

文章编号: 0253-2239(2007)09-1593-7

与偏振无关双向 2×2 和 4×4 自由空间光开关

杨俊波 苏显渝

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 利用成熟的偏振控制技术,设计了一种由偏振光分束器、相位型空间光调制器和反射镜构成的 2×2 光开关,该光开关所用器件少,具有结构简单紧凑、控制灵活方便、功能实现与信号光的偏振态无关以及可以双向交换等特点;在此基础上通过 2×2 光开关的串连,设计了一种与偏振无关的双向 4×4 光开关的实验模块,根据其路由选择与控制方法,得到了 4×4 光开关实现信号光全排列无阻塞输出与交换对应的路由状态表,并对该实验模块的功能实现进行了详细的分析与讨论。

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: TN253 文献标识码: A

Polarization-Independent Bidirectional 2×2 and 4×4 Free-Space Optical Switch

Yang Junbo Su Xianyu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: A novel 2×2 optical switch is proposed with conventional polarization controlling technology by using phase spatial-light modulator (PSLM), polarized beam splitter (PBS) and mirror. This new kind optical switch grants the features of less optical components, compact structure, efficient performance, convenient control and function insensitive to polarization of signal beam. In addition, the straight and the exchange functions of 2×2 optical switch are implemented bidirectionally in free-space. Furthermore, a new optical experimental module of 4×4 optical switch is presented by cascading polarization-independent bidirectional 2×2 optical switch. Moreover, the routing state table of 4×4 optical switch to perform all-permutation output and nonblocking switch for the input signal beams, is achieved by choosing and controlling routing. Finally, the function properties and operational process of 4×4 optical switch are discussed in detail.

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

1 引 言

光开关在全光通信中具有重要的作用^[1~5],它可以实现信号光的通断、系统保护倒换与监测、信号光路由与波长选择、光交叉连接(OXC)与光分插复用(OADM)以及自愈等功能。根据光开关的设计原理、交换速度、粒度、带宽以及串扰等指标的不同,可以分为:电光^[6,7]、磁光^[8]、热光^[9~11]和机械式开关^[12~14]。文献^[5]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,由于其采用的光学元件太多,结构过于复杂,光学调试和控制都不方便,因此不利于光电集成构建大规模的开关矩阵。针对

该问题,文献^[15]设计了一种新的与偏振无关的双向 2×2 光纤光开关,它的结构设计以及操作控制都相对简单和灵活。基于同样的设计方法和控制原理,文献^[16]提出了一种 4×4 自由空间光交换模块,它在一定程度上进一步简化了自由空间光交换模块的设计结构,使其设计更加合理,结构更加紧凑,而控制更加方便。该项工作对于自由空间光开关的模块化、集成化和规模化设计具有重要的指导作用。本文在此基础上设计了另外一种结构和控制都非常简单和方便的 2×2 光开关,它同样具有与偏振无关、双向交换、易集成和可扩展的特点。并设计

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等方面的研究。

E-mail: yangjunbo008@sohu.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感技术方面的研究。

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

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-03-21

了由这样的 2×2 光开关通过串联方式构成的与偏振无关的双向 4×4 自由空间光开关。

2 与偏振无关的双向 2×2 光开关的设计

2×2 光开关是光纤通信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。与偏振无关的双向 2×2 光开关如图 1 所示。它由 2 块偏振光分束器 (PBS1 和 PBS2)、2 块相位型空间光调制器 (PSLM1、PSLM2)、4 块全反射镜 (Mirror1~Mirror4) 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,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,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,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。

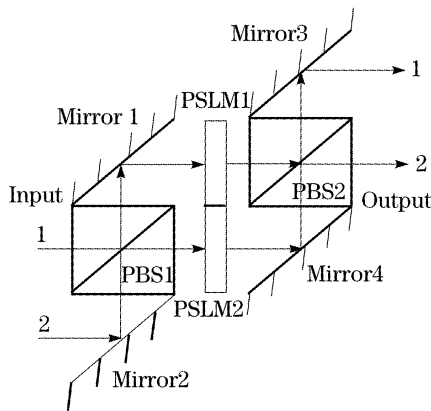


图 1 与偏振无关的双向 2×2 光开关

Fig. 1 Polarization-independent bidirectional 2×2 optical switch

表 1 为与偏振无关双向 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 与偏振无关的双向 2×2 光开关状态表

