

文章编号: 0258-7025(2006)12-1636-07

自由空间二维榕树网实现方法

杨俊波, 苏显渝

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 鉴于榕树网在自由空间光子交换网络中具有重要的应用价值, 分析了榕树网的特点和 4×4 二维榕树网的空间拓扑结构, 通过偏振光分光棱镜、微闪耀光栅阵列、平面反射镜、半反半透镜和液晶空间光调制器的集成, 构建二维的榕树交换网实验模块, 利用微闪耀光栅的衍射特性, 控制每块微闪耀光栅的周期, 以实现入射光信号不同方向的闪耀输出, 最终完成二维榕树网自由空间水平和垂直方向上的交叉互连, 直通则由平面镜反射实现。对二维榕树网实验模块的功能分析表明, 该实验模块理论上可以完成 4×4 二维面阵内光信号(或数据)的排序、交换、组播、广播、矩阵变换等操作, 具有交换透明、速度快、空间带宽高等特点, 在全光交换和光通信中具有一定的应用。

关键词 光通信; 光网络; 榕树网; 微闪耀光栅阵列

中图分类号 TN 256; TN 929. 11 文献标识码 A

An Implemental Method of Two-Dimensional Banyan Network in Free Space

YANG Jun-bo, SU Xian-yu

(Department of Opto-Electronics, School of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Banyan optical networks play an important role in free-spatial photonic networks. The characteristics and structures of two-dimensional (2D) banyan network are analyzed. A new 2D banyan network architecture, which consists of polarizing beam-splitters, 4×4 micro blazed-grating arrays, half silvered mirrors, 4×4 spatial light modulators and mirrors, is proposed to accomplish optical signal switching, multicasting, broadcasting and matrix conversion through the 4×4 2D planes. The 4×4 micro blazed-grating arrays fulfill vertical connection and horizontal connection switching in 2D banyan networks, while the mirrors perform straight connections. The theoretical analysis shows that the architecture has the advantages of transparent switching, high speed, and high space-bandwidth product, therefore it can be implemented in free spatial optical interconnection widely.

Key words optical communication; optical network; banyan network; micro blazed-grating array

1 引言

随着科学技术的高度发展, 人们对信息的超大容量传输和交换提出了越来越高的要求。光纤技术的应用与普及在一定程度上解决了高宽带大容量信息的传输。然而, 目前由光纤传输系统和数字电子交换网络系统组成的通信系统, 由于电子交换网络存在串扰、信号畸变、时钟歪斜等缺点, 很难通过提

高以硅、砷化镓等为代表的半导体集成技术, 以便从根本上解决这些问题。光波作为载波具有极高的时间、空间带宽积, 高度的并行性和无电磁干扰, 光损耗小、信号无畸变、无串话等优点。在高速的信号交换和处理中, 光电子交换网络必将取代电子开关网络。其中, 自由空间的光学交换系统其性能尤为优越, 可采用混洗交换 Omega 网络、全交叉 Crossover 网络或榕树网络等拓扑结构^[1~5]。互连网络的拓扑

收稿日期: 2006-03-13; 收到修改稿日期: 2006-05-23

作者简介: 杨俊波(1974—), 男, 四川人, 四川大学博士研究生, 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, 四川大学电子信息学院教授, 博士生导师, 目前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

结构一般是采用在第三维自由空间传播的二维平面成像光学系统实现的。与混洗交换网络、全交叉网络相比,榕树网络的结构更简单、实现成本更低、能量损失更小。因此自由空间的榕树交换网络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。很多文献对榕树网络进行了讨论^[6~10],但主要都限于对其数学理论和特性进行研究,很少有对其实现方式特别是二维的榕树网络的构建及其实现方法进行讨论。本文在理论上提出一种实现自由空间二维榕树交换网络的方法,通过构建微光学元件、空间光调制器、偏振光分光棱镜和半反半透镜的实验模块,实现了自由空间二维榕树网的交换功能,该工作对于将二维榕树网用于光通信和光交换具有重要的意义。

