

光寻址 2×2 光学开关及 3-D 集成光学 蝶形互连网络的实现*

王斌泉 刘立人 王 宁 彭海峰

(中科院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘 要 在光学多级互连网络的实现中, 光学 2×2 开关的构造是至关重要的。本文介绍一种构成光寻址 2×2 光学开关的方法, 该方法是在方解石晶体的双折射性质的基础上, 利用普克尔斯只读光调制器(PROM)来控制入射光的偏振态, 从而实现光寻址 2×2 光学开关, 这种开关具有许多优点, 并且可以在 3-D 方向堆栈集成。利用该开关可以很方便地实现 3-D 集成的蝶形互连网络。

关键词 光寻址 2×2 光学开关, 蝶形互连网络。

1 引 言

光学多级互连网络具有高速、并行、大容量和无阻塞的优越特性, 是并行光计算机和未来高速光通信系统中的关键技术, 它能解决电子互连网络带来的一系列问题^[1, 2]。互连网络按它们的级次通常分为三大类: 1) 单级的纵横网络^[3, 4]; 2) 三级或五级的 Benes 型网络^[5]; 3) 多级互连网络^[6-9]。纵横网络是功能最强大的互连网络, 它能实现任意互连形式, 但它只在互连数目较小时具有实用价值, 对于大和超大规模的互连, 它将是不经济和难以实现的, Benes 型网络则在互连数目为一千左右时, 是较为实用的, 而对于更大规模的互连, 采用多级互连网络是最为经济和实用的, 这时网络的级次将由互连的数目决定。现在研究得较多的蝶形(或称榕树网络), 全混洗和交叉互连网络都是属于多级互连网络的范围, 它们的级次都是 $\log_2 N$, 这里 N 表示总的互连数目。

在过去的很多文献中, 都对于如何实现多级互连网络作出了不少的建议, 如利用铁电液晶^[6]、迈克耳逊或马赫-陈德尔装置^[7]、双相位衍射光栅和全息等光学器件^[10]。但实际上, 从电子网络构成的经验可知, 如果有了相应的开关, 那么, 只要把开关放在网络的节点上, 就可构成网络。对于蝶形、全混洗和交叉互连网络的构成和运行来说, 光学 2×2 开关则是构成这些多级互连网络的基础。本文提出一种新的构成光学 2×2 开关的方法, 主要是利用普克尔斯只读光调制器(PROM)的独特的光学特性, 结合方解石晶体的双折射性质, 构成一种光寻址的 2×2 光学开关。该开关完全由光学晶体构成, 是一种可以高密度集成的开关, 它具有可

* 国家科委 863 高科技项目及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995 年 10 月 30 日; 收到修改稿日期: 1996 年 1 月 26 日

级联、光能损失小准直容易、抗干扰性强和集成密度高等优点，是构成光学多级互连网络的理想光学开关。在此基础上，可顺利地构成蝶型互连网络。

2 普克尔斯只读光调制器和光寻址 2× 2 光学开关

普克尔斯只读光调制器的主要组成部分是硅酸铋($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) 晶体，该晶体具有多种光学性质，如旋光性、光导性和在外场下的线性双折射性质。在没有外场的情况下，器件中将只有旋光性在起作用，这时，输入如是偏振光，输出也将是偏振光。而在有外场的情况下，旋光性

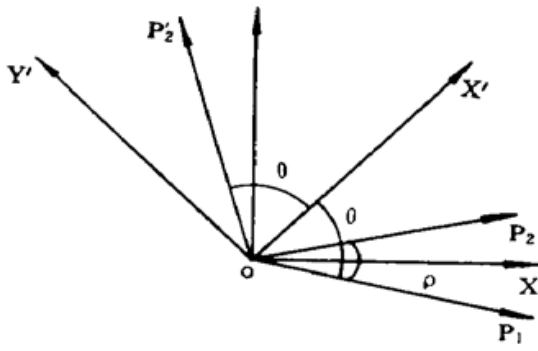


Fig. 1 The light vector diagram in the BSO crystal

性和场致双折射将共同对入射光的偏振态发生作用，并且光导性也对外场的场强起作用，这时输出光的偏振情况比较复杂，Henry 等人指出^[11]，对于一个一定厚度的 BSO 晶体，一定可以找到一个合适的电压，使得输出的光也是线偏振光，而且，输入和输出的偏振矢量位于调制器件感应主轴的对称两侧。可以选择一个合适的入射偏振方向和一个合适的电压，使得不通电时的输出偏振态正好和通电时的输出偏振态是正交的。该过程的矢量示意图如图 1 所示，图 1 中， P_1 是输入矢量， P_2 是不通电时的输出矢量， P_2' 是通电时的输出矢量。在这种情况下，

