

文章编号 1004-924X(2007)01-0050-07

扩展 BANYAN 网络的可重构 无阻塞 8×8 矩阵光开关

查 英^{1,2}, 孙德贵², 刘铁根¹, 张 鹰², 李小奇², 邓文渊², 江俊峰¹

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:在分析 CROSSBAR 网络(CN)和 BANYAN 网络(BN)结构的基础上,提出了一种新的扩展 BANYAN 网络(EBN)可重构无阻塞结构。以 8×8 矩阵光开关为例,分析了 EBN 结构的两种形式及其可重构无阻塞特性,给出了开关单元驱动逻辑。从理论上计算了 SiO_2 波导 EBN 结构矩阵光开关的光学损耗和功耗。对于 8×8 开关,插入损耗为 3.3 dB。按理论计算设计制作了 8×8 矩阵光开关,测得波导传输损耗为 0.1 dB/cm,光纤-波导耦合损耗为 0.5 dB/point。光开关插入损耗为 4.6 dB,平均串扰为 -38 dB,平均偏振相关损耗为 0.4 dB,开关平均功率为 1.6 W,响应时间约为 1 ms。实验结果与理论计算基本符合。

关键词:矩阵光开关;扩展 BANYAN 网络;可重构无阻塞;集成光学;二氧化硅波导

中图分类号: TN929.1; TN256 **文献标识码:** A

Rearrangeable nonblocking 8×8 optical matrix switch with extended BANYAN network

ZHA Ying^{1,2}, SUN De-gui², LIU Tie-gen¹, ZHANG Ying²,
LI Xiao-qi², DENG Wen-yuan², JIANG Jun-feng¹

(1. *Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical
Science of Ministry of Education, School of*

Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

*2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine
Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

Abstract: Based on the construction of the CROSSBAR network(CN) and the BANYAN network(BN), a new rearrangeable nonblocking construction called extended BANYAN network (EBN) was proposed. Taking the 8×8 optical matrix switch for example, two types of EBN construction and their rearrangeable nonblocking characteristics were studied, and the drive logic of switching units was provided. A SiO_2 waveguide 8×8 optical matrix switch was designed and fabricated according to the calculated insertion loss of 3.3 dB for 8×8 optical matrix switch. The SiO_2 waveguide propagation loss of

收稿日期:2006-07-06;修订日期:2006-11-03.

基金项目:中科院“百人计划”光通信器件研究项目资助

0.1 dB/cm and fiber-waveguide coupling loss of 0.5 dB/point were measured out. With the fabricated 8×8 optical matrix switch, optical insertion loss of 4.6 dB, average cross-talk of -38 dB, average polarization dependent loss of 0.4 dB, averaged switching power of 1.6 W, and response time of 1 ms were achieved. The experiment results are coincident with theoretical calculation well.

Key words: optical matrix switch; extended BANYAN network; rearrangeable nonblocking; integrated optics; silica waveguide

1 引言

全光通信网中最主要部分是光交叉连接(OXC)和光插分复用器(OADM),而矩阵光开关是 OXC 的核心器件,起着上下路信号和不同光路间交叉互连的作用,研究和开发大规模矩阵光开关是适应现代通信和信息处理系统的现实要求^[1-3]。光波导平面光波线路(PLC)技术利用波导材料的物理效应,无需移动部件,可在根本上克服传统机械及现代微电机系统(MEMS)技术的固有缺陷。其中硅基 SiO_2 光波导技术具有与现有成熟的半导体工艺技术兼容性好,传输损耗低,与光纤耦合效率高,且成本低廉等优点,在构建多端口矩阵光开关中,受到广泛重视和研究^[4,5]。但由于波导和网络结构的限制,器件尺寸和光学损耗一直是限制其发展的关键因素。