2 榕树网络的特点

通道数是 $2N$ 的榕树网由 $(n+1)$ 级节点和 n 级链路组成, $n = \lg N$ 。其中每一节点级有 N 个 2×2 的节点开关,每一链路级有 $2N$ 条链路。图 1 为 $2N = 16$ 的榕树网络的拓扑结构。

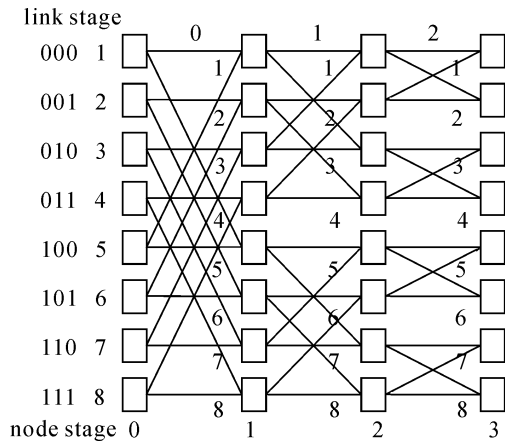


图 1 $N = 8$ 榕树网络

Fig. 1 $N = 8$ banyan network

榕树网两相邻节点级间通过直通互连和交叉互连连接,若各节点级中每一节点的位置用二进制位表示,则直通互连和交叉互连用下列操作表示:

$$\begin{aligned} \alpha^{(i)}[(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)_i] &= (P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)_{i+1}, \\ \beta^{(i)}[(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)_i] &= \\ & (P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_{n-i}\bar{P}_{n-i-1}P_{n-i-2}\cdots P_1P_0)_{i+1}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 P 取 0 或 1,如图 1 所示从上到下各节点的二进制位置分别是:000,001,010,011,100,101,110 和 111。 $\alpha^{(i)}$ 是直通互连函数,它表示在相邻的两互连级第 i 级和第 $i+1$ 级间,第 i 级中二进制位置为

$(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)$ 的节点与第 $i+1$ 级中二进制位置为 $(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)_{i+1}$ 的节点连接。 $\beta^{(i)}$ 是交叉互连函数,它表示第 i 级中二进制位置为 $(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_1P_0)$ 的节点与第 $i+1$ 级中二进制位置为 $(P_{n-1}P_{n-2}\cdots P_{n-i}\bar{P}_{n-i-1}P_{n-i-2}\cdots P_1P_0)_{i+1}$ 的节点交叉连接。对于 $N = 8$ 的榕树网,其节点级数和链路级数分别为 4 和 3。

图 2 为 4×4 的节点开关平面组成的二维榕树网络,由 4 级链路级和 5 级节点平面构成。其中,第 1 和第 2 链路级为水平方向上的交叉互连,而第 3 和第 4 链路级为垂直方向上的交叉互连。第 1 和第 2 链路级的交叉互连在垂直方向上分成 4 层,各层的连接关系一样。同样,第 3 和第 4 链路级的交叉互连在水平方向上分成 4 层,各层的连接关系也一样。

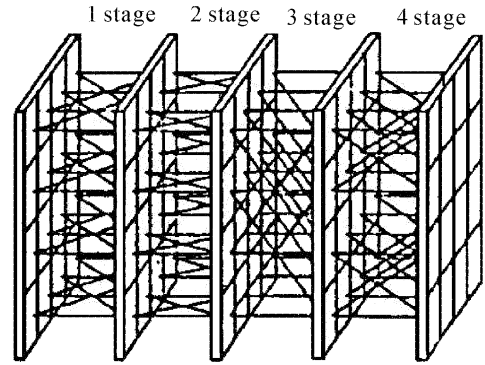


图 2 二维的榕树网络

Fig. 2 2D banyan network

3 微光学元件实现自由空间的交叉互连

根据榕树网链路级间交叉连接关系的特点,可以采用微光学衍射元件—微闪耀光栅阵列,在自由空间实现级间交叉互连。文献[11~13]中利用二元光学的设计方法,通过反应性离子刻蚀技术,制得的 8 台阶微闪耀光栅阵列可以实现光信号在空间的闪耀输出,图 3 为微闪耀光栅的表面微结构图。 T 为闪耀光栅的周期, d 为刻蚀深度

