

文章编号: 0253-2239(2007)07-1279-6

# 与偏振无关的双向 $3 \times 3$ 光开关结构设计

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:** 利用传统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、反射镜和四分之一波片构成的  $3 \times 3$  光开关。该光开关具有结构紧凑规整、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。根据其路由控制表对该  $3 \times 3$  光开关交换模块功能的实现进行了分析,结果表明,通过对各相位型空间光调制器状态的调整,控制通过其信号光的偏振态,完成信号光的路由,该交换模块可以完成输入信号光的全排列无阻塞输出与交换。同时,该交换模块具有一定的扩容和重构能力,对于构建大规模的交换矩阵具有一定的作用。

**关键词:** 光通信; 光开关; 偏振光分束器; 相位型空间光调制器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Polarization-Independent Bidirectional $3 \times 3$ Optical Switch

Yang Junbo Su Xianyu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract:** Based on the conventional polarization-control technology, a novel  $3 \times 3$  optical switch, consisting of phase spatial light modulator (PSLM), polarizing beam splitter, mirror, and quarter-wave plate, is proposed. This new configuration of the optical switch grants the features of compact in structure, efficient in performance, and insensitive to polarization of signal beam. In addition, the functions of  $3 \times 3$  optical switch are implemented bi-directionally in free-space. According to the routing state table of polarization-independent  $3 \times 3$  optical switch, its operational process is analyzed. By modulating PSLMs and controlling the polarization state of signal, the signal routing is realized, and the switching module of  $3 \times 3$  optical switch can realize arbitrary port output and exchange for any port input beams without routing conflict. The module has the capability of expansion and reconfiguration. Therefore, it is helpful in the design of large-scale switch matrix.

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

## 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。特别是随着密集波分复用(DWDM)技术在光通信骨干网的普及和发展,在光波密集波分复用基础上组建全光传输网是通信技术发展的必然。光开关是密集波分复用光网络中实现全交叉连接(OXC)、光分插复用(OADM)和自愈保护等功能的关键器件,在光信息处理、光计算机以及仪器仪表和

传感器等方面也有广泛的用途。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<sup>[1,2]</sup>、磁光开关<sup>[3]</sup>、热光开关<sup>[4~6]</sup>和机械式开关<sup>[7~9]</sup>等。国内外的学者对此问题进行了大量的有意义的研究,提出了许多实现光信号交换的方法<sup>[10~16]</sup>。由于  $2 \times 2$ 、 $4 \times 4$  等开关单元结构的对称性,它们具有很强的扩展性和重构能力,可以通过级连的方式组成大端口大容量的交换矩阵。因此很多的文献都是围绕偶数端口的交换单元进行讨论,对

作者简介: 杨俊波(1974—),男,四川西昌人,博士研究生,主要从事信息光学和光通信方面的研究。

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: 2006-10-16; 收到修改稿日期: 2007-01-23

于奇数端口的光开关的讨论还不是太多。在文献[3,17,18]中,作者设计了基于绝缘体基 Si 波导材料的  $3 \times 3$  多模干涉耦合器(MMI)波导光开关和  $3 \times 3$  平行排列耦合器全光开关。这些光开关的设计方法合理,结构紧凑,功能也较为优越。不过,它们主要是利用绝缘体基 Si 波导材料的自镜像效应或光纤环路的非线性效应实现开关动作,因此对器件或材料的性能和相关控制的要求都很高。而本文主要利用传统的已经很成熟的对信号光的偏振态控制技术,通过偏振光分束器、相位型空间光调制器等单元器件的集成,构建  $3 \times 3$  的交换开关。在自由空间实现信号光的交换与排序,而且该交换开关具有与偏振无关,可双向动作等特点。

## 2 与偏振无关的双向 $3 \times 3$ 光开关的设计

与偏振无关的双向  $3 \times 3$  光开关如图 1 所示。它由 9 块偏振光分束器(PBS1~PBS9),12 块相位型空间光调制器(PSLM1~PSLM12),6 块全反射镜(Mirror1~Mirror6)和 6 块四分之一波片(QWP1~QWP6)构成。偏振光分束器反射 s 光而让 p 光通过。相位型空间光调制器在外加电压作用下,空间光调制器的每个像素处于激活态,可以产生  $\pi$  的相位差,设此时状态是“1”;反之,无外加电压时,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”。通过对各相位型空间光调制器上外加电压的控制,可以方便的调整通过其偏振光的偏振态,从而实现所需的路由,完成特定的信号交换。