矩阵光开关的一种典型网络结构是 CROSS-BAR 网络(CN)。CN 网络由于结构简单和严格无阻塞特性,广泛应用于集成光学通信器件中^[6,7],尤其是大规模无阻塞矩阵光开关。然而,由于其过多的连接级数使器件的体积和光学损耗过大,从而限制了基于 PLC 技术矩阵光开关的发展。BANYAN 网络(BN)采用交叉连接结构,需要较少的开关单元和级联,器件尺寸和光学插损较小,因此构成大规模无阻塞矩阵光开关的研究也开始受到重视。然而,BN 结构是内部阻塞型网络,所以人们对 BN 结构进行了不同的变形或扩充,以构成无阻塞网络,但大多数结构都比较复杂,且级数仍较多^[8,9],或以增加内部连线^[10,11]为主要途径,结果增加了网络的总长度和开关路由选择的复杂性,且不适合器件的实际制作。

本文提出了一种扩展 BANYAN 网络(EBN)可重构无阻塞矩阵光开关结构。以 8×8 光开关为例,分析了该结构的可重构无阻塞开关特性,给出了开关单元驱动逻辑,分析了交叉互连对光学

损耗的影响,以及开关平均功耗。我们采用该结构制作了基于 PLC 技术的 SiO_2 波导 8×8 矩阵光开关,实验测试结果进一步证实了该结构在器件体积和光学损耗方面具有的独特优越性。

2 网络结构及特性分析

2.1 CN 和 BN 结构分析

图 1(a)和(b)分别为 $N=8$ 时 CN 和 BN 结构的示意图。可以看出,CN 结构需要更多的开关单元和级数,对 $N \times N$ 矩阵光开关,共有 $n_{cs} = N-1$ 级连线, N 级开关单元, N^2 个单元节点,光信号通过的开关单元数为 $n_{cc} = 2m-1, m=1, 2, \dots, N$,开关光学损耗和器件尺寸都较大,且不同信号通过的开关单元数不均匀,最多为 $2N-1$ 级^[12],但这一点可以通过增加虚设开关单元对光路进行补偿,改进光损耗的一致性,使所有光信号路径均为 $2N-1$ 级单元。这种结构的优点是没有任何交叉连接线,结构简单,且功耗较小。

图(b)为采用蝶形交叉的 BN 结构,对 $N \times N$ 矩阵光开关,共有 $n_{bs} = \log_2 N$ 级交叉连线, $n_{bc} = \log_2 N + 1$ 级开关单元, $N(\log_2 N + 1)$ 个单元节点,光信号通过的开关单元数均为 $\log_2 N + 1$ 。如 $N=8$ 时,CN 结构需要 8 级共 64 个开关单元,信号需通过 15 个开关单元,而采用 BN 结构,则只需要 4 级共 32 个单元,光信号从入端口到出端口只通过 4 个开关单元。随着 N 增大,在构成大规模矩阵光开关时,BN 结构的优势将更加明显。这种优势不只是单元数的减少,而是光学损耗和器件体积的大幅减小。图 1(b)中蝶形交叉的 BN 结构,交叉连线和节点沿横向依次表示为 $S_1, S_2, \dots, S_{n_{bs}}$ 级和 $C_1, C_2, \dots, C_{n_{bc}}$ 级,节点沿纵向按 $1 \sim N$ 顺序编号。设 k 表示第 C_i 级节点, k_s' 和 k_b' 分别表示沿直线和斜线方向与该节点相连的 C_{i+1} 级节点, $i=0, 1, \dots, \log_2 N$,则第 i 级蝶形交叉的节点连线关系为:

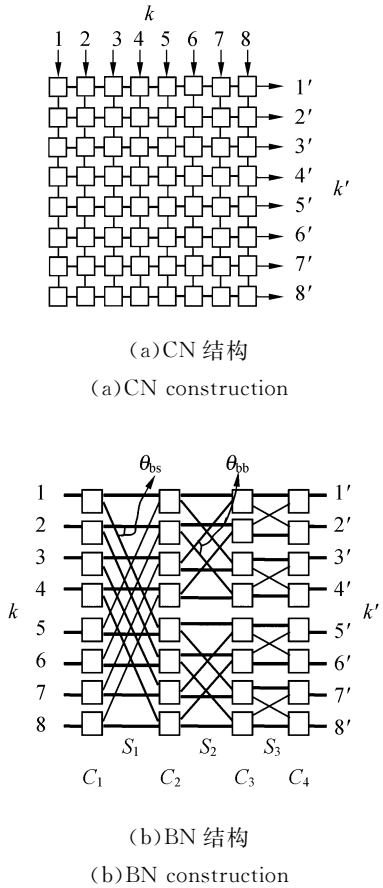


图 1 CN 和 BN 结构示意图

Fig. 1 Construction sketch of CN and BN

$$k_s' = k, \quad (1)$$

$$k_b' = \begin{cases} k + N/2^i & k < N/2^i \\ k - N/2^i & k > N/2^i. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $k=1, 2, \dots, N, i=1, 2, \dots, \log_2 N$,

δ_s 和 δ_b 分别表示 S_i 级直线和斜线两端连接的节点序号差值, 则

$$\delta_s = k_s' - k = 0, \quad (3)$$

$$\delta_b = k_b' - k = \begin{cases} N/2^i & k < N/2^i \\ -N/2^i & k > N/2^i. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $k=1, 2, \dots, N; i=1, 2, \dots, \log_2 N$

方程(3)代表所有直连线相互平行, 这是自然的, (4)说明在同一级连线, 所有同方向的斜连线也相互平行, 这对基于 PLC 技术的器件设计加工非常有利。在实际设计波导线路时, 通过合理设计波导两端的位置和弯曲, 避免了两条不同方向斜波导和一条直波导同时交叉的情况。因此只存在两种交叉, 即直波导和斜波导交叉以及两反方向斜波导交叉, 交叉角分别为 θ_{bs} 和 θ_{bb} , 显然有 $\theta_{bs} = \theta_{bb}/2$, 两种交叉角损耗分别表示为 $L_{inter}(\theta_{bs})$ 和 $L_{inter}(\theta_{bb})$ 。

由图 1(b)BN 结构容易看出, 对第 S_i 级按上下两个方向交叉的 N 条斜波导, 每条波导均分别与另一个方向的 $N/2^i$ 条斜波导相交, 与 $N/2^i - 1$ 条直波导相交, 分别用 $n_{inter}(\theta_{bb})$ 和 $n_{inter}(\theta_{bs})$ 表示这两种交叉的交叉点数, 即

$$n_{inter}(\theta_{bb}) = N/2^i \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$n_{inter}(\theta_{bs}) = N/2^i - 1 \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

则第 S_i 级的两种交叉角光损耗分别为

$$L_{inter}(\theta_{bb}) = L(\theta_{bb}) \cdot n_{inter}(\theta_{bb}), \quad (7)$$

$$L_{inter}(\theta_{bs}) = L(\theta_{bs}) \cdot n_{inter}(\theta_{bs}). \quad (8)$$

$L(\theta_{bb})$ 和 $L(\theta_{bs})$ 分别为单个交叉角的光损耗, BN 结构中总交叉角损耗为

$$TL_{inter} = \sum_{i=1}^n L_{inter}(\theta_{bb}) + \sum_{i=1}^n L_{inter}(\theta_{bs}), \quad (9)$$

