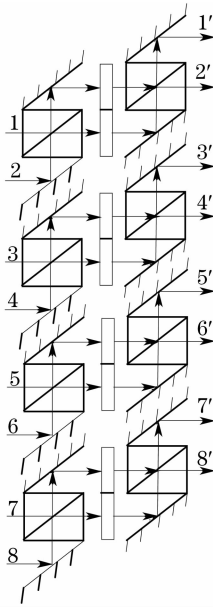


图4 各节点开关级结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structure of per node stage

### 4 榕树网各路由级的光学实现

如图2所示,该双榕树网的第1和第5路由级的连接关系(链路函数)一样;第2和第4路由级的连接关系也一样。下面分别对各路由级连接关系的光学实现进行讨论。

采用与上面节点开关单元相同的偏振控制技术和设计方法,对应于(1)~(6)式分别设计各路由级的光学实现模块。图5所示为第1和第5路由级光学实现模块,其对应的输出序列和各相位型空间光调制器的状态如表2所示。从表中可以看出,当相应通道信号光所对应的空间光调制器的状态为“0”时,实现信号光的直通连接;反之空间光调制器的状态是

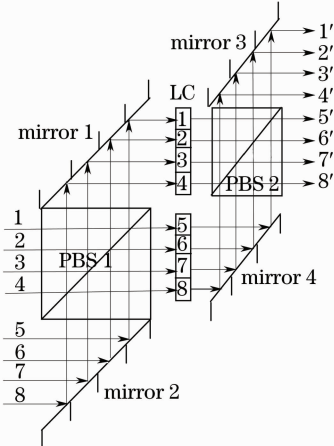


图5 第1和第5路由级光学实现模块

Fig. 5 Optical implementation for the first and fifth routing stage

“1”,即完成相应通道信号光的交叉互连。

表2 第1路由级光学模块对应的输出序列以及空间光调制器的状态

Table 2 Corresponding permutations and control states for the first routing stage

Input port	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8	Output port
(1 5)	0				0				(1' 5')
	1				1				(5' 1')
(2 6)		0				0			(2' 6')
		1				1			(6' 2')
(3 7)			0				0		(3' 7')
			1				1		(7' 3')
(4 8)				0				0	(4' 8')
				1				1	(8' 4')

图6为第2和第4路由级光学实现模块,其对应的输出序列和各相位型空间光调制器的状态如表3所示。同理,图7为第3路由级的光学实现模块,其对应的输出序列及各相位型空间光调制器的状态如表4所示。

表3 第2路由级光学模块对应的输出序列以及空间光调制器的状态

Table 3 Corresponding permutations and control states for the second routing stage

Input port	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8	Output port
(1 3)	0		0						(1' 3')
	1		1						(3' 1')
(2 4)		0		0					(2' 4')
		1		1					(4' 2')
(5 7)					0		0		(5' 7')
					1		1		(7' 5')
(6 8)						0		0	(6' 8')
						1		1	(8' 6')

表4 第3路由级光学模块对应的输出序列以及空间光调制器的状态

Table 4 Corresponding permutations and control states for the third routing stage

Input port	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8	Output port
(1 2)	0	0							(1' 2')
	1	1							(2' 1')
(3 4)			0	0					(3' 4')
			1	1					(4' 3')
(5 6)					0	0			(5' 6')
					1	1			(6' 5')
(7 8)							0	0	(7' 8')
							1	1	(8' 7')

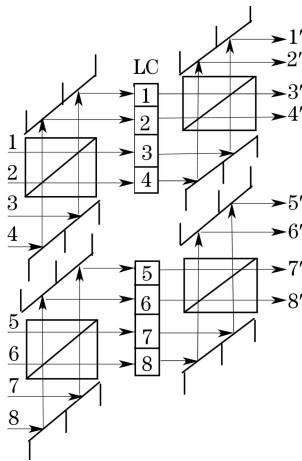


图 6 第 2 和第 4 路由级光学实现模块

Fig. 6 Optical implementation for the second and the fourth routing stage

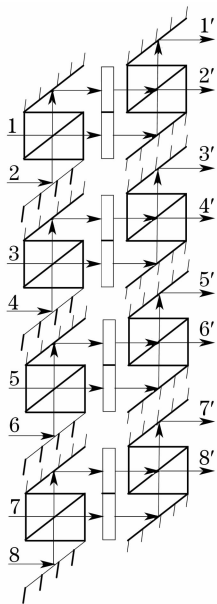


图 7 第 3 路由级光学实现模块

Fig. 7 Optical implementation for the third routing stage

由于第 3 路由级的连接关系与各节点开关级信号光的交换方式相同,因此它们具有相同的模块结构,如图 4 和图 7 所示。根据上面的讨论可知,节点开关模块以及各路由级交换模块均采用类似的结构设计和相同的偏振控制技术,因此该双榕树网络的信号连接和路由控制都相对简单和方便。