是 3,因此其完全交换(或排列)数是  $3! = 6$ 。表 1 为与偏振无关的  $3 \times 3$  光开关各输入端口实现任意端口输出时,各相位型空间光调制器对应的状态。

表中的空格处表示光信号在传输过程中没有经过这个相位型空间光调制器,因此不用考虑它们所处的状态。由表 1 可知,根据对各空间光调制器的状态的调整,该  $3 \times 3$  光开关模块可以实现信号光任意端口的输出,而且有些端口的输出还存在一定的简并度,即从该端口输出的信号光的路径选通方式不只一种,这样可以有效的避免路径的冲突或阻塞。不过从实际应用的角度考虑,路径冲突的避免往往是以延长信道路径、牺牲交换时间和增加参与工作的单元器件为代价的,因此在实际的应用过程中,必须权衡各方面的影响,以实现最低成本和最优路径的选择。下面对该  $3 \times 3$  光开关的功能原理进行分析。

信号光在输入端口处被偏振光分束器分成两束,即 s 光和 p 光。其中 p 光直接通过该偏振光分束器,而 s 光则被反射。s 光和 p 光沿着各自的传输通道,在所经过路径上对应的相位型空间光调制器的控制下,其偏振态发生或保持不变,最终 s 光和 p 光在同一输出端口处重新会合。因此该交换开关具有偏振无关的特性。注意,虽然同一输入端口信号光的 s 光分量和 p 光分量经历了不同的路径后,均将在同一输出端口处会合,不过,此时输出端口对应的 s 光或许是输入处对应的 s 光,也有可能是输入端口处对应的 p 光分量(偏振态经历了一系列的改变),对于 p 光也是如此。反射镜和四分之一波片的作用是通过二者的联合使用,改变入射的信号光的偏振态,实现路径的重新选择。另外,该  $3 \times 3$  光开关交换模块的整体设计具有对称性,因此该交换开关具有双向交换的特点。

由表 1 可以得到该  $3 \times 3$  光开关交换模块实现 6 种全交换所对应的各相位型空间光调制器的状态,如表 2 所示。

由于进入各输入端口的信号光都被对应的偏振光分束器 PBS1、PBS2 或 PBS3 分成 s 光和 p 光分量,各分量沿着各自的信号通道传输,在所经路径的各相位型空间光调制器的控制下,其偏振态保持或被改变,最终同一输入端口的两分量都到达同一输出端口。由此可知,在整个交换模块里面,应该同时存在 6 条互相独立的信号光传输通道(或路径),因此必须精确的控制每一块参与工作的空间光调制器的状态,以避免路径的冲突与阻塞。

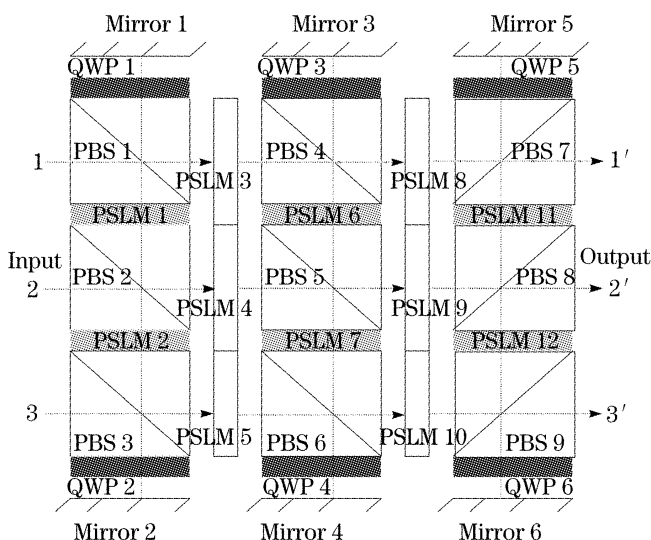


图 1 与偏振无关的  $3 \times 3$  光开关

Fig. 1 Polarization-independent  $3 \times 3$  optical switch

对于  $3 \times 3$  的交换开关,由于其输入输出端口数

表 1 与偏振无关 3×3 光开关状态表  
Table 1 State table of polarization-independent 3×3 optical switch

