

文章编号: 0258-7025(2007)03-0383-06

与偏振相关和无关的 4×4 自由空间光开关

杨俊波, 苏显渝

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 设计了一种由相位型空间光调制器(PSLM)、偏振光分束器(PBS)、反射镜、半波片(HWP)和四分之一波片(QWP)构成的 2×2 光开关。该光开关所用器件少,具有结构紧凑规整、功能的实现与信号光的偏振态无关以及可以完成双向交换等特点。在此基础上通过 2×2 光开关的级联,设计了一种与偏振无关的 4×4 光开关的实验模块,根据其路由控制表对该实验模块功能的实现进行了分析。为与之作比较,还提出了一种与偏振相关的 4×4 光开关,该光开关利用对信号光偏振态的控制进行路由选择,以实现所需的交换和排序。

关键词 光通信;光开关;相位型空间光调制器;偏振光分束器

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Polarization-Dependent and Polarization-Independent 4×4 Free-Space Optical Switch

YANG Jun-bo, SU Xian-yu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract A novel 2×2 optical switch, which consists of phase spatial light modulator (PSLM), polarizing beam-splitter (PBS), mirror, half-wave plate(HWP) and quarter-wave plate (QWP), is proposed. This new kind of configuration of the optical switch has the features of less optical components, compact structure, efficient performance, and insensitiveness to polarization of signal beam. In addition, the straight and the exchange functions of 2×2 optical switch are implemented bi-directionally in free-space. A optical experimental module of polarization-independent 4×4 optical switch is achieved by cascading polarization-independent bidirectional 2×2 optical switch and is analyzed according to path control table. Simultaneously, a kind of polarization-dependent 4×4 optical switch is also investigated for comparison, the exchange sort of the polarization-dependent 4×4 optical switch is achieved by control of polarization state of signal beam for routing.

Key words optical communication; optical switch; phase spatial light modulator; polarizing beam-splitter

1 引 言

光开关在全光通信中具有重要的作用,它可以实现光信号的通、断、系统保护倒换、系统监测、信号光路由、波长选择、光交叉连接、光分插复用和自愈等功能。到目前为止,已经设计和研发了各种不同的光开关,根据设计原理、交换速度、粒度、带宽以及串扰指标的不同可以分为:电光开关^[1,2]、磁光开关^[3]、热光开关^[4~6]和机械式开关^[7~9]等。国外的学者对此问题也进行了大量的研究,提出了许多实

现光信号交换的方法^[10~14]。其中,文献[14]提出了一种与偏振无关的自由空间 2×2 双向光纤光开关结构。采用 4 块偏振光分束器,4 块铁电液晶偏振光开关(ferroelectric liquid crystal, FLC),波片和全反镜等光学元件。这种 2×2 的光开关由于所用光学元件太多,结构非常复杂,不利于光电集成构建大规模的光开关矩阵,而且光学调试和控制都非常麻烦。针对此问题,文献[15]中设计了一种新的与偏振无关的双向 2×2 光纤光开关。每个光开关模块由 2 个偏振光分束器,2 块铁电液晶偏振光控制单

收稿日期:2006-06-28;收到修改稿日期:2006-09-12

作者简介:杨俊波(1974—),男,四川人,博士研究生,主要从事信息光学和光通信研究。E-mail:yangjunbo008@sohu.com

导师简介:苏显渝(1944—),男,重庆市人,教授,博士生导师,目前研究方向为信息光学和光学三维传感技术。

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

元,1块四分之一波片,1块半波片,1块直角棱镜和1块全反镜构成。基于文献[15]中的与偏振无关的双向 2×2 光纤光开关,文献[16]又提出了一种 4×4 自由空间光开关的结构设计方法,在一定程度上简化了光开关模块的结构,使其结构紧凑,控制方便。该项工作对于设计和扩展模块化、集成化和规模化的光开关具有重要的指导作用。而本文的工作主要是在此基础上设计和开发了另外一种结构和控制都同样简单,同样方便的 2×2 光开关,它同样具有与偏振无关、双向交换、易集成和易扩展的特点。紧接着设计了由这样的 2×2 光开关构成的与偏振无关的 4×4 自由空间光开关,并对其结构和功能原理进行了详细的讨论,为与之作比较,同时还设计了一种与偏振相关的 4×4 光开关。