$$\frac{x}{\lambda Z} = \frac{n}{D} + \frac{1}{T}, \quad (2)$$

(2) 式为微闪耀光栅满足 1 级闪耀的周期方程。其中 x 为信号光通过微闪耀光栅后偏离原来传播方向的距离, Z 为微闪耀光栅对光信号的衍射距离,或者称为完成信号空间交换的距离, n 为输入信号的序号或入射的端口数, D 为相邻两信号端口的间距或每块光栅的宽度, λ 为信号光的波长。由 (2) 式可

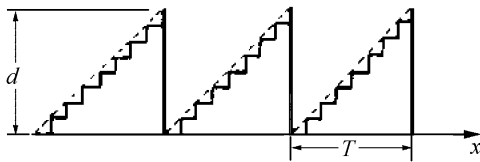


图 3 8 台阶微闪耀光栅

Fig. 3 8 levels micro blazed-grating

知,在合适的参数下,通过控制微闪耀光栅的周期,即可得到不同入射端口的光信号在空间上满足榕树网链路级间交叉连接关系的位置闪耀输出,这样便实现了榕树网各级间的交叉连接,而且由于 8 台阶的微闪耀光栅的衍射效率非常高,由二元光学的理论可知其衍射效率可以达到 95%^[14],所以当微闪耀光栅实现 1 级闪耀时,其光能量的利用率非常高,入射信号光的能量绝大部分都集中在第 1 衍射级(可以达到 80%以上,接近 90%),而进入其他衍射级的能量非常低。同时,相邻信道之间的串扰非常小。因此,利用 8 台阶微闪耀光栅阵列可以很好地实现榕树网各链路级间的交叉连接。

对于图 2 中二维榕树网第 1 链路级的交叉互连,4 层节点间的连接关系都一样,设计如图 4 所示的 1×4 微闪耀光栅阵列。

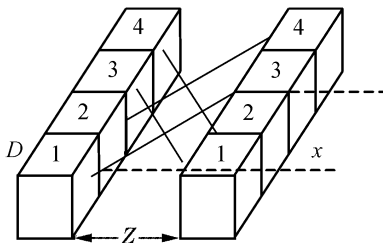


图 4 第 1 级链路级对应的微闪耀光栅阵列

Fig. 4 Blazed-grating array of the first link stage

由于光栅闪耀,信号光通过每块微闪耀光栅后在水平方向上偏离原来传播方向的距离均为 $x = 2D$,即第 1,2,3 和 4 块微闪耀光栅的周期值相同,但第 1,2 块光栅和第 3,4 块光栅在制作过程中的刻槽取向相反。由这样的 4 块 1×4 的微闪耀光栅阵列,即构成了第 1 级 4×4 微闪耀光栅阵列平面,由于每块微闪耀光栅的周期都相同,所以制作过程中的控制很简单,在普通的玻璃表面上就可以制得所需的微闪耀光栅阵列平面。

对于第 2 链路级的交叉互连,4 层节点间的连接关系都一样,可以设计如图 5 所示的 1×4 微闪耀光栅阵列。由于光栅闪耀,信号光通过每块微闪耀光栅后在水平方向上的偏离距离都为 $x = D$,即每

块光栅的周期值均相等,但第 1,3 块光栅的刻槽方向和第 2,4 块光栅的刻槽方向相反。由这样的 4 块 1×4 微闪耀光栅阵列,即可构成第 2 级 4×4 微闪耀光栅阵列平面。