Input port	Phase spatial light modulator												Output port
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0	0	0	1				0	1		0	0	1'
	0	0	0	0			0	0		0	1	1	
	0	0	0	1		0	1	0	1	0	1	1	
	0	0	0	0		1	0	1	0	0	1	1	2'
	0	0	1	0		0	0		1	0	0	0	
	0	0	1	1		1	1		0	0	0	0	
	0	0	1	1		0	1	0	1	0	1	0	
	0	0	1	1		0	1	0	0	0	1	0	
	0	0	1	1		1	1		0	0		0	
	0	0	1	1		1	1	0	1	0	1	0	
0	0	0	0			0	1		1	0	0		
2	0	0		0	0	0	0	1	1		0		1'
	0	0		1	0	0	0	1		0	1	1	
	0	0		0	1				0	1		0	2'
	0	0		0	1	1		0	1	1	1	0	
	0	0		1	0	0	0	0		1	0	0	
3	0	0	1		0			0		1	1	1	1'
	0	0	1		0	1		1	0	1	1	1	
	0	0	0		1	0	0	1	0		0		2'
	0	0	0		0	0			1	1		0	
	0	0	1		0			1		0	0	0	

表 2 与偏振无关 3×3 光开关实现全交换对应的状态表  
Table 2 State table of polarization-independent 3×3 optical switch performing full permutations

Input port	Phase spatial light modulator												Output port
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
(1 2 3)	0	0	0	1	1			0	1	1	0	0	(1' 2' 3')
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	(1' 3' 2')
	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	(2' 1' 3')
	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	(2' 3' 1')
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	(3' 1' 2')
	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	(3' 2' 1')

### 3 3×3 光开关的工作原理与操作过程

由上面的讨论可知,与偏振无关的双向 3×3 光开关可以实现输入信号光的全排列无阻塞输出与交换,现在以该光开关实现(1 2 3)输入到(2' 1' 3')序列的输出为例,详细分析与讨论模块的工作原理和操作过程。

信号光 1 被 PBS1 分成两束,即 s 光和 p 光,其中 p 光直接通过 PBS1,此时 PSLM3 的状态是“1”,p 光变为 s 光,被 PBS4 反射,向下传输到达 PSLM6,而此时 PSLM6 的状态被设置为“0”,因此 s 光偏振态不发生改变,从而被 PBS5 反射,向右传

输到达 PSLM9,PSLM9 的状态是“1”,s 光变为 p 光,直接通过 PBS8,从端口 2' 输出,输出光是 p 偏振光。同时,s 光分量被 PBS1 反射后,由于 PSLM1 的状态是“0”,s 光偏振态不发生改变,因此被 PBS2 反射,向右传输到达 PSLM4,此时 PSLM4 的状态是“0”,s 光保持不变而被 PBS5 反射,向下传输到达 PSLM7,而 PSLM7 的状态为“0”,s 光分量偏振态不发生改变,而直接被 PBS6 反射,向右传输到达 PSLM10,此时 PSLM10 的状态被设置为“0”,s 光保持偏振态不变,被 PBS9 反射,向上传输到达 PSLM12,而 PSLM12 的状态是“0”,因此 s 光的偏

振态保持不变,而直接被 PBS8 反射,从端口 2' 输出,输出光显然为 s 光。由此可知,信号光 1 的 s 光和 p 光分量在输出端口 2' 处重新会合,因此该交换开关与信号光的偏振态无关。

信号光 2 被 PBS2 也分成 s 光分量和 p 光分量。其中 p 光通过 PBS2 后,到达 PSLM4,此时 PSLM4 的状态是“0”,p 光的偏振态不发生改变,因此向右传输而直接通过 PBS5,到达 PSLM9,而此时 PSLM9 的状态为“1”,p 光变为 s 光,从而被 PBS8 反射,向上传输到达 PSLM11,而 PSLM11 的状态为“0”,s 光被 PBS7 反射,从端口 1' 输出,输出光是 s 偏振光。同时,信号光 2 的 s 光分量被 PBS2 反射后,向下传输到达 PSLM2,而 PSLM2 的状态是“0”,s 光保持偏振态不变而被 PBS3 反射,向右传输到达 PSLM5,此时 PSLM5 的状态被设置成“0”,s 光偏振态继续不变,接着被 PBS6 反射,向下传输通过 QWP4,被 Mirror4 反射后再一次通过 QWP4,因此 s 光被变为 p 光,向上传输直接通过 PBS6,由于 PSLM7 和 PSLM6 的状态都是“0”,因此 p 光保持偏振态不变,依次通过 PSLM7、PBS5、PSLM6 和 PBS4,然后继续向上传输通过 QWP3 后被 Mirror3 反射,从而再一次通过 QWP3,所以 p 光变为 s 光,而被 PBS4 反射,向右传输到达 PSLM8,此时 PSLM8 的状态是“1”,s 光又变成 p 光,直接通过 PBS7,从端口 1' 输出,输出光为 p 偏振光。这样,信号光 2 的 s 光和 p 光分量在输出端口 1' 处重新会合,此时输出端口的 s 光其实对应的是输入端口的 p 光,而输出端口的 p 光则对应的是输入端口的 s 光分量。