## 5 实验测试

对设计的  $2 \times 2$  光开关单元的插入损耗、串扰、回波损耗等参数进行了初步的实验检测。实验中采用的相位型空间光调制器的对比度大约为  $100:1$ , 光隔离度大约是  $30 \text{ dB}$ , 插入损耗小于  $1.5 \text{ dB}$ , 阈值电压约为  $4 \sim 4.5 \text{ V}$ , 即当外加电压超过其阈值时, 相位型空间光调制器的每个像素处于激活态, 可以产生相位差, 使通过它的偏振光的偏振态发生改变; 反之, 无外加电压或外加电压低于其阈值时, PSLM 的每个像素处于非激活态, 不产生相位差, 因此不改变通过它的偏振光的偏振态。偏振分束器的参数为: 对于 P 光, 对比度  $S/P = -30 \text{ dB}$ , 透过率大约是  $96.8\%$ ; 对于 S 光, 对比度  $P/S = -30.2 \text{ dB}$ , 反射率大约为  $96.2\%$ 。

实验中采用截断法测得  $2 \times 2$  光开关实现信号光直通和交叉变换时各端口对应的串扰, 以及利用回波损耗测试仪对光开关两个输出端口光功率分别进行测试时, 测得的插入损耗和回波损耗分别如表 5 所示。该交换开关的交换时间取决于所采用的相位型空间光调制器的响应速度, 可以到达毫秒级。同时, 利用偏振扫描法对其偏振相关损耗 (PDL) 进行了初步的测量, 对应于相位型空间光调制器的“0”和“1”状态,  $2 \times 2$  光开关的偏振相关损耗为  $0.242 \sim 0.368 \text{ dB}$ , 这说明该光开关的偏振相关损耗相对较小。

表 5 初步实验结果

Table 5 Preliminary experimental results

Function	PSLM1	PSLM2	Interchannel crosstalk /dB	Insertion loss /dB	Return loss /dB	Driving power /V
Straight state	1-1	0	-50.28	2.82	-43.26	4~4.5
	2-2	0	-48.22	2.91	-45.08	
Exchanging state	1-2	1	-46.16	2.86	-41.34	
	2-1	1	-48.38	2.95	-42.51	

从表 5 可看出, 该光开关的主要性能指标均较好, 具有插损小、串扰低、可靠性高等特点。由于该  $2 \times 2$  光开关还处于初步的调试阶段, 随着实验的继续深入和有关实验设备的调整完毕, 该光开关相关性能参数的测试指标将会进一步得到提高, 因此相信在下

一阶段对全排列无阻塞双榕树网络整体性能参数的测试过程中, 通过选择消光比好、响应度高、插损小的相位型空间光调制器和偏振光分束器, 精确控制各光学元件的对位、装配、调试和封装, 将有效地提高各单元器件间的耦合效率和减小光能量损耗。