Table 1 State table of polarization-independent bidirectional 2×2 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,向上传输又被反射镜 Mirror1 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,继而被 Mirror3 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 Mirror4 反射,向上传输直接通过 PBS2 后,又被 Mirror3 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,对于输入端口 2 的信号光,首先被 Mirror2 反射,继而也被 PBS1 分成 s 光和 p 光分量。其中, p 光分量通过 PBS1 后被 Mirror1 反射,到达 PSLM1,此时 PSLM1 的状态被设置为“0”,p 光保持偏振态不变,向右传输直接通过 PBS2,从输出端口 2 输出;而 s 光被 PBS1 反射后,向右传输到达 PSLM2,由于 PSLM2 的状态是“0”,因此 s 光保持偏振态不变,继续向右传输被 Mirror4 反射后,又被 PBS2 反射,从输出端口 2 输出。由此可知,输入端口 2 信号光的 s 光和 p 光分量,通过各自的路径后,最终在同一输出端口 2 会合,完成了从输入端口 2 进入的信号光从输出端口 2 输出的直通连接。由上面的分析可知,当 PSLM1 和 PSLM2 的状态均被设置为“0”时该 2×2 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 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 Mirror1 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 Mirror4 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,对于输入端口 2 的信号光,首先被 Mirror2 反射,继而也被 PBS1 分成 s 光和 p 光分量。其中, p 光分量通过 PBS1 后被 Mirror1 反射,到达 PSLM1,此时

PSLM1 的状态被设置为“1”，p 光被改变为 s 光，向右传输被 PBS2 反射后又被 Mirror3 反射，从输出端口 1 输出；而 s 光分量被 PBS1 反射后，向右传输到达 PSLM2，由于 PSLM2 的状态是“1”，因此 s 光变成 p 光，继续向右传输被 Mirror4 反射后，向上传输直接通过 PBS2，被 Mirror3 反射后从输出端口 1 输出。由此可知，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。由上面的分析可知，当 PSLM1 和 PSLM2 的状态均被设置为“1”时该 2×2 光开关实现交叉功能，而且该光开关功能的实现与信号光的偏振态无关。

由 2×2 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 2×2 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。与文献[5]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，装配和调试更加方便。

3 与偏振无关双向 4×4 光开关的设计

采用与偏振无关双向 2×2 光开关同样的设计方法，构建与偏振无关的双向 4×4 光开关，如图 2 所示。

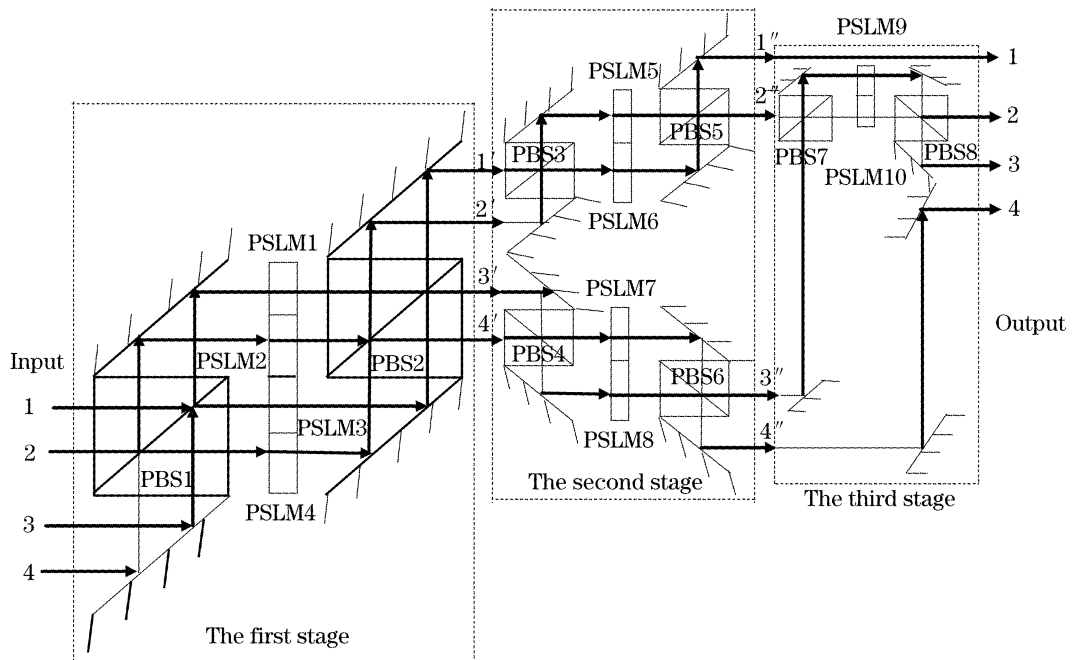


图 2 与偏振态无关的双向 4×4 光开关

Fig. 2 Polarization-independent bidirectional 4×4 optical switch

该 4×4 光开关由三级模块构成，每级模块均采用同样的设计和相同的偏振控制技术，只不过由于此时输入输出信道数为 4，因此对应的相位型空间光调制器的数目也相应增加。该 4×4 光开关要实现信号光 $4! = 24$ 种全排列无阻塞的输出与交换，各级模块所实现的功能各不相同。

