

文章编号: 0253-2239(2008)02-0365-05

单块晶体集成的 $N \times N$ 纵横开关网络及其控制算法

侯培培¹ 宋哲¹ 李旭东¹ 张娟² 刘立人³

¹ 辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029
² 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072
³ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 设计了一种单块晶体集成的 $n \times n$ 纵横开关(Crossbar)网络。通过综合考虑晶体的双折射和全内双反射现象, 以及晶体的电光效应, 将构成 $n \times n$ 纵横开关网络的所有单元器件都集成到一块具有电光效应的双折射晶体上。同时, 给出了该网络的控制算法, 通过对开关工作状态的控制, 可以实现任意输入输出通道之间的无阻塞连接。这种单块晶体集成的纵横开关网络具有能量损耗低、无阻塞、易安装、抗干扰等优点, 适合于全光网络发展的需要。

关键词 信息光学; 纵横开关网络; 控制算法; 集成

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

Integrated Optical $N \times N$ Crossbar Network and Its Control Algorithm

Hou Peipei¹ Song Zhe¹ Li Xudong¹ Zhang Juan² Liu Liren³

¹ College of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China
² School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China
³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract An integrated $n \times n$ crossbar network is designed, which consists of 2×2 switches and crossbar interconnections. Considering both the phenomena of double refraction and internal double reflection, and the electro-optic effect in a crystal, all elements of $n \times n$ crossbar network are integrated in one birefringent crystal slab with electro-optic property. A control algorithm of the crossbar network is discussed, which may control the non-blocking interconnection between any input-output pair. The integrated crossbar network with low energy loss, non-blocking, is easy to assemble, insensitive to environment, well suited for use in optical networks.

Key words information optics; crossbar network; control algorithm; integration

1 引言

纵横开关网络^[1]具有拓扑结构简单, 容易实现的特点, 是研究较多的互连网络之一。纵横开关网络的光学实现主要是利用集成光学和自由空间光学。集成光学型纵横开关网络^[2~5]是利用波导来实现的, 响应速度慢, 不易实现三维互连。自由空间型纵横开关网络^[6~14]利用几何光学和物理光学方法实现, 如利用反射镜、棱镜、透镜等不规则的几何光学器件来实现, 或利用液晶、波片、双折射晶体来实现等。它们需要的分立元件都比较多, 有的能量损

耗较大, 有的速度较慢, 有的元件不易加工, 有的体积庞大、结构松散, 不易校准和打包集成。

本文在单块晶体 2×2 光开关^[15]基础上, 提出一种集成结构的纵横开关网络。利用晶体的双折射效应和电光效应, 将构成纵横开关网络的所有器件都集成到一块具有电光效应的双折射晶体(如 LiNbO_3 , LiTaO_3 等)上, 并给出了该网络的控制算法, 能快速实现任意输入输出之间的无阻塞连接。这种单块晶体集成结构的纵横开关网络具有简单可靠, 损耗小, 无阻塞等特点, 适合于大容量、高速交

收稿日期: 2007-04-09; 收到修改稿日期: 2007-08-22

作者简介: 侯培培(1981-), 女, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事无源器件方面的研究。E-mail: yishan8181@163.com

导师简介: 宋哲(1970-), 女, 辽宁人, 教授, 主要从事晶体光学、光开关与光互连、电光调制等方面的研究。

E-mail: zhesong@eyou.com. 通信联系人。

换、低损耗的全光网发展的需要。

2 单块晶体集成的 $n \times n$ 纵横开关网络

$n \times n$ 纵横开关网络包由多个 2×2 光开关级联而成的,如图 1 所示。单块晶体 2×2 光开关,如图 2 所示^[15]。两束正交偏振光垂直入射到晶体上,经过两次全内双反射后合成一束,沿晶体光轴方向(OP 方向)传播,再经过两次全内双反射后又分成两束正交偏振光输出。当在 OP 段沿 x 轴方向加半波电压时,两束光的偏振态将分别旋转 90° , o 光变成 e 光, e 光变成 o 光, A 路输入光从 A' 路输出, B 路输入光从 B' 路输出,开关表现为直通状态;当没有外电场作用时,两束光的偏振态不发生变化,但两路光的输出位置被交换,即 A 路输入光从 B' 路输出, B 路输入光从 A' 路输出,开关表现为交叉状态。