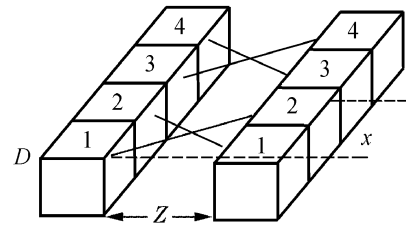


图 5 第 2 级链路对应的微闪耀光栅阵列

Fig. 5 Blazed-grating array of the second link stage

对于第 3 和第 4 链路级的交叉互连,每级也分为相同的 4 层连接,同样可以利用我们制作的微闪耀光栅阵列实现,而且光信号通过光栅闪耀后,偏离距离分别为 $2D$ 和 $1D$,周期值的大小分别与第 1 和第 2 级链路对应的微闪耀光栅的周期相等。不过由于交叉互连在竖直平面内完成,所以只需要将制得的图 4 和图 5 所示水平的微闪耀光栅阵列旋转到竖直方向即可,由得到的竖直方向的 1×4 微闪耀光栅阵列即可分别构成第 3 和第 4 级微闪耀光栅阵列平面。最后,由反应性离子刻蚀技术制得的这 4 块 4×4 微闪耀光栅阵列平面,即可实现 4 级链路的交叉连接功能。而直通连接则通过平面镜反射完成。

4 二维榕树网实验模块设计

对于图 2 所示的二维榕树网络,我们构建图 6 所示的光电实验模块。该模块由 4 块 4×4 的微闪耀光栅阵列平面(micro blazed grating array),8 块平面反射镜(mirror),8 块 4×4 的液晶空间光调制器(spatial light modulator,SLM),3 块半反半透镜(half silvered mirror,HSM)和 5 块偏振分光棱镜(polarizing beam-splitter,PBS)构成。偏振分光棱镜的作用是让 p 光通过,而 s 光反射;微闪耀光栅阵列实现光信号的交叉连接;空间光调制器的作用是根据信号窗口的液晶像元所施加的电压值,改变通过它的偏振光的偏振态。当液晶像元上所加电压超过其阈值时,通过液晶像元的光束的偏振态不发生变化,设此时状态为“0”,而当液晶像元上不加电压时,通过它的偏振光的偏振态将发生 90° 的变化,设此时状态为“1”。整个实验模块由 4 级构成,分别对应于 4 级链路,完成各级链路光信号的交叉或直通连接。