2 与偏振无关的双向 2×2 光开关的设计

设计的与偏振无关的双向 2×2 光开关如图1所示。它由4块偏振光分束器(PBS1~PBS4),2块相位型空间光调制器(PSLM1,PSLM2),4块全反射镜(mirror 1~mirror4),2块半波片(HWP1,HWP2)和4块四分之一波片(QWP1~QWP4)构成。相位型空间光调制器(PSLM)在外加电压作用下,它的每个像素处于激活态,可以产生 π 的相位差,设此时状态是“1”;反之,无外加电压时,相位型空间光调制器的每个像素处于非激活态,不产生相位差,状态为“0”。通过对PSLM1和PSLM2上外加电压的控制,可以方便地调整通过各空间光调制器的偏振光的偏振态,从而实现所需的路由,完成特定的信号交换。

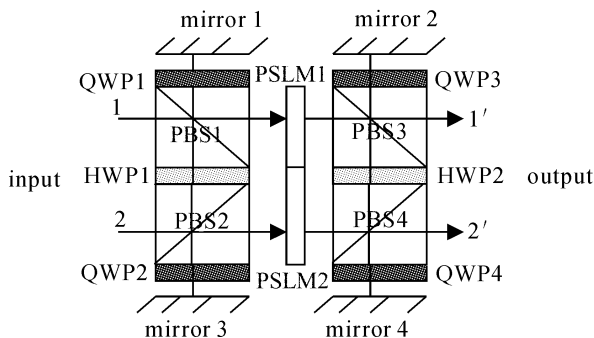


图1 与偏振无关的 2×2 光开关

Fig.1 Polarization-independent 2×2 optical switch

表1为与偏振无关的 2×2 光开关实现直通和交叉功能时PSLM1和PSLM2对应的状态。

表1 与偏振无关的 2×2 光开关状态表
Table 1 State-table of polarization-independent 2×2 optical switch

Input order	PSLM1	PSLM2	Output order
(1 2)	0	0	(1 2)
(1 2)	1	1	(2 1)

2.1 直通功能

进入输入端口1的信号光被PBS1分成两束,即P光和S光。P光直接通过PBS1,水平向右传输到达PSLM1,此时PSLM1的状态为“0”,P光的偏振态保持不变,继续向右传输通过PBS3从输出端口1'射出。同时,S光被PBS1反射向下传输,通过HWP1后其偏振态改变为P,从而直接通过PBS2,继续向下通过QWP2,而被mirror3反射后再一次通过QWP2,这样P光又重新变为S光,被PBS2反射水平向右传输到达PSLM2,此时PSLM2的状态是“0”,因此S光的偏振态保持不变,信号光继续向右传输而被PBS4反射,S信号光竖直向上传输通过HWP2后,S偏振态变为P偏振态,从而直接通过PBS3和QWP3,紧接着被mirror2反射,又再一次通过QWP3,此时P偏振态的信号光被改变为S偏振态,从而被PBS3反射,水平向右传输从输出端口1'射出。由上面的分析可知在输出端口1',信号光的S分量和P分量重新会合,完成了从输入端口1进入的信号光的直通连接。

由于该 2×2 光开关具有对称结构,按照上面同样的分析,从输入端口2进入的信号光被PBS2分成两束,即P光和S光。此时PSLM1和PSLM2的状态均为“0”,P光和S光将沿着各自的路径传输,而最终在输出端口2'重新会合,完成从输入端口2进入的信号光的直通连接。

2.2 交叉功能

从输入端口1进入的信号光被PBS1分成两束,即P光和S光。P光直接通过PBS1后传输到PSLM1,此时PSLM1的状态是“1”,P光变成S光。水平向右传输被PBS3反射后竖直向下传输,通过HWP2后,S光又被转变成P光,因此直接通过PBS4和QWP4,接着被mirror4反射,向上传输,又一次通过QWP4,此时P光变成S光,从而被PBS4反射,水平向右传输,从输出端口2'射出。同时,S光被PBS1反射后,向下传输到HWP1,通过HWP1后S光变成P光,直接通过PBS2和QWP2,然后被mirror3反射,向上传输又一次通

过 QWP2,此时 P 光变成 S 光,被 PBS2 反射,水平向右传输到达 PSLM2,PSLM2 的状态被设置为“1”,因此 S 光又变为 P 光,继续水平向右传输,直接通过 PBS4,从输出端口 2'射出。由上面的分析可知在输出端口 2',信号光的 S 分量和 P 分量重新会合,从而实现了从输入端口 1 进入的信号光从输出端口 2'输出的交叉连接。

同理,从输入端口 2 进入的信号光被 PBS2 分成两束,即 P 光和 S 光。由于 PSLM1 和 PSLM2 的状态被设置为“1”,P 光和 S 光沿着各自的路径传输后,最终将在输出端口 1'重新会合而输出。实现了从输入端口 2 进入的信号光从输出端口 1'输出的交叉连接。

由 2×2 光开关的结构对称性可知,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 2×2 光开关不仅与光信号的偏振态无关,而且具有双向开关的功能。与文献[14]中设计

的 2×2 光开关相比,该光开关的结构更加紧凑,控制更加简单,装配和调试都非常方便。

3 与偏振无关的双向 4×4 光开关的设计

由上面设计的与偏振无关的 2×2 光开关按照一定的规则,通过级连的方式可以构建与偏振无关的双向 4×4 光开关,如图 2 所示。由两块完全相同的与偏振无关的双向 2×2 光开关构成每一节点级,相邻节点级间的连接采用蝶互连的方式。根据光网络与光互连理论可知,对于输入端口数为 N 的光互连网络,要实现所有信道的无阻塞输出,其互连级数 L 应该满足: $L = 2\lg N - 1$ 。当 $N = 4$ 时, $L = 3$,因此该 4×4 光开关的互连级数是 3,它可以完成射入光信号的 $4! = 24$ 种序列的输出与交换。由于它是由上面讨论的 2×2 光开关所构成的,所以它同样具有与偏振无关和双向交换的特点。

通过对各级相位型空间光调整器状态的控制,

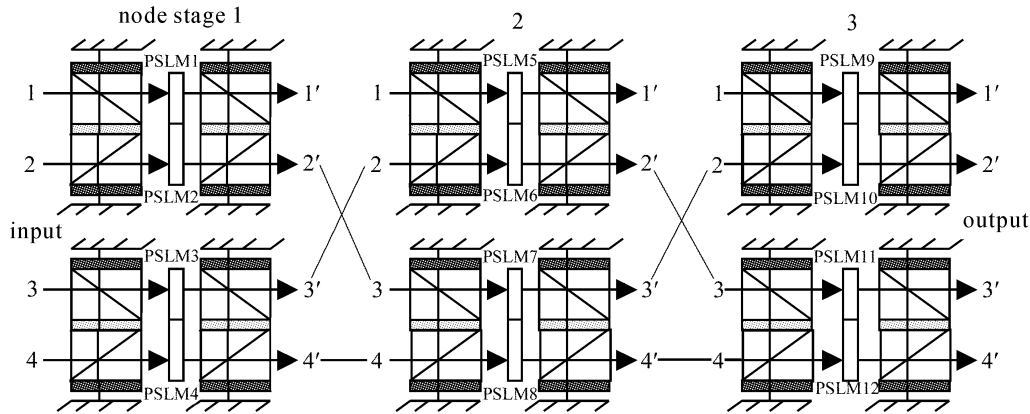


图 2 与偏振态无关的 4×4 光开关

Fig. 2 Polarization-independent 4×4 optical switch

调整通过它的信号光的偏振态以获取所需的选路和路由,从而实现输入信号光的交换和排序。表 2 为与偏振无关的 4×4 光开关路由状态表,从表中可知每一种路径选通都具有两种方式,即可以采取两条不同的路径得到相同的路由。因此该光开关在构建大规模的开关矩阵时可以有效地避免路径的冲突和阻塞。

4 与偏振相关的双向 4×4 光开关的设计

设计并提出了一种与偏振相关的双向 4×4 光

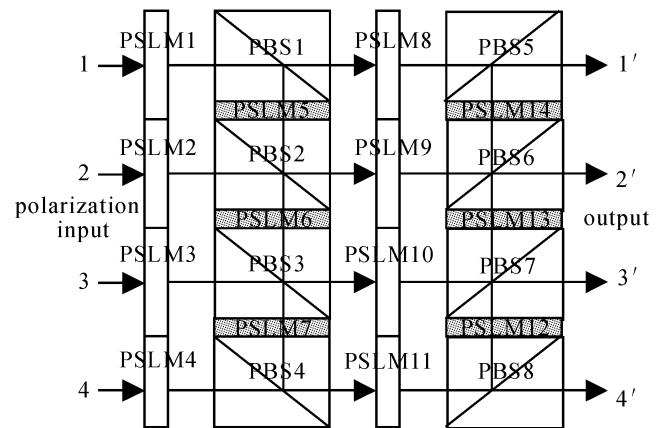


图 3 与偏振相关的 4×4 光开关

Fig. 3 Polarization-dependent 4×4 optical switch

开关的实验模块,如图 3 所示。该实验模块由 8 块偏振光分束器,14 块相位型空间光调制器构成,入射的信号光为 P 偏振光。通过对各相位型空间光调整器状态的控制,调整通过其信号光的偏振态,从而实现所需的交换与排序,因此该开关模块功能的实现与信号光的偏振态有关。另外,由于该实验模块的结构对称,根据光路的可逆性,该模块具有双向交换的功能。表 3 为与偏振相关的 4×4 光开关路由状态表以及各输出端口对应的信号光的偏振态。从表中可知某些端口的信号输出,其对应的路径选