信号光 3 被 PBS3 分成 s 光分量和 p 光分量后,s 光被 PBS3 反射,向下传输通过 QWP2 后被 Mirror2 反射,又一次通过 QWP2,因此 s 光变为 p 光,直接通过 PBS3,由于 PSLM2、PSLM1 的状态均是“0”,因此 p 光依次通过 PBS2 和 PBS1,再通过 Mirror1 的反射而两次通过 QWP1 后,p 光被转变成 s 光,从而被 PBS1 反射,s 光到达 PSLM3,此时 PSLM3 的状态是“1”,所以 s 光又变成 p 光,向右传输直接通过 PBS4,到达 PSLM8,而 PSLM8 的状态是“1”,p 光变成 s 光,而直接被 PBS7 反射,向上传输通过 QWP5 后被 Mirror5 反射,再一次通过 QWP5,s 光又变成 p 光而直接通过 PBS7,由于 PSLM11 和 PSLM12 的状态都被设置为“0”,所以 p 光向下传输依次通过 PBS8 和 PBS9,继续向下传输通过 QWP6 后被 Mirror6 反射,向上传输再次通过

QWP6,所以 p 光被转变为 s 光,而被 PBS9 反射,从端口 3' 输出,输出光是 s 偏振光分量。信号光 3 的 p 光分量直接通过 PBS3 后,向右传输,由于 PSLM5 和 PSLM10 的状态都为“0”,所以 p 光的偏振态始终保持不变,依次通过 PBS6 和 PBS9 后,从端口 3' 输出,输出光是 p 偏振光。分析表明,信号光 3 的 s 光分量和 p 光分量会合在同一输出端口 3',而且输出端口的 s 光对应的是输入端口的 s 光分量,而输出端口的 p 光对应的则是输入端口的 p 光分量。

因此,3×3 光开关模块内同时存在 6 条信号光通道,各通道对应的各相位型空间光调制器的状态被唯一确定,各路径并没有发生冲突与阻塞。该光开关完成了(1 2 3)到(2' 1' 3')序列的交换。

## 4 分析与讨论

与偏振无关的双向 3×3 光开关可以实现输入信号光的全排列无阻塞输出与交换。根据信号光交换逻辑,在外加电信号的控制下,通过可编程相位型空间光调制器的作用,信号光的偏振态保持不变或被旋转 90°,也就是说相位型空间光调整器的作用相当与一个可编程的半波片。由于铁电液晶(ferroelectric liquid crystal, FLC)的卓越性能:响应时间快、控制电压低以及具有双稳态特性。它被广泛应用于光互连网络和光计算中,作为可编程的半波片可以实现基于偏振控制的平行光信号逻辑处理。因此,在实验中采用铁电液晶相位型空间光调制器(FLC-PSLM)。在外加电场的作用下,液晶的光轴沿着入射光场的方向或被旋转  $2\psi$  角度, $\psi$  由铁电液晶材料决定,对于大多数材料来说都接近于 22.5°。如果光程  $\Delta nd = \lambda/2$ , $\Delta n$  是液晶材料的折射率变化量, $d$  是材料的厚度, $\lambda$  信号光在真空中的波长,则铁电液晶相位型空间光调制器就相当于一个半波片。当液晶光轴相对于入射信号光被旋转了  $2\psi = 45^\circ$ ,则 s 偏振光变成 p 光,而 p 光变成 s 光。在具体的实验过程中,铁电液晶相位型空间光调制器并不是理想的半波片,也就是说,当它对信号光的相位进行调整时,有能量的损耗,它不能百分之百的将一种偏振态无损耗的转变为另外一种偏振态。

基于偏振控制技术的光交换模块<sup>[19,20]</sup>,其对应的输入输出通道数受偏振光分束器尺度的大小的影响和信号光衍射的限制。偏振光分束器一般能够做到( $>3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ),而信号光衍射的限制则可以通过采用微小激光阵列(例如,垂直表面发射激光器阵列 vertical cavity surface emitting lasers,

