

文章编号: 0253-2239(2004)12-1677-6

4×4 自由空间光开关结构及其矩阵分析*

罗风光 曹明翠 谢 胡 周新军 罗志祥 徐 军
(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 光开关是全光通信网络中的一种重要的光无源器件。提出了一种 4×4 自由空间光开关的结构设计方法, 并进行了矩阵理论分析。该 4×4 光开关具有新颖的光模块化结构, 该光开关结构仅由偏振分束组合棱镜, λ/4 波片, λ/2 波片, 直角棱镜, 全反镜和偏振光调制器组成, 对光开关的控制与输入光束的偏振态无关。所有的输出端口可以和输入端口无阻塞地互连交换。这种新型的光开关结构具有光学元件少, 结构紧凑, 模块化, 与偏振无关的特点。基于 4×4 光开关的矩阵分析得到了路由控制表, 为 4×4 光开关从任意输入端口到任意输出端口的路由控制状态提供了理论分析手段, 从而可以方便地实现无阻塞地光交换开关矩阵的路由控制功能。

关键词: 光纤通信技术; 光开关; 矩阵理论; 自由空间; 光交叉连接; 密集波分复用
中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

4×4 Free-Space Optical Switch Structure and Its Matrix Analysis

Luo Fengguang Cao Mingcui Xie Hu Zhou Xinjun Luo Zhixiang Xu Jun
(State Key Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)
(Received 30 May 2003; revised 18 June 2004)

Abstract: Optical switch is a kind of important passive optical components in all-optical communication network. A kind of optical structure design method of 4×4 free-space optical switch is presented and a matrix theoretical analysis is made for this 4×4 optical switch structure. The 4×4 optical switch has a novel optical module configuration. It consists of polarization beam splitter, 1/4 wave plate, 1/2 wave plate, polarization optical modulator, right angle prism, and total reflection mirror. The operation is independent of the polarization states of input optical signals. Non-blocking optical switching can be implemented between input channels and output channels. This new kind of optical switch structure has the features of less optical components, compact size, modularity, polarization-independent. The routing control table for the 4×4 optical switch is given based on the matrix analysis. It provides a theoretical analysis method to describe routing controlling states between any one of the input channel and any one of the output channel of the 4×4 optical switch. So the routing controlling function of the non-blocked optical switching matrix can be realized expediently.

Key words: optical fiber communication technology; optical switch; matrix theory; free-space; optical cross connect; dense wavelength division multiplexing

1 引 言

随着全球通信业务量的飞速发展, 通信服务类型的增加, 高速大容量的宽带综合业务数字网已成为现代通信网络发展的必然趋势。基于电子技术的

传统通信网, 由于电子器件的速率已经越来越接近物理和技术上的极限, 进一步提高速率将使系统成本大大增加。电子信号处理速率上限约为 10 Gbit/s, 因此必须克服目前光纤传输网中由于存在光/电-电/光转换而引起的电子瓶颈, 出路是采用宽带、大容量、高速的密集波分复用(DWDM)全光通信网^[1]。随着光纤通信干线网的建立, 光纤到户(FTTH)的用户网是未来光通信网发展的方向, 它

* 国家自然科学基金(60177023)资助课题。

E-mail: fgluo@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2003-05-30; 收到修改稿日期: 2004-06-18

交换,实现了交换互连。由于信号光 1、信号光 2 的 s 偏振光分量和 p 偏振光分量分别在输出端口合并,从而实现与偏振无关输出。

同理,当偏振光调制器 PLM 处于“off”状态时,设 PLM 的状态为 $S(0)=1$,此时入射到偏振分束棱镜 PBS_2 上的信号光的偏振状态将不发生改变,此时信号光 1 的 s 偏振光分量和 p 偏振光分量分别通过直角棱镜 RAP 和全反镜 TR 反射重新会合到一起后,由输出端口 1' 输出;而信号光 2 的 s 偏振光分量和 p 偏振光分量分别通过直角棱镜 RAP 和全反镜 TR 反射重新会合到一起后,由输出端口 2' 输出,实现了直通互连。当将该 2×2 光开关结构的输出端作为输入端输入两束光信号时,由于该光学系统光路的可逆性,在其原来的输入端同样可以得到直通和交换的光信号输出,即可以实现双向光开关功能。与国外已报道的 2×2 光开关相比,该光开关结构所用的光学元件少,结构紧凑可靠,易于光学装配和调试。

采用上面提出的 2×2 光开关结构可通过适当的扩展方式构造 4×4 光开关结构,该结构同样具有与偏振无关的双向光开关功能。其光学原理图如图 2 所示。

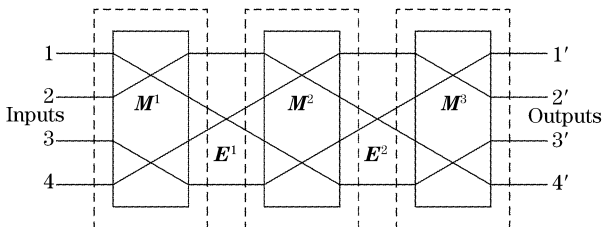


Fig. 2 Schematic of 4×4 free-space polarization-independent optical switch

整个 4×4 光开关结构由三个完全相同的自由空间光交换模块 A、B、C 组成,模块之间采用固定连接方式实现光信号通道转换。每个光交换模块的光学结构如图 3 所示。输入的 4 路光信号经偏振分束棱镜 PBS_1 进入光学系统,偏振分束棱镜 PBS_1 中的两个界面 PF 均为偏振面,将入射光分为 p 偏振光和 s 偏振光分量。偏振分束棱镜 PBS_1 中粗线表示的界面 TR 为双面全反射面,它只改变光束的传输方向,不改变光的偏振态或相位。输入端口 1,2 的水平光分量只能经 PBS_1 中的反射界面 TR 反射后向上传输;而输入端口 3 的所有光分量都将由 PBS_1 中的反射界面 TR 反射后,向右水平传输到偏振面 PF 上,由偏振面 PF 分为 p 偏振光和 s 偏振光分量。偏振光调制器阵列 S_1 中的 S_{11} 、 S_{12} 分别为偏振光开关单元。用与 2×2 光开关结构同样的分析方法,通

过控制各偏振光开关单元不同的开关状态,可实现 4 路输入光信号 1、2、3、4 到任意 4 路输出信号通道 1'、2'、3'、4' 输出的 4×4 开关矩阵功能。当将该 4×4 光开关结构的输出端作为输入端输入 4 束光信号时,由于该光学系统光路的可逆性,在其原来的输入端同样可以得到交换后的光信号输出,即可以实现双向光开关功能。图 4 为 4×4 自由空间光开关的整体结构。其中偏振光开关单元 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{31} 、 S_{32} 分别具有两种偏振控制状态“0”和“1”。为便于下面的矩阵分析,我们引入 $S_{ji}(0)$ 、 $S_{ji}(1)$, $i=1,2, j=1,2,3$ 来描述这两种偏振控制状态。即当 S_{ji} 取“0”时,有 $S_{ji}(0)=1, S_{ji}(1)=0$,此时偏振控制状态保持不变;而当 S_{ji} 取“1”时,有 $S_{ji}(0)=0, S_{ji}(1)=1$,此时偏振控制状态改变 90° 。