光调制器可以被看成是一个半波片，由于 BSO 晶体光导性的作用，它还能用外加光信号进行控制。利用它的这些性质，用两块相同的方解石晶体夹着一个普克尔斯只读光调制器来实现光寻址 2× 2 光学开关，如图 2 所示，图中前后两块方解石晶体对 e 光产生的偏离方向刚好相反。这样，当两输入光的偏振状态互相垂直，并且对应于第一块方解石晶体的 o 光和 e 光时，如果两光束的间隔距离恰好等于方解石晶体的偏转距离，那么，两输入光在通过第一块方解石晶体后将汇聚成一束光出射，在经过调制器后，该束光又通过第二块方解石晶体而分离。当控制调制器不起半波片作用时，输入光的偏振态不发生改变，因而输出光是输入光的直通形式；而当控制调制器起到半波片作用时，输入光的偏振态会旋转 90°，这时，输出光将是输入光的交换形式。这样，通过控制调制器的状态，可以实现光寻址光学 2× 2 开关，其开关状态如图 3 所示。由于该开关是由光学晶体构成的，在它的入射面上，可以同时实现多个这样的开关。

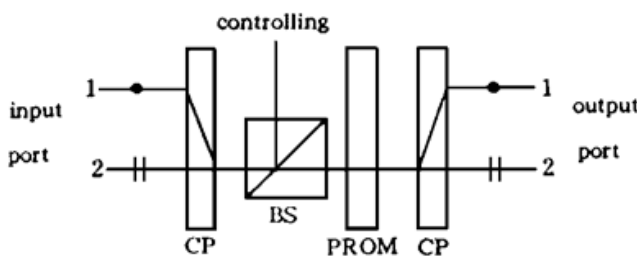


Fig. 2 The optical setup diagram of the 2× 2 photonic switching

CP: calcite crystal plate, BS: beam splitter

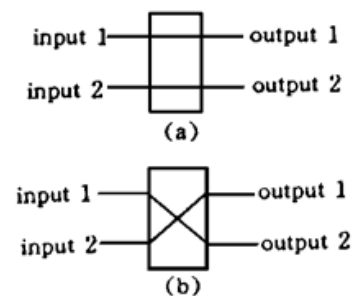


Fig. 3 Two states of the 2× 2 photonic switching (a) straight state, (b) cross state

3 全光蝶形互连网络的实现

蝶形互连网络是一种常用的多级互连网络,它在多个领域有着比较广泛的用途^[10, 12]。蝶型互连网络一般是由一个恒等置换和一个蝶型置换构成,图 4 是一个 8 输入输出的蝶型互连网络示意图,图中,节点处是二选一的选通器,即 2× 1 开关。从图中可以看出,在第一级互连中,输入端 0 和 4 是一对关联的输入,它们的两条可能的路径都交汇在一起,实际上,第一级的其它输入端和其它级的输入端都存在这种关联性,因此,可以利用前面提出的 2× 2 开关来代替这些节点,代替后的蝶型网络如图 5 所示。