表 2 与偏振无关的 4×4 光开关状态表

Table 2 State-table of polarization-independent 4×4 optical switch

Input port	PSLM												Output port
	Node stage 1				Node stage 2				Node stage 3				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0				0				0				1
	1						0		1				
	0				0				1				2
	1						0		0				
	0				1							0	3
	1						1					1	
	0				1							1	4
	1						1					0	
2	1				0				0				1
	0						0		1				
	1				0				1				2
	0						0		0				
	1				1							0	3
	0						1					1	
	1				1							1	4
	0						1					0	
3			0		1				0				1
			1				1		1				
			0		1				1				2
			1				1		0				
			0		0							0	3
			1				0					1	
			0		0							1	4
			1				0					0	
4			1		1				0				1
			0				1		1				
			1		1				1				2
			0				1		0				
			1		0							0	3
			0				0					1	
			1		0							1	4
			0				0					0	

通方式也不仅仅只有一种,因此该 4×4 光开关在具体的操作过程中同样可以有效地避免路径的冲突,以实现需要的交换。

5 比较与讨论

对与偏振无关的双向 4×4 光开关和与偏振相关的双向 4×4 光开关进行简单的比较与讨论。

1) 表 4 中对两种 4×4 光开关的各项性能指标和功能原理进行了简单的比较。从表中可以看出两种光开关的特点各不相同。与偏振无关的 4×4 光开关最大的特点是:对入射的信号光的偏振态没有要求,而且它的控制非常方便,不过由于它是由 2×2 光开关通过级连的方式构成的,所以信号光的传输延时、交换速度、级间能量损耗以及器件的微型化等问题都必须认真考虑并加以解决。而与偏振相关的 4×4 光开关,它对入射的信号光的偏振态具有选择性和依赖性,其最大的优势就是所需的光电子器件相对较少、集成度高,因此容易扩展成大规模的光开关矩阵。然而,它对信号光偏振态的敏感性以及控制相对复杂等特点也将限制其具体的应用范围。在实际应用中可以根据具体的需要采用不同的光开关。

2) 两种光开关均能实现 4×4 信号光的排序与交换,为了分析方便,只需通过讨论(1 2 3 4)序列的输入信号以满足(3 1 4 2)序列的输出来说明两种光开关的交换过程。其对应的各相位型空间光调制器的状态如表 5 所示。从表中可以看出,与偏振无关的双向 4×4 光开关实现如此操作具有两种路径选通方式,而与偏振有关的 4×4 光开关则只有一种路由选择,而且各输出端口对应的输出光的偏振态各不相同。

6 结 论

首先讨论了由偏振光分束器、相位型空间光调制器、反射镜、半波片和四分之一波片构成的与偏振无关的双向 2×2 光开关,该光开关具有结构紧凑,控制方便、易集成、易扩展的特点。在此基础上设计了由该 2×2 光开关通过级连的方式组成的 4×4 光开关,分析表明这种 4×4 光开关同样具有与偏振无关和可以实现双向交换的功能,通过对其各空间光调制器的控制,调整通过的信号光的偏振态,以实现信号光的路由和交换状态的选择,而且每种交换方式具有一定的简并度,可以有效地避免路径的冲突

表 3 与偏振相关的 4×4 光开关状态表
Table 3 State-table of polarization-dependent 4×4 optical switch

Input port	PSLM														Output polarization	Output port		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
1	0							0							P	1		
	1				0				0					0	S			
	1				1	1				0			0	0				
	1				1	0	1				0	0	0	0				
	1				0				1						P		2	
	1				1	1				0			0		S			
	1				1	0	1				0	1	1					
	1				1	1				1					P			
	2	1				1	0	1				0	0				S	3
		1				1	0	1				1					P	
1					1	0	1				1				S			
1					1	0	1				1							
0									1					0	P	4		
1						0				0			1	1				
1						1	1				0	1	0	1	S			
0									0									
1					0				0			0		P				
1					1	1				0	1	1						
1					0			1						S				
1					1	1				0	0							
3	1				1	1				1					P	4		
	1				1	1				1					S			
			0							1			1	1				
			1				0				0	1	0	1	S			
			0							1			0					
			1				0				0	1	1		P			
			0							0								
4				0							1	1	0	1	S	1		
				0							1	1	1					
				0							1	0			S			
				0							0						P	

表 4 偏振相关与偏振无关的 4×4 光开关的比较
Table 4 Comparison of polarization-dependent and polarization-independent optical switch