VCSEL)作为信号光源,它具有非常小的光束直径和发散角,可以有效的控制光束衍射。比如,微小激光阵列光束直径是 20 μm,那么只要液晶像元大小为 200 μm 即可消除衍射的影响。此外,交换模块能量的损耗主要是由于各单元器件表面反射引起的,它可以通过在其表面镀上一层抗反膜(增透膜)而降低,而且铁电液晶对于紫外到 3 μm 波段信号光来说几乎是透明的,因此信号光通过该铁电液晶相位型空间光调制器后,其能量损耗非常小。

该交换模块中信号噪音主要是指信号光从输入端口到输出端口的过程中,引起的信号光恶化。而信号串扰则表示信号光进入了不需要的信号通道。通过分析发现,引起信号恶化的重要原因是由于偏振光分束器和铁电液晶相位型空间光调制器的设计缺陷造成每一通道中不同偏振态信号光的同时存在。因此,必须努力提高各单元器件的光学性能(消光比、对比度、插入损耗等等)。同时,由于铁电液晶相位型空间光调制器在实际的操作过程中并非理想的可编程半波片,它不能完全无损耗的将一种偏振态的信号光转变成另外一种偏振光,由其引起的能量损耗或串扰必须认真考虑而且加以解决。

由于铁电液晶相位型空间光调制器的设计缺陷主要是由于液晶光轴的倾斜角  $\psi$  和器件厚度  $d$  偏离了它们的理想值而造成的。将铁电液晶相位型空间光调制器和偏振片联合使用,通过分析其信号光透射率  $T$  从而获知  $\psi$  和  $d$  对串扰的影响,可得其透射率为

$$T = \sin^2(4\psi) \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right), \quad (1)$$

定义  $\epsilon$  表示由于铁电液晶相位型空间光调制器的设计缺陷引起的通道中不想要的偏振分量,也即通道间的串扰,则

$$\epsilon = 1 - \sin^2(4\psi) \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right), \quad (2)$$

若信号光所通过的路径对应的偏振光分束器或铁电液晶相位型空间光调制器的数目为  $l$ ,则信号通道的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)表示为

$$R_{SN} \geq \frac{1 - l\epsilon}{l\epsilon}, \quad (3)$$

由此可得到各单元器件引起的串扰和通道间的信噪比。

结合实验室的具体条件,对 3×3 光交换模块的单元器件,即空间光调制器和偏振光分束器的性能参量进行了测定,初步得到了 3×3 光开关插入损耗和串扰的理论值。由于实验条件的限制,在实验中

采用的液晶空间光调制器和偏振光分束器的性能参量分别为:

液晶空间光调制器的性能参量:

对比度大约为 100:1,光隔离度大约 30 dB 左右,插入损耗 1.5 dB 左右。

偏振光分束器的性能参量:

对于 p 光,对比度  $s/p = -30$  dB,透射率大约是 96.8%,对于 s 光,对比度  $p/s = -30.2$  dB,反射率大约为 96.2%。

由这样的相位型空间光调制器和偏振光分束器所构成的 3×3 光开关,其串扰和插入损耗的理论值根据上面的讨论大约分别为 -36 dB 和 2.5 dB 左右(实际的插入损耗和串扰值由于该交换模块采用的单元器件过多,比该值大)。如果倾斜角  $\psi$  的偏移量为  $1^\circ$ , $d$  忽略不计,并且考虑信道路径最长(信号恶化最为严重)的情况,即实现信号光该操作所需的偏振光分束器或铁电液晶相位型空间光调制器数目最多的情况  $l=12$ ,则得到  $R_{SN} \geq 15$ 。因此,通过采用微小激光阵列的信号光源可以尽可能地消除信号光衍射的影响;在光学元件表面镀上增透膜可以降低因信号光反射造成的能量损耗;对倾斜角  $\psi$  和器件厚度  $d$  的优化,可以有效地降低信号光的恶化和串扰,提高信道间的信噪比。从而大大提高 3×3 光交换模块的光学性能,增强及其扩容和升级能力。不过在具体的应用过程中还必须解决好各单元器件间信号光的对位、耦合、传输以及集成与封装等问题。特别是在升级为大端口光交换矩阵时,应该处理好信号光源阵列、阵列光纤、光交换模块和接收模块间信号光的耦合问题,可以利用目前已经提出的一些方法很好的解决上述问题<sup>[21,22]</sup>。