在这种单块晶体集成的 2×2 光开关基础上,同时考虑到晶体的双折射效应, o 光和 e 光在晶体中

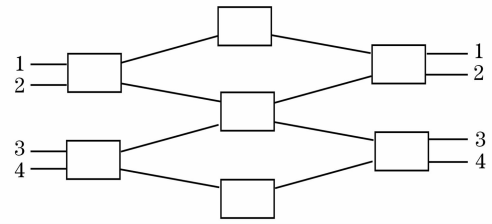


图 1 4×4 纵横开关网络

Fig.1 4×4 crossbar network

传播的路径不同,提出单块晶体集成的 $n \times n$ 纵横开关网络,它由一块具有电光效应的双折射晶体构成。依图 2,设计了两种基本结构,一种是易于级联的垂直入射结构, $n=2,3,4,5 \dots$,如图 3;另一种是有较低操作电压的倾斜入射结构, $n=2,4,6,8 \dots$,如图 4。对于倾斜入射结构,各路输入(输出)信号之间互不平行且均倾斜入射到晶体表面,不易级联,受篇幅所限,在此不作讨论。

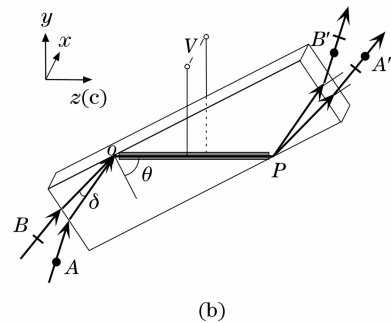
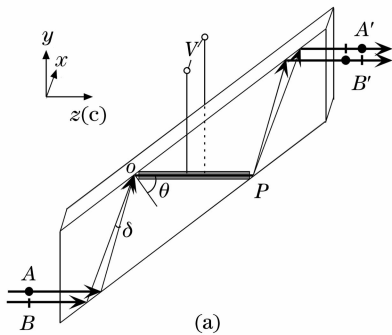


图 2 2×2 光开关。(a)垂直入射结构,(b)倾斜入射结构

Fig.2 Bypass-exchange switch. (a) Incident beams normal to the input surface of crystal, (b) incident beams tilted to the input surface of crystal

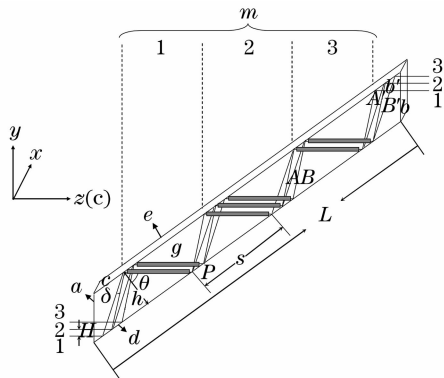


图 3 3×3 纵横开关网络垂直晶体表面入射结构

Fig.3 Configuration of a 3×3 crossbar network, whose incident beams are normal to the input surface of crystal

3×3 纵横开关网络的结构中(如图 3),晶体切割成平行六面体,其中 a 、 b 面分别是光束输入面和输出面, c 、 d 面是反射面, e 、 g 面与其余四个面垂直,

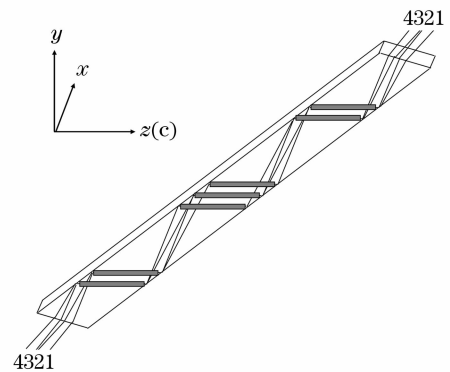


图 4 4×4 纵横开关网络倾斜入射结构

Fig.4 Configuration of a 4×4 crossbar network, whose incident beams are tilted to the input surface of crystal 是放置电极的面,图中阴影部分为电极,其长度方向与晶体光轴平行。晶体的光轴沿着 OP 方向,与反射面法线成 θ 角,与输入面和输出面垂直。各路信