Items	Polarization-independent 4×4 optical switch	Polarization-dependent 4×4 optical switch
Signal beam	Polarization-independent	Polarization-dependent
Directionality	Bidirectional operation	Bidirectional operation
Structural characteristic	Compact and easy to integrate	Very compact and easy to integrate
Control	Very feasible and flexible	Relatively feasible and flexible
Scalable	Easy to extend	Rather easy to extend
Element	Phase spatial light modulator, polarizing beam-splitter, mirror, half-wave plate and quarter-wave plate	Phase spatial light modulator polarizing beam-splitter
Operational principle	Routing and switching can be accomplished based on phase spatial light modulator to control the polarization of signal beams	

表 5 偏振相关与偏振无关的 4×4 光开关实现光交换的状态表

Table 5 State-table of polarization-dependent and polarization-independent optical switch performing optical transform

Input port	PSLM												Output port				
	Node stage 1				Node stage 2				Node stage 3								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
(1 2 3 4)	0				1				0				1				(3 1 4 2)
	1				0				1				0				

(a) State-table of polarization-independent optical switch

Input port	PSLM														Output polarization	Output port
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
(1 2 3 4)	1	1	0	0	0	1	1		1	1	1	0	1	1	(S P S P)	(3 1 4 2)

(b) State-table of polarization-dependent optical switch

与阻塞。与该 4×4 光开关不同的是,还设计并提出了一种与偏振相关的双向 4×4 光开关,它的结构更加紧凑,更有利于集成和扩展。对这两种 4×4 光开关的性能参数的比较可知,它们各有优势,根据各自的特点将有不同的用处。

参 考 文 献

- Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of 1×N optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):152~157
任海霞,刘立人,宋哲等.晶体的连续双折射双反射及其集成应用:1×N 电光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):152~157
- Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Research of optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):423~426
黄勇林,董兴法,李杰等.基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):423~426
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 silicon-on-insulator multimode interference optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1208~1213
贾晓玲,高凡,张峰.新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关的优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1208~1213
- Wang Zhangtao, Fan Zhongchao, Xia Jinsong *et al.*. Design and fabrication of thermo-optic 4×4 switching matrix in silicon-on-insulator [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, **25**(12):1573~1575
王章涛,樊中朝,夏金松等. SOI 热光 4×4 光开关阵列的研制[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(12):1573~1575
- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):137~140
杨建义,江晓清,杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):137~140
- Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Peiqiang *et al.*. The test and analysis for thermo-optic effect of silicon resin [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):629~632
张小康,廖常俊,刘沛强等. 硅树脂材料热光特性的测试与分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):629~632
- Liang Hongjun, Zhang Xingshe. MEMS and MEMS optical switch [J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(1):60~62
梁宏军,张兴社. MEMS 与 MEMS 光开关[J]. *应用光学*, 2005, **26**(1):60~62
- Teck Yoong Chai, Tee Hiang Cheng, Sanjay K. Bose *et al.*. Array interconnection for rearrangeable 2-D MEMS optical switch [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5):1134~1140
- Herzel Laor. MEMS mirrors application in optical cross-connects [C]. *IEEE LEOS Summer Topical Meetings: Optical MEMS*, Monterey, CA, 1998. 20~22
- Michael S. Borella, Jason P. Jue, Dhritiman Banerjee *et al.*. Optical components for WDM lightwave networks [C]. *Proc IEEE*, 1997, **85**(8):1274~1307
- C. Gonzalez, S. D. Collins. Micromachined 1×N fiber optic switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(5):616~618
- N. A. Riza, D. L. Polla. Micromachined fiber optic switch for optical networks [C]. *SPIE*, 1993, **1793**:108~126
- D. O. Culverhouse, R. I. Laming, S. G. Farwell *et al.*. All fiber 2×2 polarization insensitive switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4):455~457
- N. A. Riza, S. Yuan. Low optical interchannel crosstalk, fast switching speed, polarisation independent 2×2 fibre optic switch using ferroelectric liquid crystals [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13):1341~1342
- Luo Fengguang, Cao Mingcui, Xu Jun *et al.*. A 2×2 polarization-independent bidirectional fiber optical switch [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(10):1058~1060
罗风光,曹明翠,徐军等. 与偏振无关的双向 2×2 光纤光开关[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(10):1058~1060
- Luo Fengguang, Cao Mingcui, Xie Hu *et al.*. 4×4 free-space optical switch structure and its matrix analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12):1677~1682
罗风光,曹明翠,谢胡等. 4×4 自由空间光开关结构及其矩阵分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12):1677~1682