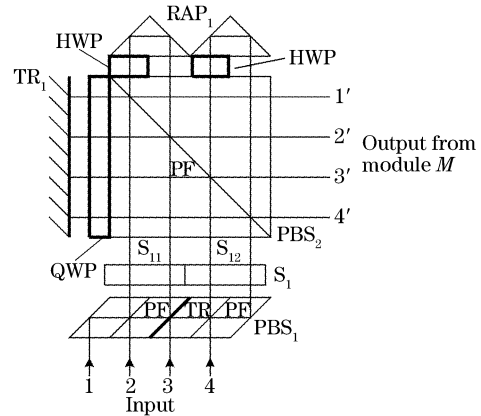


Fig. 3 Structure of unit module of 4×4 free-space optical switch

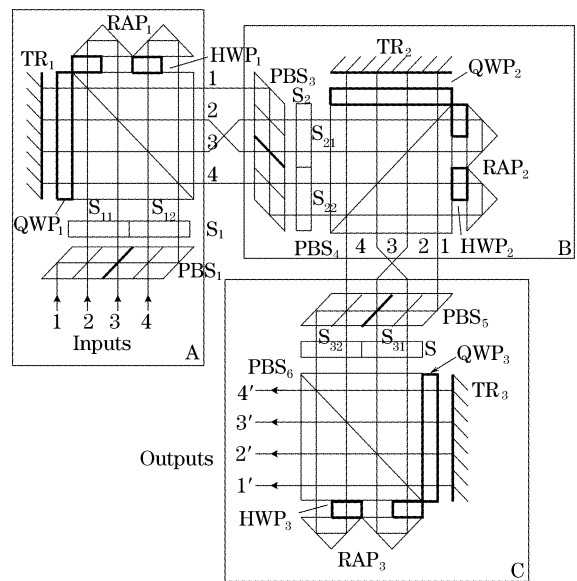


Fig. 4 Optical structure of 4×4 free-space optical switch
对自由空间光纤光开关的互连方式和节点状态进行理论分析和矩阵描述,可以方便直观地描述光

开关的路由控制状态等特性,对光开关的设计具有指导作用。在光互连网络的研究中,我们对不同拓扑结构的光互连网络进行了矩阵理论分析,较好地解决了光互连网络和节点状态统一的数学描述问题^[14]。在本文的研究中,我们也将采用矩阵理论来分析这种具有新的自由空间光互连结构的 4×4 光纤光开关的特性。

3 矩阵描述

为了直观地描述光开关的开关特性,我们可以用矩阵理论来表示光开关输入端口与输出端口的互连关系。设 \mathbf{K}^0 、 \mathbf{K}' 分别为光开关输入端口与输出端口序号的列矢量,对于一个 $N \times N$ 的光开关,则 \mathbf{K}^0 、 \mathbf{K}' 可分别表示为

$$\mathbf{K}^0 = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_N)^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{K}' = (k'_1, k'_2, k'_3, \dots, k'_N)^T, \quad (2)$$

其中 $k_i, k'_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 为输入端口与输出端口的序号, N 为输入、输出端口数。对于 2×2 光开关,输入端口与输出端口的列矢量可简单地表示为

$$\mathbf{K}^0 = (k_1, k_2)^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{K}' = (k'_1, k'_2)^T, \quad (4)$$

输入端口与输出端口之间的开关状态可以用一个 2×2 的传输矩阵 M 来表示:

$$\mathbf{K}' = M\mathbf{K}^0, \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} S(0) & S(1) \\ S(1) & S(0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中矩阵元 $S(0)$ 和 $S(1)$ 分别表示光开关偏振光调制器 PLM 的偏振控制状态,它们满足下列条件:

当 $S(0) = 1, S(1) = 0$ 时,偏振控制状态保持不

变;

当 $S(0) = 0, S(1) = 1$ 时,偏振控制状态改变 90° 。

对于 4×4 光开关,输入端口与输出端口的列矢量可表示为

$$\mathbf{K}^0 = (k_1, k_2, k_3, k_4)^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{K}' = (k'_1, k'_2, k'_3, k'_4)^T, \quad (8)$$

每一级的输入端口与输出端口之间的互连关系可用相应的传输矩阵 $M_j (j = 1, 2, 3)$ 来表示:

$$M_j = \begin{bmatrix} S_{j1}(0) & S_{j1}(1) & 0 & 0 \\ S_{j1}(1) & S_{j1}(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{j2}(0) & S_{j2}(1) \\ 0 & 0 & S_{j2}(1) & S_{j2}(0) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$j = 1, 2, 3,$