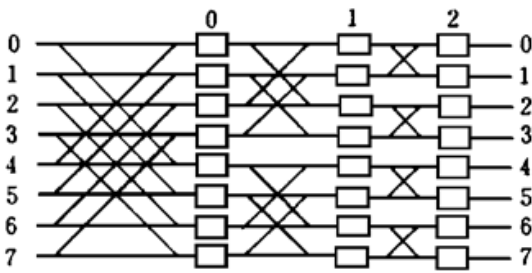


Fig. 4 The schematic diagram of 8-input butterfly network

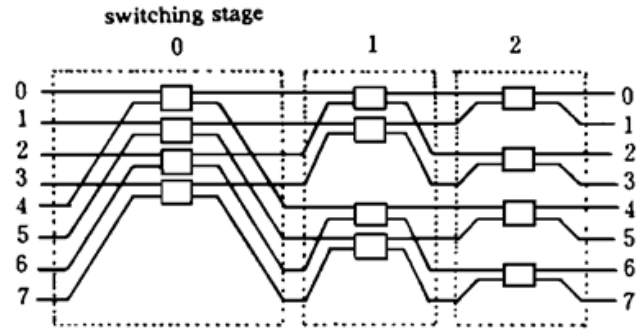


Fig. 5 The modified diagram of 8-input butterfly network

这样,可以很方便地实现蝶形互连网络。只需把光学 2× 2 开关放在图 5 的蝶型网络的节点上,并配上相应的控制部分,即可实现蝶型互连网络,一个 8 输入输出的蝶形互连网络的光学装置示意图如图 6 所示。由于互连是依赖方解石的双折射性质实现的,因此在输入端需要对光信号进行偏振调制,以使它们在以后的传输中保证能够交汇在一起。很显然,当只有两个输入时,只要分别为方解石的 o 光偏振态和 e 光偏振态即可,分别用 1 和 0 表示,假定两输入的偏振序列为 10,那么网络为 4 输入时,偏振序列取 1001 即能保证满足要求。实际上,如果 2ⁿ 个输入时,偏振序列 X 能满足要求,那么 2ⁿ⁺¹ 个输入的偏振序列只需取 XX^c 即可, X^c 是 X 的相反的偏振序列,如 X 是 1001,则 X^c 是 0110,这是因为 2ⁿ⁺¹ 个输入只比 2ⁿ 个输入多一次互连。当然,如图 5 所示,由于不同级间的互连长度不一样,不同级间开关方解石的厚度也不同。

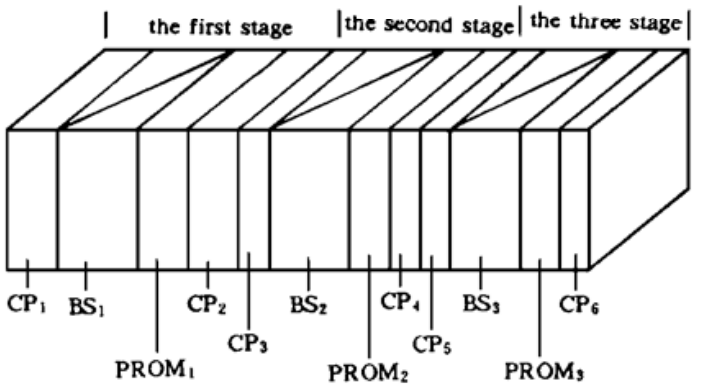


Fig. 6 The optical setup of the implementation of the butterfly network

该网络可以由外加控制光信号来控制它的运行,它的控制信号可以通过如下逻辑方程求出:

$$C_n = A_{1n}A_{2n} + A_{1n}^c A_{2n}^c \tag{1}$$

这里 C_n 是第 n 个输入信号的控制信号, A_{1n} 是输入端的地址, A_{2n} 是需要到达的输出端的地址,它们分别是输入输出端口编号的二进制代码,上标 c 表示是取补操作,而 C_n 则是从逻辑方程(1)中得到的二进制代码,它的每一位二进制代码是一级开关的控制信号,其中 1 表示开关为直通状态, 0 表示开关为交叉状态。现举例说明,如图 5 中,信号从编号为 1 的输入端输出到编号为 5 的输出端,其输入端地址 A_{1n} 为 001, 输出端地址 A_{2n} 为 101, 通过方程(1)求得

C_n 为 011, 那么, 在图 5 的信号传输中, 三级开关的控制信号分别为 0、1、1, 即 0 级、1 级和 2 级开关的状态分别为交叉、直通和直通。需要注意的是, 在该网络中, 由于两个信号传输到同一开关, 有时会出现两个控制信号不一样的情况, 这时发生网络阻塞情况。例如, 在上面从 1 端传输到 5 端的例子中, 如果同时要求信号从编号为 5 的输入端传输到编号为 7 的输出端, 这时, 这一对输入输出要求的三级开关的控制信号也可从方程(1) 得到, 它们分别是 1、0、1, 这时, 它要求第一级开关的状态为直通。这样, 1 输入端和 5 输入端交汇的开关状态就不能确定, 网络发生阻塞情况, 不能得到要求的互连形式。但由于象图 4 和图 5 的网络, 本来就是阻塞型网络, 发生阻塞情况也是不可避免的。要想避免阻塞发生, 需要增加网络的级次。

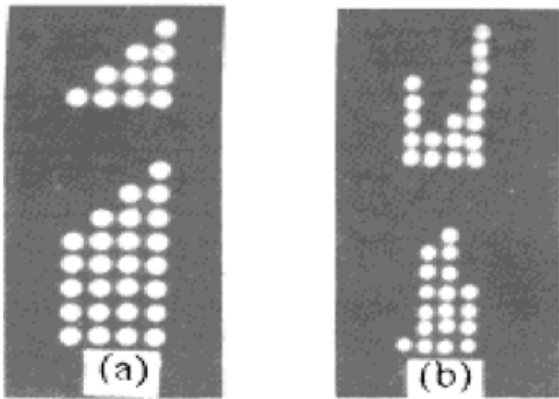


Fig. 7 The optical experimental result: (a) the input signal; (b) the output signal throughing the network