第一级模块采用与上文 2×2 光开关同样的结构，相位型空间光调制器增加为 4 块。利用各空间光调制器对信号光偏振态的控制，实现所需的路由和交换。其中，第 1 和第 3 输入端口间的信号光实现直通或交叉变换，第 2 和第 4 输入端口间的信号光也可实现直通或交叉互换。第一级模块完成第 1、3 和第 2、4 输入端口间信号光的直通或交叉连接功能，对应的各相位型空间光调制器的状态如表 2

所示。由此可知，该级模块只能实现输入信号光 4 种序列的输出，该模块同样具有与信号光偏振态无关和可双向动作的特点，其工作原理和操作过程同上文所述。

表 2 第一级模块对应的状态表

Table 2 State-table of the first stage module

Input port	PSLM				Output port
	1	2	3	4	
(1 2 3 4)	0	0	0	0	(1' 2' 3' 4')
	0	1	0	1	(1' 4' 3' 2')
	1	0	1	0	(3' 2' 1' 4')
	1	1	1	1	(3' 4' 1' 2')

在第一级模块的第 1'、2' 和第 3'、4' 输出端口处分别串联上一个 2×2 光开关，则得到了第二级模块。该级模块可以实现两相邻输入端口，即第 1' 和

第 2' 输入端口,第 3' 和第 4' 输入端口间信号光的直通或交叉互换。其实现信号光的直通或交叉连接所对应的各相位型空间光调制器的状态如表 3 所示。

表 3 第二级模块对应的状态表

Table 3 State-table of the second stage module

Input port	PSLM				Output port
	5	6	7	8	
(1' 2' 3' 4')	0	0	0	0	(1'' 2'' 3'' 4'')
	0	0	1	1	(1'' 2'' 4'' 3'')
	1	1	0	0	(2'' 1'' 3'' 4'')
	1	1	1	1	(2'' 1'' 4'' 3'')

由此可知,该级模块同样利用各空间光调制器对信号光偏振态的控制,实现信号光所需要的路由和交换。与第一级模块实现第 1,3 和第 2,4 输入端口间信号光的直通或交叉互换不同,该级模块是实现相邻输入端口间信号光的直通或交叉连接。该模块同样具有与信号光偏振态无关和可双向动作的特点,其工作原理和操作过程同上。

按照同样的操作,在第二级模块的第 2'',3'' 输出端口串联一上面讨论的 2×2 光开关,则得到第三级模块。该模块通过相位型空间光调制器 PSLM9 和 PSLM10 对信号光偏振态的控制,可以完成输入端口 2'' 和 3'' 间信号光的直通或交叉互连,而输入端口 1'' 和 4'' 处的信号光直接通过,分别从输出端口 1 和 4 输出。因此,该模块同样具有与信号光偏振态无关和可双向工作的特点,其实现信号光的直通或交叉连接所对应的各相位型空间光调制器的状态如表 4 所示。

由上面对 4×4 光开关三级子模块的讨论可知,这三级子模块分别完成:输入端口序号为 1 和 3,2 和 4 的信号光的直通或交叉互换;输入端口序号为 1' 和 2',3' 和 4' 信号光的直通或交叉互换;输入端口

序号为 2'' 和 3'' 的信号光的直通或交叉互换。按照这样的三级模块的操作和变换,该 4×4 光开关最终能够实现输入信号光 4! 种序列的无阻塞输出或交换。需要注意的是,这三种变换操作的先后次序并不重要,只要输入信号光依次通过这三种操作,即可实现所需的交换。也就是说,这三级子模块在 4×4 光开关中的先后位置并不重要,其结构具有对称性,输入输出端以及中间级模块相互间位置的互换并不影响该光开关功能的实现。由于各级子模块的结构和功能单元均相同,路由控制也都一样,因此,该 4×4 光开关不仅具有与信号光偏振态无关和可双向工作的特点,而且还体现出了其设计的灵活性和操作控制的便利。