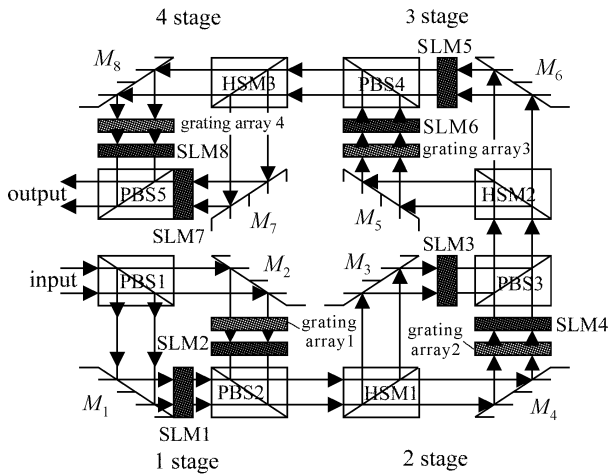


图 6 二维榕树网实验模块

Fig. 6 2D banyan network integrated module

第 1 级模块: 4×4 的信号光进入 PBS1, 被分成 s 光和 p 光, 其中 s 光被反射向下传输, 接着被 M_1 反射, 射向 4×4 的 SLM1, 通过控制加在 SLM1 各窗口液晶像元上电压的大小, 可以改变通过 SLM1 各窗口的 s 光的偏振态, 需要直通连接的信号光, 其对应窗口的液晶像元的状态是“1”, s 光变为 p 光, 通过 PBS2, 完成第 1 级链路的直通连接功能。不需要直通连接的信号光, 其对应窗口的液晶像元的状态是“0”, 偏振态不发生改变, 于是被 PBS2 反射, 向下射出实验模块, 不参与后面的交换。同时, p 光被 M_2 反射, 射向 4×4 的 grating array1, 在自由空间实现水平方向上的交叉互连, 完成交换后信号光进入 4×4 的 SLM2, 需要的交换后的信号光对应窗口的液晶像元的状态是“1”, 于是 p 偏振态转变成 s 偏振态, 被 PBS2 反射, 完成第 1 级链路的交叉连接功能, 进入第 2 级模块。而不需要的信号光对应窗口的液晶像元的状态是“0”, p 偏振态保持不变, 于是向下穿过 PBS2, 射出实验模块。

第 2 级模块: 从第 1 级模块出来的信号光包括完成直通连接的 p 光和完成交叉连接功能的 s 光, 它们被 HSM1 分成两部分。

对于 p 光, 一路向上传输, 被 M_3 反射, 进入 4×4 的 SLM3, 需要直通连接的信号光对应的窗口的液晶像元的状态是“1”, p 光转变为 s 光, 被 PBS3 反射, 完成第 2 级链路 p 光的直通连接, 进入第 3 级模块, 否则, 穿过 PBS3, 射出实验模块; p 光的另一路水平传输, 被 M_4 反射, 进入 4×4 的 grating array2, 在自由空间实现水平方向上的交叉连接, 完成交换后的信号光进入 4×4 的 SLM4, 需要的完成交换后的信号光对应的窗口的液晶像元的状态是“0”, 保持

p 光的偏振态不变, 通过 PBS3, 完成第 2 级链路 p 光的交叉连接, 进入第 3 级模块。不需要进入下级模块的信号光对应窗口的液晶像元的状态是“1”, p 光变成 s 光, 被 PBS3 反射, 射出实验模块。

对于 s 光, 同样被 HSM1 分成两路, 一路向上传输被 M_3 反射, 进入 SLM3, 需要直通连接的信号光对应的窗口的液晶像元的状态是“0”, s 光的偏振态保持不变, 被 PBS3 反射, 完成第 2 级链路 s 光的直通连接, 进入第 3 级模块。而不需要直通连接的信号光对应的窗口的液晶像元的状态是“1”, s 光变成 p 光, 穿过 PBS3, 射出实验模块; 另一路 s 光通过 HSM1 后, 被 M_4 反射, 进入 grating array2, 在自由空间实现水平方向上的交叉连接, 完成交换后的信号光进入 SLM4, 需要进入下一级模块的交换后的信号光对应的窗口的液晶像元的状态是“1”, s 光变成 p 光, 通过 PBS3, 完成第 2 级链路 s 光的交叉连接功能, 进入第 3 级模块。否则, 对应的液晶像元的状态是“0”, s 光偏振态不变, 被 PBS3 反射, 射出实验模块。

在第 3 和第 4 级模块中, 微闪耀光栅阵列平面完成垂直方向的交叉互连。液晶空间光调制器的作用同样是: 通过改变加在各窗口液晶像元上的电压大小, 控制通过的信号光的偏振态, 从而实现所需要的直通或交叉连接。最后, 完成了 4 级链路交换的光信号从实验模块的输出端口输出, 二维榕树网的整个交换过程结束。

5 二维榕树网交换功能分析

图 6 所示的光电实验模块只需给出各块 4×4 液晶空间光调制器的相应窗口的控制指令, 通过改变液晶像元上所加的电压值, 控制通过该窗口的偏振光的偏振态, 从而达到光信号选路的目的, 实现所需的变换。该实验模块理论上可以完成 4×4 二维面阵内光信号(或数据)的排序、交换、组播、广播、矩阵变换等操作。为简单起见, 仅讨论图 7 所示的 4×4 的信号矩阵经过该实验模块后实现信号矩阵的转置变换。