BN 结构的开关损耗为

$$TL_{switch} = n_{MZI} L_{MZI}, \quad (10)$$

其中, L_{MZI} 为单个 MZI 开关单元损耗, n_{MZI} 为信号经过的 MZI 开关单元数。设 MZI 单元平均长度为 l_{MZI} , 波导传输损耗为 L_{prop} , 则总传输损耗为

$$TL_{prop} = n_{MZI} l_{MZI} L_{prop}, \quad (11)$$

从而, 得蝶形 BN 结构的 $N \times N$ 矩阵光开关的插入损耗为

$$IL = TL_{inter} + TL_{switch} + TL_{prop} + 2L_{WFC}, \quad (12)$$

L_{WFC} 为波导-光纤耦合损耗。

利用 OptiBPM 软件对波导交叉进行了仿真, 交叉角损耗随交叉角变化曲线如图 2 所示, 可以看出交叉损耗随角度增大下降很快, $\theta_{bs} = 30^\circ$ 时, $L_{inter}(\theta_{bs}) = 0.09$ dB, $L_{inter}(\theta_{bb}) < 0.01$ dB。而三条波导同时交叉时, 损耗比两条波导交叉要大很多, 这也是设计时避开三条波导交叉的原因。

根据所制作器件的测量值, SiO_2 波导传输损耗 $L_{prop} = 0.1$ dB/cm, 波导-光纤耦合损耗 $L_{WFC} = 0.5$ dB/point, 开关单元损耗 $L_{MZI} = 0.40$ dB, 单个开关单元长度 $l_{MZI} = 1.0$ cm, 根据式(3)~(8), 分别计算 BN 和 CN 结构的插损 IL 与矩阵端口数 N 的关系曲线, 如图 3 所示。随着端口数增加, BN 结构的光学损耗增加比 CN 结构要缓慢的多, 在外观上则表现为器件的体积增加幅度的不同, 体现出这种结构的优越性。

从网络拓扑结构看, CN 属于严格无阻塞结构, 任何入端口的光信号可以同时从不同出端口分别输出, 而 BN 属于内部阻塞型结构, 不同路信号可能会同时经由相同的节点, 却无法任选其中

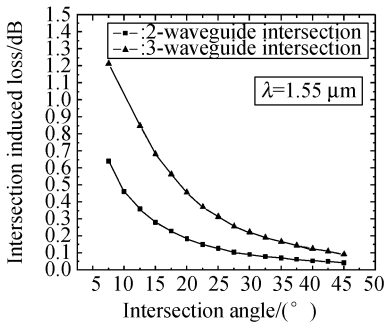


图 2 交叉光损耗与交叉角 θ_{bs} 关系曲线

Fig. 2 Curve of intersection optical loss vs intersection angle θ_{bs}

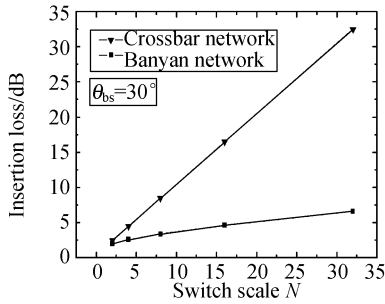


图 3 插入损耗与端口数 N 关系曲线

Fig. 3 Curve of insertion loss vs switch scale N

一个信号通过。如当从 1 和 5 端口输入的信号分别从 1 和 2 端口输出时,将会在 C_2 列 1 节点处发生阻塞。进一步分析将会发现,对于图 1(b) 所示的 8×8 结构来说,只有出现下列情形时才会发生阻塞,即从序号差值为 4 的两个入端口输入的光信号,分别从 1 和 2,或 3 和 4,或 5 和 6,或 7 和 8 端口输出时,会在 C_2 列节点处发生阻塞,这是由其拓扑结构所决定的。为避免出现这种情形,对 BN 结构进行了扩展,使入端口到出端口的通路不再唯一。

2.2 EBN 结构分析

图 4 为 EBN-I 型结构的 8×8 矩阵光开关示意图。EBN-I 型将 BN 结构除 S_1 级的部分在横向扩展成对称形式,扩展后 $N \times N$ 网络结构的单元级数为 $2\log_2 N - 1$, 光开关单元数为 $N(2\log_2 N - 1)$, 从每个入端口输入的光信号都有 $N/4$ 条通路到达输出端口。当不同光信号在中间某个节点发生阻塞时,可通过改变信号路由,来消除网络内部阻塞。

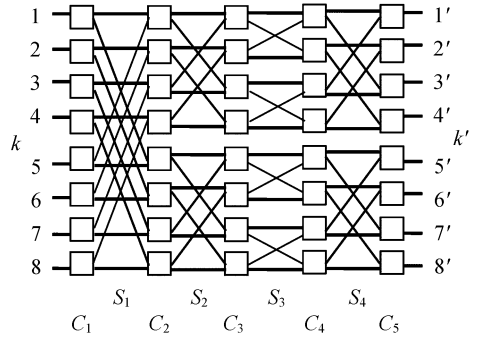


图 4 EBN-I 型结构示意图

Fig. 4 EBN-I construction

网络在 S_2 级被分成上下两组,在 S_3 级按从上到下又被分成 I~IV 四组,仅考虑 S_2 级的上一组。当从 C_1 级端口号为 k 和 $k+4$ ($k=1,2,3,4$) 的两个节点输入的信号,分别从 C_5 级 k' 和 $k'+1$ ($k'=1',3'$) 节点输出时,如果分别从 S_3 级的 I 和 II 两组通过,则会消除上述阻塞现象。为简化逻辑,将从 $k'=1',3'$ 端口输出的信号,固定地经由 S_3 级的 I 组和 II 组到达输出端,一般情况下,从 $k'=2',4'$ 端口输出的信号也分别经由 S_3 级的 I 组和 II 组到达输出端。当出现上述的阻塞情况时,将从 $2'$ 和 $4'$ 端口输出的信号分别变为经由 S_3 级的 II 组和 I 组。对从 $5' \sim 8'$ 端口输出的信号也可同样处理。

设向量 $\mathbf{I}(1 \times 8)$ 和 $\mathbf{O}(1 \times 8)$ 分别表示输入输出端口, $M(i) = |I(2i) - I(2i-1)|$ ($i=1,2,3,4$)。向量 $\mathbf{F}(1 \times 8)$ 标记信号经由的路径,按信号在 C_4 级节点输出端走直线和斜线分别标记为 1 和 2。 $\mathbf{R}(8 \times 5)$ 表示节点矩阵, $R(m,n) = 1$ 表示第 m 行 n 列开关单元加电驱动。求取 $R(m,n)$ 的逻辑流程如图 5 所示。

图 6 所示为 EBN-II 型结构的 8×8 矩阵光开关示意图,与 I 型的区别是将 S_4 级换成 S_1 级形式。一般情况下,从 $1' \sim 4'$ 端口和 $5' \sim 8'$ 端口输出的信号,分别经由 S_1 级的上半和下半部分,发生阻塞时,需将从端口 k' 和 $k'+4$ ($k'=2$ 或 4) 输出的信号变成分别经由 S_1 级的下部和上部通过。其逻辑流程与 I 型类似,在此不再重复。