表 4 第三级模块对应的状态表

Table 4 State-table of the third stage module

Input port	PSLM		Output port
	9	10	
(1'' 2'' 3'' 4'')	0	0	(1 2 3 4)
	1	1	(1 3 2 4)

4 与偏振无关双向 4×4 光开关的路由控制

根据 4×4 光开关结构对称的特点,从输入端口和输出端口同时进行路由控制操作。设输入端口序号为 1,2,3,4。经过 4×4 光开关后输出端口序号为 A,B,C,D,其中 A,B,C,D 分别取 1,2,3 和 4。信号光 1,2,3,4 通过第一级子模块后,在其输出端口能够得到 4 种序列的输出;该 4 种序列的信号光再通过第二级子模块后,在第二级子模块的输出端口又可以得到 16 种序列。同时,4×4 光开关的输出端口(即第三级子模块的输出端口)序号为 A,B,C,D 的信号光,在第三级子模块的输入端口应该存

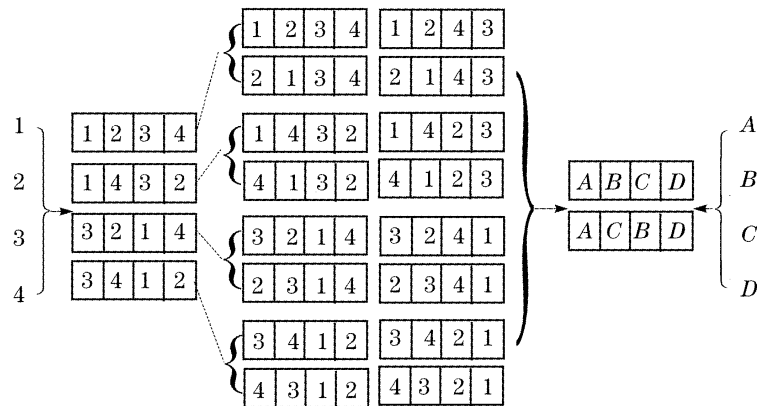


图 3 4×4 光开关路由操作

Fig. 3 Routing operation of 4×4 optical switch

在两种序列的输入信号光,即 A,B,C,D 序列信号光或 A,C,B,D 序列信号光。这两种序列应该:或都包含在第二级子模块输出端口的 16 种序列中,则说明这种变换操作具有两种路由控制,即输入信号光可以通过两条路径实现所需要的变换操作;或两种序列之一包含在第二级子模块输出端口的 16 种序列中,则说明这种变换操作只有一种路由控制,即只有一条路径可以实现该变换操作。按照这样的操作我们就可以依次确定第三级、第二级和第一级子模块中各相位型空间光调制器对应的状态,操作过程如图 3 所示。

表 5 4×4 光开关路由状态表Table 5 Routing state table of 4×4 optical switch

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

据此,可以得到与偏振无关的双向 4×4 光开关实现信号光全排列无阻塞输出与交换所对应的各相位型空间光调制器的状态,如表 5 所示。

如表 5 所示,根据各相位型空间光调制器的状态,调整信号光的偏振态,从而实现所需的路由和交换。由于各级子模块的结构和功能单元都基本一样,因此信号光的路由控制就显得非常方便和简单。而且,由于某些序列信号光的输出还存在两种路由控制,即信号光可以通过两条不同的路径实现相同的交换,因此,该 4×4 光开关在实现信号光的全排列输出与交换时,可以根据实际的硬件成本、时间代价、光能量损耗等因素,合理选择路由控制和信号光路径,有效避免信号光的冲突与阻塞,最终完成信号光所需要的排列与交换。

5 实验测试与比较

对于上文设计的 2×2 光开关单元,对其插入损耗、串扰、回波损耗等参量进行初步实验检测。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 dB 左右,插入损耗小于 1.5 dB,阈值电压大概为 4~4.5 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 π 的相位差,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,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,因此不改变通过它的偏振光的偏振态。偏振光分束器的参量为:对于 p 光,对比度 $I_s = -30$ dB,透过率大约是 96.8%;对于 s 光,对比度 $I_p = -30.2$ dB,反射率大约为 96.2%。

以 1550 nm 波长作为信号光源,采用截断法进行测量,测得 2×2 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 6 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,就目前而言可以到达毫秒级。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, 2×2 光开关的偏振相关损耗在 0.242~0.368 dB 之间,这说明该光开关的偏振相关损耗相对较小。表 7 为本文设计的 2×2 光开关与文献[5, 17]中 N. A. Riza 和 Pierpaole Boffi 等提出的方法进行简单比较。