号互相平行且垂直于晶体表面入射,它们都是线偏振光,第 1 通道输入光是平行入射面偏振(e 光),第 n 通道输入光是垂直入射面偏振(o 光),中间通道输入光可以是 o 光,也可以是 e 光。网络共有 $2n-3$ 级开关级,其中奇数级包含 $n-1$ 个开关,偶数级包含 n 个开关,图中一个电极代表一个开关。每个开关都有两个输入端(A,B)和两个输出端(A',B'),其中 A 路光和 B'路光是 e 偏振,B 路光和 A'路光是 o 偏振。用 f_m 表示第 m 级开关级第 f 行开关(m 从左至右增加, f 从下至上增加),e 光记为 1,o 光记为 0,则相邻两级开关的连接方式为

m 为奇数,

$$\begin{cases} (f_m, 1) \rightarrow (f_{m+1} + 1, 1), \\ (f_m, 0) \rightarrow (f_{m+1}, 0), \end{cases}$$

m 为偶数,

$$\begin{cases} (f_m, 1) \rightarrow (f_{m+1}, 1), \\ (f_m, 0) \rightarrow (f_{m+1} - 1, 0). \end{cases}$$

晶体的尺寸与 θ 角及输入端子数 n 有关。设晶体的宽度为 h ,则相邻输入(输出)通道间距 H 为

$$H = \frac{h(n_o^2 - n_e^2) \sin(2\theta) \cos \theta}{n_o^2 - (n_o^2 - n_e^2) \cos^2 \theta}$$

式中 n_o 、 n_e 分别是晶体中 o 光、e 光的主折射率。相邻开关级($m \rightarrow m+1$)间距离 s 为

$$\begin{cases} s = 2h \tan \theta, & m \text{ 为奇数} \\ s = h[\tan \theta + \tan(\theta + \delta)], & m \text{ 为偶数} \end{cases}$$

其中 δ 为每个开关两输入光(o 光与 e 光)的夹角^[16]:

$$\tan \delta = \frac{(n_o^2 - n_e^2) \cos^2 \theta \sin(2\theta)}{n_o^2 - (n_o^2 - n_e^2) \cos^2 \theta \cos(2\theta)},$$

晶体的总长度 L 为

$$\begin{aligned} 2h\{(n-1)[\tan \theta + \tan(\theta + \delta)] - 1/\sin(2\theta)\} < \\ L < h[(4n-3)\tan \theta + \cot \theta]. \end{aligned}$$

3 控制算法

纵横开关网络的控制算法不是唯一的,本文给

出一种能迅速有效地实现任意无阻塞互连的控制算法,该算法包括信号流经开关位置的确定和开关状态的确定两部分。

3.1 信号流经开关位置的确定

用 $K^{[i,j]}$ 表示信号光由 i 通道输入、 j 通道输出时流经的全部开关状态,其展开式为 $K^{[i,j]} = C_1^{[i,j]} C_2^{[i,j]} \dots C_m^{[i,j]}$, $C_m^{[i,j]}$ 表示第 m 级开关的状态。设开关为直通状态时 $C_1^{[i,j]} = 1$,交叉状态时 $C_m^{[i,j]} = 0$, p 为输入信号光的偏振态,则信号流经每级开关的位置为

$$m = 1,$$

$$\text{当 } p = 1 \text{ 时, } f_1 = i; \text{ 当 } p = 0 \text{ 时, } f_1 = i - 1.$$

$$m = 2, 4, 6 \dots,$$

$$\text{当 } p \oplus C_1^{[i,j]} \oplus C_2^{[i,j]} \oplus \dots \oplus C_{m-1}^{[i,j]} = 1 \text{ 时,}$$

$$f_m = f_{m-1} + 1;$$

$$\text{当 } p \oplus C_1^{[i,j]} \oplus C_2^{[i,j]} \oplus \dots \oplus C_{m-1}^{[i,j]} = 0 \text{ 时,}$$

$$f_m = f_{m-1};$$

$$m = 3, 5, 7 \dots,$$

$$\text{当 } p \oplus C_1^{[i,j]} \oplus C_2^{[i,j]} \oplus \dots \oplus C_{m-1}^{[i,j]} = 1 \text{ 时,}$$

$$f_m = f_{m-1};$$

$$\text{当 } p \oplus C_1^{[i,j]} \oplus C_2^{[i,j]} \oplus \dots \oplus C_{m-1}^{[i,j]} = 0 \text{ 时,}$$

$$f_m = f_{m-1} - 1.$$

3.2 信号流经开关状态的确定

根据网络的工作原理,首先给信号流经的每个开关按表 1 或表 2 预置一个状态,然后根据网络具体的输入与输出的连接方式,进行开关位置的判断和状态的验证。其中第 1、 n 输入通道最特殊,需要最先判断,第 2、 $n-1$ 输入通道次之,其它输入通道最后判断,具体过程如下:

1) 确定第 1、 n 输入通道信号光流经开关的状态及位置

由网络结构决定,当第 1、 n 输入通道与任一输出通道连接时,信号流经各级开关的状态符合表 1 和表 2 预置的状态,它们满足下列规律:

$$i = 1 \quad \begin{cases} j = 1, & K^{[i,j]} = K^{[1,1]} = C_1^{[1,1]} C_2^{[1,1]} \dots C_m^{[1,1]} = 111 \dots 1 \\ j = 2, & K^{[i,j]} = K^{[1,2]} = K^{[1,1]} \ll 1 \\ j \geq 3, & K^{[i,j]} = K^{[1,1]} \ll 2j - 3 \end{cases} \quad (1)$$

$$i = n \quad \begin{cases} j = n, & K^{[i,j]} = K^{[n,n]} = C_1^{[i,j]} C_2^{[i,j]} \dots C_m^{[i,j]} = 111 \dots 1 \\ j = n - 1, & K^{[i,j]} = K^{[n,n]} \ll 1 \\ j < n - 1, & K^{[i,j]} = K^{[n,n]} \ll 2(n - j) - 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 \ll 为左移运算符,即高位左移后溢出,末尾空位补 0。开关状态确定后,按 3.1 节确定信号流经每级开关的位置。

2) 判断第 2 输入通道信号光是否是 o 光且从第 n 输出通道输出。若是,则信号流经各级开关的状态符合表 1 预置的状态,即

$$K^{[i,j]} = C_1^{[i,j]} C_2^{[i,j]} \dots C_m^{[i,j]} = 100\dots 0,$$

然后按 3.1 节确定信号流经各级开关的位置。否则,进行第 3) 步。

3) 判断第 $n-1$ 输入通道信号光是否是 e 光且从第 1 输出通道输出。若是,则信号流经各级开关的状态符合表 2 预置的状态,即

$$K^{[i,j]} = C_1^{[i,j]} C_2^{[i,j]} \dots C_m^{[i,j]} = 100\dots 0,$$

然后按 3.1 节确定每级开关的位置。否则,进行第 4) 步。

4) 其他情况,要先按表 1 或表 2 给信号流经的各级开关预置状态,它们满足下列规律:

$$\begin{aligned} & \text{输入信号为 o 光} \quad \begin{cases} j = i, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} = C_1^{[i,i]} C_2^{[i,i]} \dots C_m^{[i,i]} = 111\dots 1 \\ j = i - 1, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 1 \\ j < i - 1, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 2(i - j) - 1 \\ j > i, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 2(j - i) \end{cases} \\ & \text{输入信号为 e 光} \quad \begin{cases} j = i, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} = C_1^{[i,j]} C_2^{[i,j]} \dots C_m^{[i,j]} = 111\dots 1 \\ j = i + 1, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 1 \\ j > i + 1, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 2(j - i) - 1 \\ j < i, & K^{[i,j]} = K^{[i,i]} \ll 2(i - j) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

由于中间输入通道信号流经开关的状态受到已确定开关状态的限制,所以要按输入通道序号依次对预置状态进行检验。先根据预置状态逐级判断开关的位置,当发现有 $C_m^{[i,j]}$ 与该位置已确定的状态相矛盾时,按已确定开关状态设置,并将 $C_{m+2}^{[i,j]}$ 预定状态取反。

表 1 任意输入输出连接时,信号流经开关的预置状态(第 2, 3, ..., $n-1$ 输入通道信号光为 o 光)

Table 1 Presupposed states of the switches where a signal passes through from input channel i to output channel j (the 2nd, 3rd, ..., $n-1$ th input signal is o-beam, respectively)

$[i,j]$	1	2	.....	$n-1$	n
n	0000.....0	10...00000	.....	1.....1100	1.....1111
$n-1$	110000...0	1110...000	.....	1.....1111	1.....1110
$n-2$	111100...0	111110...0	.....	1.....1110	1.....1000
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
2	1.....1110	1.....1111	.....	111100...0	110...0000
1	1.....1111	1.....1110	.....	110.....00	0.....0000

表 2 任意输入输出连接时,信号流经开关的预置状态(第 2, 3, ..., $n-1$ 输入通道信号光为 e 光)

Table 2 Presupposed states of the switches where a signal passes through from input channel i to output channel j (the 2nd, 3rd, ..., $n-1$ th input signal is e light beam, respectively)

$[i,j]$	1	2	.....	$n-1$	n
n	0000.....0	1100.....0	.....	1.....1110	1.....1111
$n-1$	1100.....0	111100...0	.....	1.....1111	1.....1110
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
3	1.....1000	1.....1110	.....	111110...0	111100...0
2	1.....1110	1.....1111	.....	1110.....0	1100.....0
1	1.....1111	1.....1100	.....	1000.....0	0000.....0