对 8×8 矩阵光开关,可以预先确定每对入出端口之间信号的两种可能路径经由的开关单元

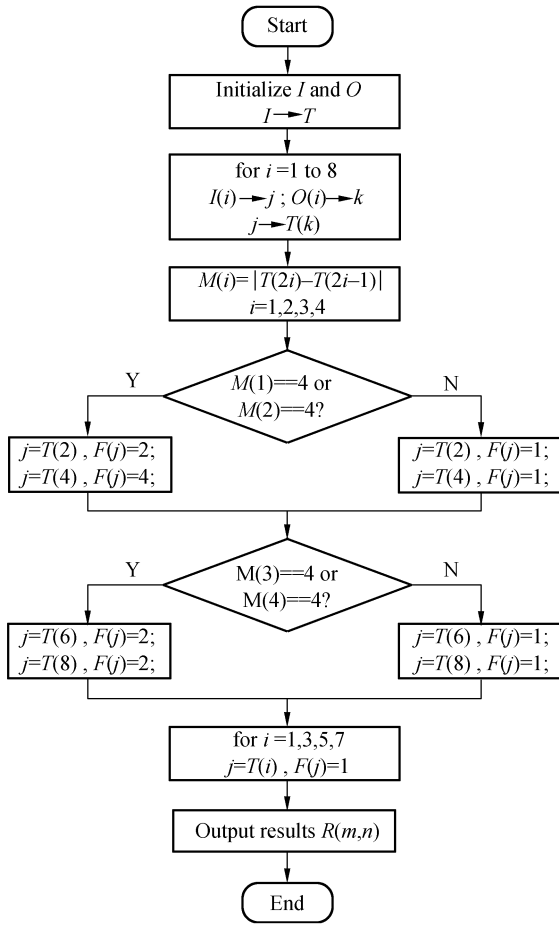


图 5 开关驱动逻辑流程图

Fig. 5 Flow diagram of switching driver

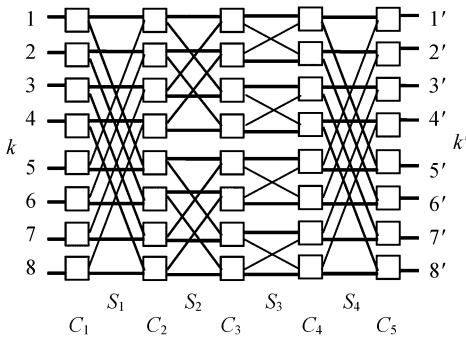


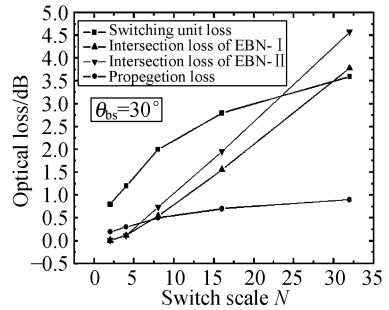
图 6 EBNI-II 型结构示意图

Fig. 6 EBNI-II construction

on/off 状态,生成开关单元状态表。进行开关状态切换时,由上述的逻辑流程找出各信号通过的路径,然后查找状态表即可得到各单元节点的状态矩阵 $R(m, n)$,并生成控制信号,由驱动电路来驱动开关单元实现开关动作。

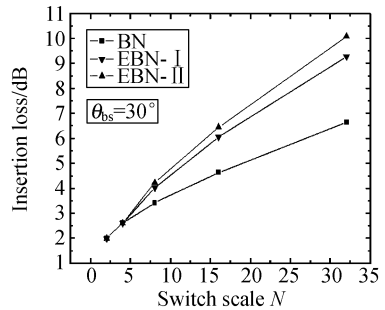
3 理论计算及实验结果

根据前面的分析,对 EBNI-I 型和 II 型结构与 BN 结构的光学插损进行了比较。图 7(a)为结构中不同损耗分别所占的权重,图 7(b)为不同结构的插损随 N 的变化曲线。可以看出,EBN 结构中的主要光学损耗为开关单元损耗和交叉损耗,且随着端口数增加,交叉损耗所占比重越来越大,EBN 与 BN 结构的光学损耗差值也进一步扩大,但 I 型结构的损耗增加幅度比 II 型要小。与图 3 比较可以看出,相对于 CN 结构来说,EBN 结构的光学损耗仍要小得多。



(a) 不同光损耗随 N 变化曲线

(a) Optical loss vs N



(b) 插入损耗随 N 变化曲线

(b) Insertion loss vs N

图 7 光学损耗随 N 变化曲线

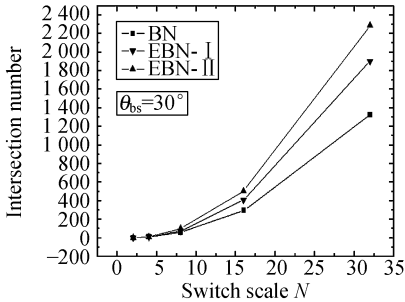
Fig. 7 Optical loss vs N

BN 和 EBN 结构的交叉点数和交叉损耗随 N 变化情况分别如图 8(a)和(b)所示。可以看出, N 越大,交叉点数和交叉损耗增加越快,交叉损耗对插损的影响也越大,但 EBNI-I 型总比 II 型结构的损耗要小。

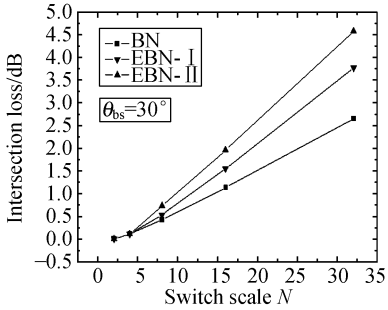
图 9 为两种结构当 N 路开关同时工作时的功耗随端口数变化的曲线,端口数越大,功耗增加

得也越快。对 8×8 矩阵光开关,总功率约为 10 W,平均开关功耗 1.2 W/ch,相对于 CN 结构偏大。

利用 EBN-I 型结构,设计制作了基于 PLC 的 SiO_2 波导 8×8 矩阵光开关。芯层和包层折射率差为 0.75%,波导截面尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,开关单元长度为 1.0 cm,器件长度为 5.5 cm。在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 测得波导传输损耗 0.1 dB/cm,波导-光纤耦合损耗 0.5 dB/point。



(a)交叉点数随 N 变化曲线
(a) Intersection number vs N



(b)交叉损耗随 N 变化曲线
(b) Intersection loss vs N

图 8 交叉点及交叉损耗随 N 变化曲线

Fig. 8 Intersection number and intersection loss vs switch scale N

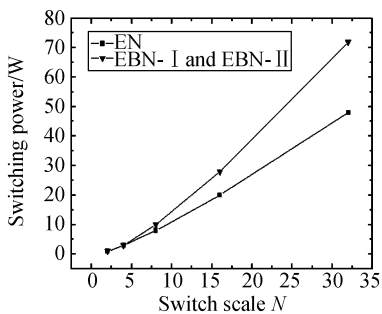


图 9 功耗随 N 变化曲线

Fig. 9 Power consumption vs N

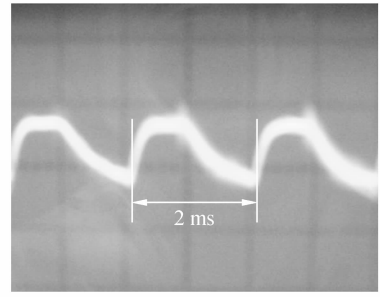


图 10 响应时间

Fig. 10 Response time

图 10 为测试响应时间示波器截图,开关上升时间和下降时间分别约 0.8 ms 和 1 ms。通道间最大和最小串扰分别为 -31.64 dB 和 -52.32 dB ,平均串扰约 -38 dB ,平均偏振相关损耗约 0.4 dB,单通道平均功耗约 1.6 dB。表 1 列出了部分测试数据,信号从端口 4 输入,分别从端口 1~8 输出。其中,不同通道开关功耗相差较大,是因为不同通道之间和同一通道的不同路径要求的加电单元数都不同。

表 1 8×8 矩阵光开关测试数据

Tab. 1 Measured data of 8×8 optical matrix switch

通道	插入损耗 (dB)	偏振相关损耗 (dB)	开关功耗 (W/ch)
4-1'	4.19	0.40	1.65
4-2'	4.16	0.43	1.28
4-3'	4.31	0.51	1.32
4-4'	5.02	0.26	1.75
4-5'	4.27	0.49	1.25
4-6'	5.26	0.34	1.26
4-7'	5.64	0.53	1.29
4-8'	4.55	0.29	1.71

4 结 论

本文提出的扩展 BANYAN 网络为可重构无阻塞型结构,大大减少了单元级数,减小了器件尺寸和光学插入损耗,无需转弯就可在 4 inch 硅片上实现 8×8 矩阵光开关,可有效降低器件制作成本。本文就两种扩展型 BANYAN 网络的结构特点对由其所构成的可重构无阻塞 8×8 矩阵光开关的光学损耗等主要性能进行了系统研究,给出了支配开关操作的驱动程序,计算结果和实验测

试结果基本一致。同时从理论和实验上都证明了基于 BANYAN 网络的矩阵光开关在器件尺寸和光学损耗方面较现在所普遍应用的 CROSSBAR 网络具有很大的优越性。需要指出的是,信号通

过该网络时,其路由由动态选择的一般性数学关系尚需要进一步研究,使该网络结构的应用更具有一般性意义。

参考文献:

- [1] 孙学康,张金菊. 光纤通信技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社. 2001:317-318.
SUN X K, ZHANG J J. *Fiber communication technology*[M]. Beijing: People Posts and Telecommunications Publishing House. 2001. (in Chinese)
- [2] 刘爱莲,龙华,谢涛. 全光通信技术及发展现状[J]. 云南民族大学学报,2005,14(1):21-23.
LIU A L, LONG H, XIE T. Overview on all-optical communications and its developmen [J]. *J. Yunnan National. Univ.*, 2005, 14(1): 21-23. (in Chinese)
- [3] 孙德贵,刘志福, Ho Seng-Tiong, 等. 自聚焦超晶格波导电光调制器[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 386-392.
SUN D G, LIU Z F, HO S T, *et al.*. Eletro-optic modulator with self-assembled superlattite waveguides[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 386-392. (in Chinese)
- [4] 马卫东,刘青,胡国华,等. 平面光波导技术及实用器件[J]. 光纤通信技术, 2003, (7): 27-28.
MA W D, LIU Q, HU G H, *et al.*. Planar lightwave circuit technology and practical part [J]. *Fiber Comm. Technol.*, 2003, (7): 27-28. (in Chinese)
- [5] 李晓滨,解成俊,郭玉斌,等. 光 CDMA 技术及其应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 487-493.
LI X B, XIE CH J, GUO Y B, *et al.*. Optical eode division multiple access technology and its applications[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 487-493.
- [6] PAPANIMITRIOU G I, PAPAZOGLU C, POMPORTIS A S. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, 21(2), 384-405.
- [7] RAMASWAMI R, SIVARAJAN K N. *Optical networks*[M]. Academic, San Francisco, Calif. 1998.
- [8] ADAMS G B, SIGEL H J. The extra stage cube: A fault tolerant interconnection network for supersystems [J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1982, 31(5): 443-445.
- [9] RAGHAVENDRA C S, VARMA A. Fault-tolerant multiprocessors with redundant path interconnection networks [J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1986, 35(4): 307-316.
- [10] TZENG N F, YEW P C, ZHU C Q. A fault-tolerant scheme for multistage interconnection networks: Parallel Processing [C]. *Proc. Int. Conf.*, 1985, (1): 368-375.
- [11] KUMAR V P, REDDY S M. Augmented shuffle-exchange multistage interconnection networks [J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1987, (6): 30-40.
- [12] EAMSHAW M P, SOOLE J B D, CAPPUZZO M, *et al.*. 8×8 optical switch matrix using generalized Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(6): 810-812.
- [13] SUN D G, DENG W Y, E S L, *et al.*. Study for performance of the thermo-optic matrix switches with flexible switching units and Banyan networks [J]. *Opt. Eng.*, 2006, 45(1): 014-602.

作者简介:查 英(1980—),男,安徽怀宁人,天津大学在读博士研究生,主要从事光波导器件、光开关等方面的研究。E-mail: hawkzha@163.com