由于该实验模块由 4 级小模块组成, 因此需要分别确定各级模块的液晶空间光调制器各窗口的状态。

第 1 级模块: 保持 4×4 输入光信号矩阵的直通连接, 而不考虑交叉互连。由于交叉连接是在水平面各层内进行, 所以, 对应的 SLM1(负责直通连接)

和 SLM2(负责交叉连接)的各液晶窗口的状态和从第 1 级模块输出的信号光矩阵以及对应的偏振态如图 8 所示。其中,1,2,3,⋯,16 是空间光调制器对各窗口的编号。由于只考虑了直通连接,所以输出的信号光均为 p 偏振光。

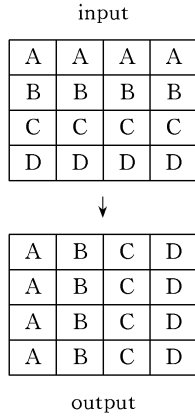


图 7 信号矩阵的转置变换

Fig. 7 Transpose of signal matrix

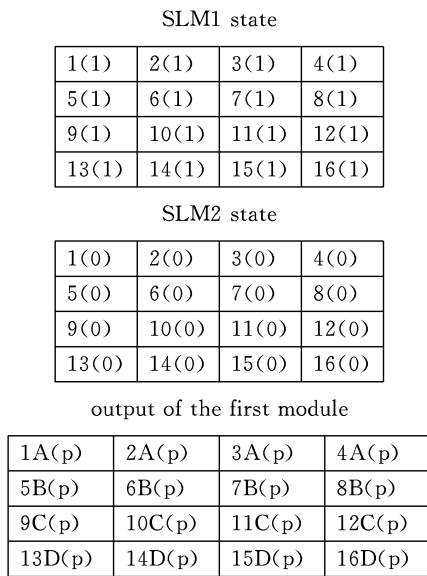


图 8 第 1 级模块的状态

Fig. 8 State of the first module

第 2 级模块:4×4 的 p 偏振态的信号光进入第 2 级模块,保持输入矩阵信号光的直通连接,而不考虑交叉互连,由于交叉互连同样是在水平面各层内进行的,相应的 SLM3(直通)和 SLM4(交叉)的各窗口的状态、输出的信号光矩阵、对应的偏振态如图 9 所示。由于只考虑了直通连接,所以输出的信号光都是 s 偏振光。

第 3 级模块:4×4 的 s 偏振态的信号光进入第 3 级模块,保持信号光矩阵对角线上的数据 1A,6B,11C,16D 不变,需要直通连接,所以对应的 SLM5(直通)上的 1,6,11,16 窗口的状态都是“1”,通过这些窗口的 s 光变成 p 光穿过 PBS4 进入第 4 级模

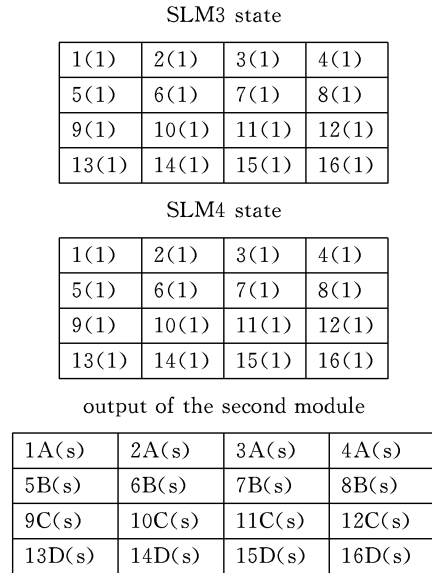


图 9 第 2 级模块的状态

Fig. 9 State of the second module

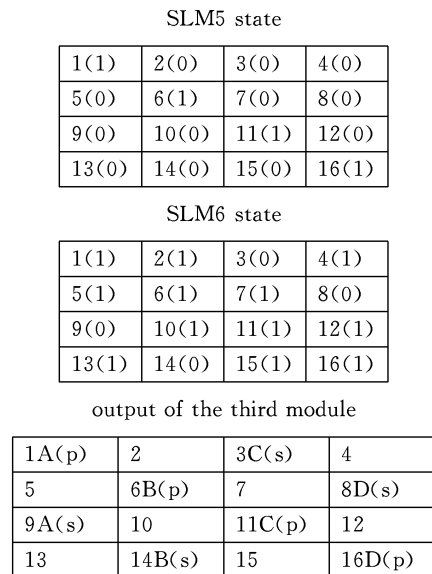


图 10 第 3 级模块的状态

Fig. 10 State of the third module

块。阻止通过 SLM5(直通)其他窗口的信号光发生直通连接,这些液晶窗口对应的状态就必须是“0”,s 光偏振态不发生改变,被 PBS4 反射出模块。同时,由于交叉互连发生在竖直平面的各层内,也即第一层的 1 和 9 窗口及 5 和 13 窗口,第二层的 2 和 10 窗口及 6 和 14 窗口,第三层的 3 和 11 及 7 和 15 窗口,第四层的 4 和 12,8 和 16 窗口的数据发生交换。需要将对角线上的数据 1A 交叉连接到 9 号窗口,6B 交叉连接到 14 号窗口,11C 交叉连接到 3 号窗口,16D 交叉连接到 8 号窗口,所以 SLM6(交叉)上对应的 9,14,3,8 号窗口的状态是“0”,通过这些窗口的 s 信号光的偏振态不发生改变,被 PBS4 反射,进入下一级模块。要阻止通过 SLM6(交叉)其他窗

口的信号光发生交叉连接,这些液晶窗口对应的状态必须是“1”,s 光变成 p 光,穿过 PBS4 离开模块。相应的 SLM5(直通),SLM6(交叉)各窗口的状态、输出的信号光矩阵、对应的偏振态如图 10 所示。其中,输出的信号光矩阵中,在第 5,13,2,10,7,15,4,12 窗口处没有信号(或数据)。

第 4 级模块:由于从第 3 级模块输出的信号光矩阵中第 5,13,2,10,7,15,4,12 窗口处没有信号,其余各窗口的信号光均要完成直通和交叉互连。对于直通连接,p 偏振态的信号光对应的 SLM7(直通)相应窗口的状态必须是“0”,p 偏振态不发生改变,信号光通过 PBS5 从输出端对应窗口输出,而 s 偏振态的信号光对应的 SLM7(直通)相应窗口的状态必须是“1”,s 偏振态变为 p 偏振态,信号光从输出端对应窗口输出。SLM7 上没有信号光通过的那些窗口的液晶像元不参与工作。对于交叉互连,由于交叉互连发生在竖直平面的各层内,即第 1 层的 1,5 窗口和 9,13 窗口,第 2 层的 2,6 窗口和 10,14 窗口,第 3 层的 3,7 窗口和 11,15 窗口,第 4 层的 4,8 窗口和 12,16 窗口。P 偏振态的信号光交叉连接后,SLM8(交叉)上对应窗口的状态是“1”,p 光变成 s 光,被 PBS5 反射,由输出端对应窗口输出。s 偏振态的信号光交叉连接后,SLM8(交叉)上对应窗口的状态是“0”,s 光偏振态不发生改变,被 PBS5 反射,从输出端相应窗口输出。SLM8 上没有信号光通过的那些窗口的液晶像元不参与工作。SLM7(直通),SLM8(交叉)各窗口的状态、最后输出的信号光矩阵、对应的偏振态如图 11 所示。

SLM7 state			
1(0)	2	3(1)	4
5	6(0)	7	8(1)
9(1)	10	11(0)	12
13	14(1)	15	16(0)