上面讨论的是平面互连的情况, 由于晶体的入射面上可以同时构成多个开关, 并且适当放置方解石可以使 e 光在水平或垂直两个方向发生偏离, 因此, 用本文的光学 2×2 开关可以很方便地实现 3-D 互连网络, 此网络和文献[13]中所指的网络是一致的, 它的输入端和输出端以及开关节点都是各成平面排列的, 互连在这些平面构成的 3-D 空间内完成, 需要在垂直和水平两个方向都进行互连。当然, 光学实现时, 输入光的偏振态也需调制, 级间方解石的厚度也要根据情况的不同而调整。作者用一块普克尔斯只读光调制器和

两块方解石晶体完成了单级蝶型互连的光学实验, 实验结果如图 7 所示。图 7 所示的实验中, 8 个输入排成两排, 完成了在垂直方向的互连形式, 中间两个开关是直通状态, 因而保持信号不变, 前后两个开关为交叉状态, 信号实现互换。在实验中, 由于所用光调制器件很薄, 器件上所加的电压大约为器件的半波电压(3900 V)。实验系统存在光学通道间的串扰, 这主要是由方解石晶体和输入光的偏振调制所引起的, 在对输入信号光进行高质量的偏振调制, 并且采用光学性能良好的方解石晶体以后, 可以大大缩小光学通道间的串扰。

结 论 提出用普克尔斯只读光调制器和方解石晶体构造光寻址 2×2 开关, 由于这种开关完全是由晶体构成的, 它可以很方便地堆栈集成, 形成一种紧凑结构。利用这种光学开关, 可以方便而灵活地实现 2-D 和 3-D 的光学蝶型互连网络。以这种光学开关构成的光学网络, 将具有多方面的优点。虽然, 本文实现的是蝶型网络, 但基本思想对于和蝶型网络等效的^[14]一些网络, 例如, 全混洗网络和交叉网络, 是同样适用的。可以相信, 在对输入信号进行恰当的偏振调制后, 该光学开关也可以用来实现其它的多级互连网络。

参 考 文 献

- [1] A. Huang, Architectural considerations involved in the design of an optical digital computer. *Proc. IEEE*, 1984, **72**: 780~ 786
- [2] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S.-Y. Kung *et al.*, Optical interconnections for VLSI systems. *Proc. IEEE*, 1984, **72**: 850~ 866
- [3] A. A. Sawchuk, B. K. Jenkins, C. S. Raghavendra *et al.*, Optical crossbar network. *Computer*,

- 1981, **20**(1): 50~ 60
- [4] Y. Wu, L. Liu, Z. Wang, Optical crossbar elements used for switching networks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2960~ 2967
- [5] D. Nassimi, S. Sahni, A self-routing Benes network and parallel permutation algorithms. *IEEE Tran. Computers.*, 1981, **C-30**(5): 332~ 340
- [6] K. M. Johnson, M. R. Surette, J. Shamir, Optical interconnection network using polarization-based ferroelectric liquid crystal gates. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(9): 1727~ 1733
- [7] J. Jahns, Optical implementation of the banyan network. *Opt. Comm.*, 1990, **76**(4): 321~ 324
- [8] A. W. Lohman, W. Stork, G. Stucke, Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1530~ 1531
- [9] J. Jahns, M. J. Murdocca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1998, **27**(15): 3155~ 3160
- [10] D.-G. Sun, N.-X. Wang, L.-M. He *et al.*, Butterfly interconnection networks and their applications in information processing and optical computing: applications in fast-Fourier-transform-based optical information processing. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(35): 7184~ 7193
- [11] M. Henry, S. Mallick, D. Rouéde *et al.*, Propagation of light in an optically active electro-optic crystal of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; Measurement of electro-optic coefficient. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(18): 2650~ 2654
- [12] K. M. Iftekharruddin, M. A. Karim, Butterfly interconnection network: design of multiplier, flip-flop, and shift register. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(7): 1457~ 1462
- [13] T. J. Cloonan, F. B. McCormick, Photonic switching applications of 2-D and 3-D crossover networks based on 2-input, 2-output switching nodes. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(17): 2309~ 2323
- [14] M. Cao, H. Li, F. Luo *et al.*, Free-space regular optical interconnections: a mathematical analysis. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2960~ 2967

Implementation of Optical Addressed 2×2 Photonic Switch and 3-D Stacked Optical Butterfly Interconnection Network

Wang Binqun Liu Liren Wang Ning Peng Haifeng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 October 1995; revised 26 January 1996)

Abstract The optical 2×2 switching is the key part of the implementation of the optical multistage interconnection network. In this paper, a method to construct the optical addressed 2×2 switching is presented. It is based on the birefringence property of the calcite crystal, and the PROM device is used to control the polarization of the input light. This photonic switching has many advantages, and it can be stacked in 3-D directions. The 3-D stacked butterfly network is easy to implement by using this switching.

Key words optical addressed 2×2 switching, butterfly inter-connection network.