## 6 结 论

全排列无阻塞双榕树网在并行多处理计算机系统和光互连矩阵开关网络中具有重要的应用。本文采用偏振光分束器、相位型空间光调制器和反射镜设计了全排列无阻塞双榕树网络,可以完成输入信号光  $N!$  种序列的输出与排序,不会出现路径的冲突与信号的阻塞。该榕树网络的节点开关和各路由级交换模块均采用类似的结构和相同的偏振控制技术,由此设计的光学模块具有结构简单、控制方便、易扩展与集成、与信号光偏振态无关和可双向交换等特点。如果采用高密度垂直表面发射激光器阵列(VCSEL)作为光源,高质量的微透镜阵列作为准直器,以及采用高速的铁电液晶空间光调制器,该设计方法可以拓展和推广到大端口高速的榕树型交换网络,因此该方法设计的交换模块具有较强的扩容和升级能力,相信在高速高宽带光信息处理以及大矩阵光开关交换网络中会有一些的应用。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Junbo, Su Xianyu. An implemental method of two-dimensional banyan network in free space[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1636~1642  
杨俊波, 苏显渝. 自由空间二维榕树网实现方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1636~1642
- 2 Junbo Yang, Xianyu Su, Ping Xu. Perfect shuffle transform based on a microblazed grating array[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(2): 210~215
- 3 Xuan Luo, Yaohui Jin, Qingji Zeng *et al.*. On the stability of multicast flow aggregation in IP over optical network for IPTV delivery[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 553~557
- 4 Yang Junbo, Su Xianyu, Xu Ping. Optical implementation method of perfect shuffle transformation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(4): 505~511  
杨俊波, 苏显渝, 徐平. 全混洗变换的光学实现方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(4): 505~511
- 5 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization-dependent and polarization-independent  $4 \times 4$  free-space optical switch [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 383~388  
杨俊波, 苏显渝. 与偏振相关和无关的  $4 \times 4$  自由空间光开关[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 383~388
- 6 Liu Zhonglin, Cao Mingcui, Li Hongpu *et al.*. Transformations between optical banyan networks and perfect shuffle networks and their implementation[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(9): 852~856  
刘中林, 曹明翠, 李洪谱等. 光学榕树网络与全混洗网络之间的转换及实现[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(9): 852~856
- 7 Hou Peipei, Song Zhe, Liu Liren *et al.*. Integrated optical  $N \times N$  crossbar network and its control algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 365~369  
侯培培, 宋哲, 刘立人等. 单块晶体集成的  $N \times N$  纵横开关网络及其控制算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 365~369
- 8 Xiang Peng, Wang Rong. A path projection algorithm with differentiated reliability in multi-domain optical networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1648~1654  
项鹏, 王荣. 多域光网络中一种支持区分可靠性的通路保护算法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1648~1654
- 9 Xiaohong Jiang, Pinhan Ho, Horiuchi S. Performance modeling for all-optical photonic switches based on the vertical stacking of banyan network structures[J]. *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, 2005, **23**(8): 1620~1631
- 10 Peng Haifeng, Liu Liren, Liang Feng. CC-banyan network and its optical implementation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 889~892  
彭海峰, 刘立人, 梁丰. CC榕树网络及其光学实现[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 889~892
- 11 Yang Liming, Zhou Kejiang. The banyan network and optical implementation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1045~1049  
杨李茗, 周柯江. 榕树型互连网络及光学实现[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 1045~1049
- 12 Li Hongpu, Cao Mingcui, Luo Fengguang *et al.*. Implement of the optical banyan nonblock four port switching network[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 416~420  
李洪谱, 曹明翠, 罗风光等. 无冲突4端口榕树开关网络的实验研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4): 416~420
- 13 Yu Chongxiu, Yang Qifang. A novel compact architecture for banyan network interconnection (BNI) [C]. *SPIE*, 1998, **3466**: 316~323
- 14 Liu Yanting, Ni Wei, Wu Xingkun. A soft-lithography-based vertically coupling structure for multilayered optical interconnection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 349~354  
刘彦婷, 倪玮, 吴兴坤. 基于软光刻的多层光互连垂直耦合结构[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 349~354
- 15 Haifeng Peng, Liren Liu, Bingquan Wang *et al.*. Optical implementation of regular rectangular CC-banyan network by using polarizing beam splitters [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**: 37~42
- 16 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. A novel reconfigurable optical add-drop multiplexer based on thin-film filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1247~1251  
俞侃, 刘文, 黄德修等. 基于薄膜滤光片的新型可重构光分插复用器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1247~1251
- 17 Fengguang Luo, K. W. Wong, L. M. Cheng. Recirculating implementation of the optical segmental banyan network [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **152**: 403~411
- 18 Degui Sun, Wenyuan Deng, Shulin E. Study for performance of thermo-optic matrix switches with flexible switching units and banyan network[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1): 014602~014609
- 19 Ying Zha, Degui Sun, Tiegen Liu *et al.*. Rearrangeable nonblocking  $8 \times 8$  matrix optical switch based on silica waveguide and extended banyan network[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 390~392
- 20 Luo Fengguang, Xu Jun, Cao Mingcui *et al.*. Optical implementation method of full-permutation non-blocking double omega optical interconnection network in optical computing[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(3): 220~224  
罗风光, 徐军, 曹明翠等. 光计算中全排列无阻塞型双Omega光互连网络的光学实现方法[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(3): 220~224
- 21 Hyong S. Kim, Alberto Leon-Garcia. Nonblocking property of reverse banyan networks[J]. *IEEE T. Commun.*, 1992, **40**(3): 472~476