## 5 结 论

设计了一种新的与偏振无关的双向 3×3 光开关,它由偏振光分束器、相位型空间光调制器、反射镜和四分之一波片构成。具有结构简单紧凑、控制方便灵活、易集成、可扩展等特点。由它通过级联的方式构建的 6×6、9×9 等光开关,同样具有与偏振无关和可双向交换的特点。3×3 光开关的设计是对光交换开关研究工作的一个补充,特别是在考虑某些奇数端口如 9×9、5×5、7×7 等交换模块时,如果有了 3×3 光交换开关,那么这些奇数端口交换模块的扩容和升级将变得更加灵活和方便。由于目前设计的 3×3 光开关还仅仅是个雏形,各分立的光学元件间的位置还在进一步调试和对准,整个交换模

块还处于离散状态,没有完成最后的封装和集成,还有许多实际问题需要解决,因此,该 $3\times 3$ 交换模块功能的实现和性能参量的测试都还没有完全到达实际的要求。不过,随着工作的进一步深入,这些问题应该都会得到很好的解决, $3\times 3$ 光交换模块的性能会得到真正的体现。相信文中设计的与偏振无关的双向 $3\times 3$ 光开关在构建大规模的特别是奇数端口的开关矩阵时会有一定的应用。

### 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  $1\times N$  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
- 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
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type  $3\times 3$  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 $3\times 3$ 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  $4\times 4$  switching matrix in silicon-on-insulator[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1573~1575 (in Chinese)  
王章涛,樊中朝,夏金松等.SOI热光 $4\times 4$ 光开关阵列的研制[J].*半导体学报*, 2004, **25**(12): 1573~1575
- Yang Jianyi, Jian Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*.  $2\times 2$  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. $2\times 2$ 有机聚合物热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 (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
- Jintao Liang, Junhua Liu, Xin Li *et al.*. A piezoresistive micro-cantilever for thermal infrared detector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 128~130
- 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  $1\times n$  fibre optic switch[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(5): 616~618
- N. A. Riza, D. L. Polla. Micromachined fibre optic switch for optical networks[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1793**: 108~126
- D. O. Culverhouse, R. I. Laming, S. G. Farwell *et al.*. All fiber  $2\times 2$  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, polarization independent  $2\times 2$  fibre optic switch using ferroelectric liquid crystals[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1341~1342
- Luo Fengguang, Cao Mingcui, Xu Jun *et al.*. A  $2\times 2$  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 $2\times 2$ 光纤光开关[J].*光电子·激光*, 2001, **12**(10): 1058~1060
- Luo Fengguang, Cao Mingcui, Xie Hu *et al.*.  $4\times 4$  free-space optical switch structure and its matrix analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1677~1682 (in Chinese)  
罗风光,曹明翠,谢胡等. $4\times 4$ 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
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Optimal design of ultra-compact  $3\times 3$  SOI MMI optical switch [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(4): 294~298 (in Chinese)  
贾晓玲,高凡,张峰.超紧凑型SOI基 $3\times 3$ MMI波导光开关的优化设计[J].*半导体光电*, 2005, **26**(4): 294~298
- Li Yajie, Wu Chongqing, Fu Songnian. The characteristic analysis of a novel all-optical switch based on  $3\times 3$  collinear fiber coupler[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(3): 400~402 (in Chinese)  
李亚捷,吴重庆,付松年.基于 $3\times 3$ 平行排列耦合器的全光光开关的特性分析[J].*光学技术*, 2006, **32**(3): 400~402
- Kristina M. Johnson, Marc R. Surette, Joseph Shamir. Optical interconnection network using polarization-based ferroelectric liquid crystal gates[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(9): 1727~1733
- 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**(1~2): 37~42
- Cao Mingcui, Luo Fengguang. *Parallel Fiber Array Coupling Components* [P]. China Patent, 03128028.5, 2004 (in Chinese)  
曹明翠,罗风光.并行光纤阵列耦合组件[P].中国专利, 03128028.5, 2004
- Cao Mingcui, Luo Fengguang, Xu Jun. *The Fiber Packaging Equipment of Fiber Array Components* [P]. China Patent, 200510120582.8, 2006 (in Chinese)  
曹明翠,罗风光,徐军.光纤阵列组件中光纤排放封装设备[P].中国专利, 200510120582.8, 2006