SLM8 state			
1	2(1)	3	4(0)
5(1)	6	7(0)	8
9	10(0)	11	12(1)
13(0)	14	15(1)	16

output of the fourth module			
A(p)	B(s)	C(p)	D(s)
A(s)	B(p)	C(s)	D(p)
A(p)	B(s)	C(p)	D(s)
A(s)	B(p)	C(s)	D(p)

图 11 第 4 级模块的状态

Fig. 11 State of the fourth module

从图 11 可知,从第 4 级模块输出的 4×4 光信号矩阵,即为需要的输入光信号矩阵的转置矩阵。该二维榕树网实验模块实现了该操作,对于其他的变换操作也采用相同的分析方法,只需确定各液晶空间光调制器相应窗口的状态即可。

6 结 论

通过理论分析和模块交换功能的讨论可知,文中设计的二维榕树网实验模块可以完成 4×4 二维面阵内光信号(或数据)的排序、交换、组播、广播、矩阵变换等操作。光信息在垂直于二维光电子器件的第三维自由空间交织传递,不仅避免了二维平面结构的限制,而且能够并行处理和传输光信号。该实验模块结构优化、互连级数少、规则性强、网络结构灵活、很容易扩容或升级为大端口高容量的交换网络。当然,在具体的实验过程中,必须考虑模块内光线的准直、指令的控制、模块的封装等技术上的难点。同时,也必须解决好光能量利用率较低的问题,否则将限制该模块在实际中的运用。就微光学元件本身而言,其尺寸小、易集成,但要将离散的反射镜、半反半透镜、分光棱镜等光学元件集成在一起还有许多问题需要解决。

参 考 文 献

- 1 Wang Jianquan, GU Wanyi. Distributed fault location in MESH optical networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):69~73
王健全,顾晓仪. 光网络中的分布式故障定位方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):69~73
- 2 He Jun, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Utilization of hybrid optical wavelength conversion in wavelength division multiplexing optical networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):963~966
何 军,刘德明,李 薇等. 混合光波长转换在波分复用光网络中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):963~966
- 3 Ji Yuefeng, Bai Lin, Xu Daxiong. A study of address recognition by all-optical method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):37~41
纪越峰,柏 琳,徐大雄. 全光地址识别机理的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):37~41
- 4 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
- 5 Wei Li, Jun He, Yuan Li *et al.*. An efficient algorithm for optimal allocation of wavelength converters in wavelength routing optical network [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8):449~452
- 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 J. Jahns. Optical implementation of the banyan network [J]. *Opt. Commun.*, 1990, **76**(5/6):321~324
- 8 D. Miyazaki, J. Tanida, Y. Ichioka. Optical implementation of the banyan network using a sagnac inverter with a patterned mirror [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **93**(5/6):283~288
- 9 Seung-Woo Seo, Tse-Yun Feng. The composite banyan network [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1995, **6**(10):1043~1054
- 10 Xiaohong Jiang, Pin-Han Ho, Horiquchi S.. Performance modeling for all-optical photonic switches based on the vertical stacking of banyan network structures [J]. *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, 2005, **23**(8):1620~1631
- 11 Ping Xu, Xiang Zhou, Xiaochuan Zhang *et al.*. Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array [J]. *Opt. Rev.*, 1995, **2**(5):362~365
- 12 P. Xu, J. B. Yang, H. X. Huang *et al.*. The theoretical analysis and design of perfect shuffle interconnection using micro-optical array element [C]. *SPIE*, 2005, **5636**:334~340
- 13 P. Xu, H. X. Huang, Z. L. Yan *et al.*. Research on experiments of perfect shuffle implementation using micro-optical array element [C]. *SPIE*, 2005, **5636**:374~378
- 14 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 22~25
金国藩,严瑛白,邬敏贤等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 22~25

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

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,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 *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,一年内有效。
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 来信至 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