其中当偏振控制状态单元 $S_{ji}(0) = 1, S_{ji}(1) = 0, i = 1, 2$ 时,偏振控制状态保持不变;当 $S_{ji}(1) = 1, S_{ji}(0) = 0, i = 1, 2$ 时,偏振控制状态改变 90° 。每一级光开关互连模块之间的互连关系可以用同样的矩阵关系表示为

$$E = E^1 = E^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

E^1, E^2 分别为第一级与第二级,第二级与第三级互连模块之间的互连矩阵。根据以上分析,则整个 4×4 光开关输出端口与输入端口的矩阵关系可表示为

$$\mathbf{K}' = M^3 E^2 M^2 E^1 M^1 \mathbf{K}^0, \quad (11)$$

即

$$\begin{bmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \\ k'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{31}(0) & S_{31}(1) & 0 & 0 \\ S_{31}(1) & S_{31}(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{32}(0) & S_{32}(1) \\ 0 & 0 & S_{32}(1) & S_{32}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{21}(0) & S_{21}(1) & 0 & 0 \\ S_{21}(1) & S_{21}(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{22}(0) & S_{22}(1) \\ 0 & 0 & S_{22}(1) & S_{22}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11}(0) & S_{11}(1) & 0 & 0 \\ S_{11}(1) & S_{11}(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{12}(0) & S_{12}(1) \\ 0 & 0 & S_{12}(1) & S_{12}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

根据我们提出的 4×4 自由空间光开关的结构设计和矩阵分析,可以构造模块化的 4×4 自由空间光开关器件,表 1 列出了 4×4 光开关的路由状态控

制表,其中 $1', 2', 3', 4'$ 分别为 4×4 光开关的输出通道序号,序号 $1, 2, 3, 4$ 分别为输出通道连接的对应的输入通道号。图 5 为 4×4 自由空间光开关模块

的调试照片,进一步的实验研究正在进行中。

Table 1 Routing control table for the 4×4 optical switch

No.	Routing states						Outputs			
	S ₁₁	S ₁₂	S ₂₁	S ₂₂	S ₃₁	S ₃₂	1'	2'	3'	4'
1	0	0	0	0	0	0				
2	0	1	0	0	0	1	1	2	3	4
3	1	0	0	0	1	0				
4	1	1	0	0	1	1				
5	0	0	0	0	0	1				
6	0	1	0	0	0	0	1	2	4	3
7	1	0	0	0	1	1				
8	1	1	0	0	1	0				
9	0	0	0	0	1	0				
10	0	1	0	0	1	1	2	1	3	4
11	1	0	0	0	0	0				
12	1	1	0	0	0	1				
13	0	0	0	0	1	1				
14	0	1	0	0	1	0	2	1	4	3
15	1	0	0	0	0	1				
16	1	1	0	0	0	0				
17	0	0	0	1	0	0	1	4	3	2
18	1	1	1	0	1	1				
19	0	0	0	1	0	1	1	4	2	3
20	1	1	1	0	1	0				
21	0	0	0	1	1	0	4	1	3	2
22	1	1	1	0	0	1				
23	0	0	0	1	1	1	4	1	2	3
24	1	1	1	0	0	0				
25	0	0	1	0	0	0				
26	1	0	1	1	0	1	3	2	1	4
27	1	1	0	1	1	1				
28	0	0	1	0	0	1				
29	1	0	1	1	0	0	3	2	4	1
30	1	1	0	1	1	0				
31	0	0	1	0	1	0				
32	1	0	1	1	1	1	2	3	1	4
33	1	1	0	1	0	1				
34	0	0	1	0	1	1				
35	1	0	1	1	1	0	2	3	4	1
36	1	1	0	1	0	0				
37	0	0	1	1	0	0				
38	0	1	1	1	1	0	3	4	1	2
39	1	1	1	1	1	1				
40	0	0	1	1	0	1				
41	0	1	1	1	1	1	3	4	2	1
42	1	1	1	1	1	0				
43	0	0	1	1	1	0				
44	0	1	1	1	0	0	4	3	1	2
45	1	1	1	1	0	1				
46	0	0	1	1	1	1				
47	0	1	1	1	0	1	4	3	2	1
48	1	1	1	1	0	0				
49	0	1	0	1	0	0	1	3	4	2
50	1	0	1	0	1	1				
51	0	1	0	1	0	1	1	3	2	4
52	1	0	1	0	1	0				
53	0	1	0	1	1	0	3	1	4	2
54	1	0	1	0	0	1				
55	0	1	0	1	1	1	3	1	2	4
56	1	0	1	0	0	0				
57	0	1	1	0	0	0	4	2	1	3
58	1	0	0	1	1	1				
59	0	1	1	0	0	1	4	2	3	1
60	1	0	0	1	1	0				
61	0	1	1	0	1	0	2	4	1	3
62	1	0	0	1	0	1				
63	0	1	1	0	1	1	2	4	3	1
64	1	0	0	1	0	0				

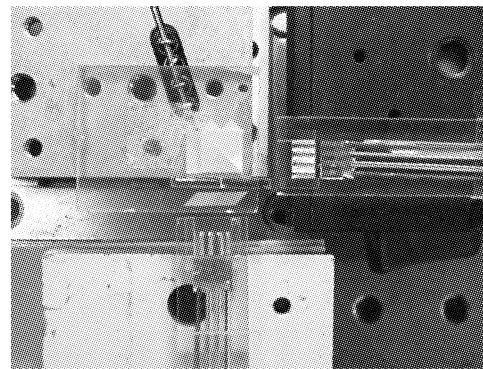


Fig. 5 Experimental photograph of the 4×4 free-space optical switch module

结论 本文提出了一种与偏振无关的 4×4 自由空间光开关的结构设计方法,并进行了矩阵分析。该与偏振无关的 4×4 自由空间光开关矩阵具有光模块化结构,所有的输入端口可以和输出端口可以实现无阻塞互连。对光开关矩阵的控制与输入光束的偏振态无关。这种新型的光开关结构具有光学元件少、结构紧凑、模块化、偏振无关性等特点。 4×4 光开关从任意输入端口到任意输出端口的路由控制状态可以很容易地从基于矩阵分析的路由控制表得到。 4×4 光开关的矩阵理论分析对光开关功能的实现提供了方便的理论研究手段。

参 考 文 献

- 1 Borella M S, Jue J P, Ramamurthy B *et al.*. Optical components for WDM lightwave networks. *Proc. IEEE*, 1997, **85**(8): 1274~1307
- 2 Nong Xueqin, Huang Jingyuan, He Bin *et al.*. The actuality of market and application of mechanical optical switch. *Opt. Commun. Technol.* (光通信技术), 2002, **26**(4): 15~17 (in Chinese)
- 3 Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W. Free-space micromachined optical switched with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 525~527
- 4 Cao Zhonghui, Bao Junfeng, Yuan Ye *et al.*. A non-silicon-based 1×4 MEMS optic switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(9): 1041~1044 (in Chinese)
- 5 Yang Jun, Ruan Yu, Wang Suqin *et al.*. Theoretical analysis of a new type of magneto-optic switch and its design of the magnetic route. *Optoelectronic Technol. & Information* (光电子技术与信息), 2002, **15**(5): 26~31 (in Chinese)
- 6 Dong Liangwei, Yan Xiaona, Shi Kaiyuan *et al.*. Theory of electric field-controlled 2×2 photorefractive switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 787~792 (in Chinese)

- 7 Yan Xiaona, Liu Liren. Theory of anisotropic-diffraction based photorefractive switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10): 1249~1252 (in Chinese)
- 8 Li Jie, Huang Yonglin, Kai Guiyun *et al.*. Study of extinction ratio of Mach-Zehnder interferometer and implementation of single-channel optical switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(8): 916~919 (in Chinese)
- 9 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Polymer thermo-optic switches with Y-branch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6): 735~738 (in Chinese)
- 10 Takashi Goh. Recent advances in large-scale silica-based thermo-optic switches. *Proc. SPIE*, 2001, **4582**: 49~56
- 11 Riza N A. Reconfigurable wavelength add-drop filtering based on banyan network topology and ferroelectric liquid crystal fibre optic switches. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1575~1584
- 12 Cao Mingcui, Hu Qiaoyan, Wan Zhujun *et al.*. A novel routing optical matrix switching method. *Opt. Commun.*, 2002, **204**(1~6): 163~170
- 13 Riza N A, Yuan S. Low optical interchannel crosstalk, fast switching speed, polarization independent 2×2 fibre optic switch using ferroelectric liquid crystals. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1341~1342
- 14 Cao Mingcui, Li Hongpu, Luo Fengguang *et al.*. Free-space regular optical interconnections: a mathematical analysis. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2960~2967