当已知网络连接方式和入射光偏振态时,根据上述算法可以快速得到每个开关的状态。如 $n=3$,第 2 输入通道为 e 光,网络连接方式为:123→312 时,每个开关的状态如表 3; $n=4$,第 2,3 输入通道均为 o 光,网络连接方式为:1234→4321 时,每个开关状态如表 4。

表 3 $n=3$, 第 2 输入通道为 e 光, 网络连接方式为:
123→312 时, 每个开关的状态

Table 3 Switches states with $n=3$, when the interconnections are 123→312 and the second input signal is e light beam

$m \begin{matrix} [i,j] \\ m \end{matrix}$	1	2	3
1	0	0	0
2	1	0	0
3	×	1	×

表 4 $n=4$, 第 2, 3 输入通道均为 o 光, 网络连接方式为:
1234→4321 时, 每个开关状态

Table 4 Switches states with $n=4$, when the interconnections are 1234→4321 and the 2nd and 3rd input signal is o light beam

$m \begin{matrix} [i,j] \\ m \end{matrix}$	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	×	0	×	0	×

“×”: There is no switch

4 结 论

设计了一种单块晶体集成结构的纵横开关网络, 利用晶体的电光效应, 实现了 2×2 光开关的功能, 利用晶体的双折射和全内双反射现象, 实现了相邻两级开关之间的连接, 从而将构成 $n \times n$ 纵横开关网络的所有单元器件都集成到一块具有电光效应的双折射晶体上, 并给出了任意输入输出对间连接的控制算法。该网络具有结构简单, 抗干扰, 低损耗, 级联能力强等优点。但由于受晶体尺寸的限制, 只适用于输入输出端数较少的情况, 对于大规模纵横开关网络, 可通过其级联构成, 所用的单元器件少于传统的纵横开关网络。因此这种集成结构的纵横开关网络能满足未来全光网大容量、低损耗、高速交换的要求。器件的制作及性能测试正在进行中。

参 考 文 献

1 A. A. Sauchuk, B. K. Jenkins, C. S. Raghavendra *et al.*. Optical crossbar network[J]. *Computer*, 1981, **20**(1): 50~60

2 Granstrand P, Stoltz B, Thylen L *et al.*. Strictly nonblocking 8×8 integrated optical switch matrix[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(15): 816~818

3 Masayuki Okuno, Kuniharu Kato, Yasuji Ohmon *et al.*. Improved 8×8 integrated optical matrix switch using silica-based planner lightwave circuits [J]. *Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1597~1606

4 Yakashi Goh, Akira Himeno, Masayuki Okuno *et al.*. High-extinction ratio and low-loss silica-based 8×8 strictly nonblocking thermooptic matrix switch [J]. *Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1192~1199

5 L. McCaughan, G. A. Bogert. 4×4 Ti:LiNbO₃ integrated optical crossbar switch array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(4): 348~350

6 Liu Xu, Xiao Jinbiao, Sun Xiaohan. Alignment and coupling between planar lightwave circuit chip and wedge-shaped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 680~684

刘旭, 肖金标, 孙小藩. 楔形光纤与半导体多量子阱平面光波导光路芯片的耦合分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 680~684

7 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

8 Wilhelm Stork. Optical crossbar[J]. *Optik*, 1987, **76**(4): 173~175

9 Yaming Wu, Liren Liu, Zhijiang Wang. Optical crossbar elements used for switching networks[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 175~178

10 K. H. Brenner, T. M. Merklein. Implementation of an optical crossbar network based on directional switches[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(14): 2446~2451

11 Marchic M E, Lee S G. Mirror-folded free-space crossbars with holographic implementation[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **2**: 6438~6444

12 Kristina M. Johnson, Marc R. Suretle, Joseph Shamir. Optical interconnection network using polarization based ferroelectric liquid crystal gates[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(9): 1727~1733

13 Zhe Song, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Packagable free-space optical crossbar network based on bypass-exchange switch[J]. *Optik*, 2003, **114**(11): 491~496

14 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization-independent bidirectional 3×3 optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1279~1284

杨俊波, 苏显渝. 与偏振无关的双向 3×3 光开关结构设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1279~1284

15 Song Zhe, Liu Liren, Ren Haixia *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 777~780

宋哲, 刘立人, 任海霞等. 单块晶体 2×2 光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 777~780

16 Jiang Minhua. *Crystal Physics* [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1980. 202~278

蒋民华. 晶体物理 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980. 202~278