表 6 实验结果

Table 6 Experimental results (operating wavelength: 1550 nm)

Function		PSLM1	PSLM2	Interchannel crosstalk /dB	Insertion loss /dB	Return loss /dB	Driving power /V
Straight state	1-1	0	0	-50.28	0.82	-43.26	4-4.5
	2-2			-48.22	0.91	-45.08	
Exchanging state	1-2	1	1	-46.16	0.86	-41.34	
	2-1			-48.38	0.95	-42.51	

表 7 相关光开关性能的比较

Table 7 Comparison with corresponding optical switch

Items	N. A. Riza	Pierpaole Boffi	This paper
Crosstalk	relatively low	relatively low	low
Insertion loss	relatively low	relatively low	low
PDL	low	low	very low
Switching speed	quick	quick	relatively quick
Structural characteristic	un-compact and difficult to integrate	un-compact and difficult to integrate	compact and easy to integrate
Control	relatively feasible and flexible	relatively feasible and flexible	very feasible and flexible
Scalable	difficult to extend	difficult to extend	easy to extend
Cost	high	high	low

从表 6 和表 7 中可看出,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 2×2 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,因此在下一阶段对于 4×4 光开关性能参数的测试过程中,通过选择消光比好,插损小的相位型空间光调制器和偏振光分束器,精密控制各光学元件的对位、装配、调试和封装,将有效提高各单元器件间的耦合效率和减小光能量的损耗,从而提高 2×2 和 4×4 光开关的实用性。

6 结 论

初步的实验检测表明 2×2 光开关具有插入损耗小、串扰低、结构紧凑、控制方便、易集成和可扩展等特点。在此基础上设计了由该 2×2 光开关通过串连的方式组成的 4×4 光开关,它由三级子模块构成,每级子模块完成的交换功能各不相同,信号光依次通过三级子模块,在各级相位型空间光调制器的控制下,完成最终的路由和交换输出。这种 4×4 光开关同样具有与偏振无关和可实现双向交换的特点,其结构设计具有对称性,各级子模块的空间位置可任意互换。同时,各级子模块采用相同结构的单元,因此其路由控制和操作方法均一样。理论分析表明与偏振无关的双向 4×4 光开关完全能够

实现输入信号光全排列无阻塞的输出与交换。

参 考 文 献

- 1 M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee *et al.*. Optical components for WDM lightwave networks [C]. *Proc IEEE*, 1997, **85**(8): 1274~1307
- 2 C. Gonzalez, S. D. Collins. Micromachined $1 \times N$ fiber-optic switch[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(5): 616~618
- 3 N. A. Riza, D. L. Polla. Micromachined fibre optic switch for optical networks[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1793**: 108~126
- 4 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
- 5 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
- 6 Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of $1 \times N$ optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 152~157 (in Chinese)
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: $1 \times N$ 电光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 152~157
- 7 Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Research of optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 423~426 (in Chinese)
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
- 8 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 (in Chinese)
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
- 9 Wang Zhangtao, Fan Zhongchao, Xia Jinsong *et al.*. Design and

- fabrication of thermo-optic 4×4 switching matrix in silicon-on-insulator[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1573~1575
- 10 Yang Jianyi, Jian Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140 (in Chinese)
杨建义, 江晓清, 杨方辉 等. 2×2 有机聚合物热的全内反射型光光开关[J]. 中国激光, 2003, **30**(2): 137~140
- 11 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 (in Chinese)
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
- 12 Yuan Ye, Zou Yongzhuo, Bao Junfeng *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system (MEMS)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 364~368 (in Chinese)
袁野, 邹勇卓, 鲍俊峰 等. 一种新型微机电系统可调光衰减器[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 364~368
- 13 Teck Yoong Chai, Tee Hiang Cheng, Sanjay K. Bose *et al.*. Array interconnection for rearrangeable 2-D MEMS optical switch [J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(5): 1134~1140
- 14 H. Laor. MEMS mirrors application in optical cross-connects [C]. *IEEE LEOS Summer Topical Meetings: Optical MEMS*, Monterey, CA, 1998. 20~22
- 15 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 (in Chinese)
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
- 16 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
- 17 Pierpaolo Boffi, Davide Piccinin, Andrea Tonini *et al.*. Polarization-independent bidirectional optical switch for communication signals, in optics in computing[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4089**: 297~303

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80% 优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn