

文章编号: 0258-7025(2003)01-0033-05

基于偏振的光矩阵开关

胡巧燕, 曹明翠, 罗风光

(华中科技大学激光技术与工程研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了一种新型的基于偏振的光矩阵开关方法, 通过控制光的偏振态实现严格无阻塞连接。以 4×4 光矩阵开关为例, 详细给出了其节点开关和交换网络的实现方案。并对该 4×4 光矩阵开关进行实测, 证明该方法制作的小规模光矩阵开关具有插损低, 串话小, 开关时间中等, 性能稳定, 工艺成熟等特点。

关键词 光纤通信技术; 光矩阵开关; 偏振; 光交叉互连

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Optical Matrix Switch Based on Polarization

HU Qiao-yan, CAO Ming-cui, LUO Feng-guang

(*Institute of Laser Technology and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract A novel method to fabricate optical matrix switch based on polarization is presented, by controlling polarization states of signal beams to obtain non-blocking cross-connect. The detailed implementation of the node switches and the switching network are given. A 4×4 optical matrix switch fabricated with this method is tested, and the experiment result demonstrates that it characterizes by low insertion loss, low cross-talk, medium switching speed (ms), performance stability and technology maturity, which is quite suitable for small-sized optical matrix switch.

Key words fiber communication technique; optical matrix switch; polarization; OXC

1 引言

密集波分复用(DWDM)技术实现了一根光纤数 Tb/s 的光传输,随之而来的问题是对 DWDM 光通道信号的有效控制与管理,以建立具有高度灵活性和生存性的 DWDM 光网络。光矩阵开关是实现 DWDM 光网络的关键器件,各国对此进行了广泛而深入的研究。目前主要采用的技术有基于机械开关^[1],波导^[2,3],半导体光放大^[4],微电子机械系统(MEMS)^[5]等。本文提出了一种基于偏振的光矩阵开关,它具有插损低、串话小、偏振无关等特点。

2 原理

光矩阵开关需实现 N 个输入端口到 N 个输出

端口无阻塞连接。本文以 4×4 光矩阵开关为例来说明该实现方法。该器件包含三部分:输入模块、输出模块和光交换网络模块。其中输入/输出模块结构相同,由带尾纤的准直器排成一维阵列。准直器由 $1/4$ 节距的渐变折射率(GRIN)透镜和单模光纤组成。

光交换网络的构成含有三大要素:节点间的互连级、开关节点元件和网络的控制算法及方式。本文采用的 4×4 光交换网络拓扑结构如图 1 所示,具有严格无阻塞特性。图中的每个小方块表示一开关节点,小方块间的连线表示互连级。共 4 级开关节点和 4 级互连级形成输入光通道 $[I_1, I_2, I_3, I_4]$ 到输出光通道 $[O_1, O_2, O_3, O_4]$ 无阻塞路由。其中第 1 与第 2 开关节点级和互连级构成路由扇出网络,对

收稿日期:2001-10-23; 收到修改稿日期:2001-12-21

基金项目:国家自然科学基金(60177023)资助项目。

作者简介:胡巧燕(1974—),女,湖北人,华中科技大学激光技术与工程研究院博士生,主要从事光纤通信网络无源器件与系统的研究。

每个输入光通道 I_i 形成 4 个平行光通道 [$I_iO_1, I_iO_2, I_iO_3, I_iO_4$] ($i = 1, 2, 3, 4$, 下同), I_i 选择其中的一个通道。第 3 与第 4 开关节点和互连级构成路由扇入网络, 对平行光通道 [$I_1O_i, I_2O_i, I_3O_i, I_4O_i$] 进行合束, 形成 O_i 输出光通道。这样, 任何一路输入光通道信号 I_i , 均可选择一个输出光通道作为其目的输出端口。通过合理控制各级开关节点状态, 即可实现 4×4 严格无阻塞交叉连接。

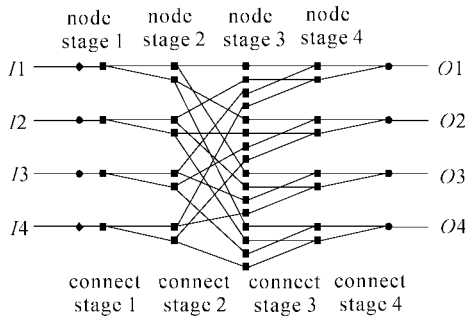


图 1 4×4 光交换网络拓扑结构

Fig. 1 Topology of 4×4 optical switching network

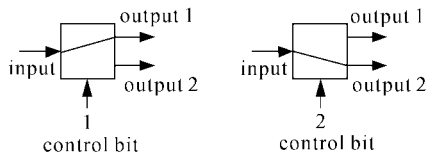


图 2 1×2 型节点开关逻辑

Fig. 2 Logic of 1×2 node switch

路由扇出网络中的节点开关均为 1×2 型, 其逻辑如图 2 所示, 1 bit 控制位确定选择两路输出通路中的一路。路由扇入网络中使用的节点开关为 2×1 型, 需要 2 bits 控制位确定 4 种选路状态: 只有输入 1 选通, 只有输入 2 选通, 输入 1 和输入 2 同时选通且被合束, 两个输入通路均不被选通, 其逻辑如图 3 所示。

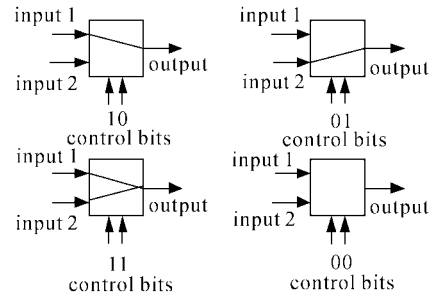


图 3 2×1 型节点开关逻辑

Fig. 3 Logic of 2×1 node switch

3 实现方法

光矩阵开关由 6 部分组成。在三维直角坐标系中, 4×4 光矩阵开关的实现方法如图 4 所示。输入模块 I 由 4 个光纤准直器沿 X 方向排成一维阵列, 输出模块 VI 的 4 个光纤准直器则沿 Y 方向排成一维阵列。光交换网络模块由偏振控制模块 (II 和 V), 路由扇出模块 III, 路由扇入模块 IV 组成。

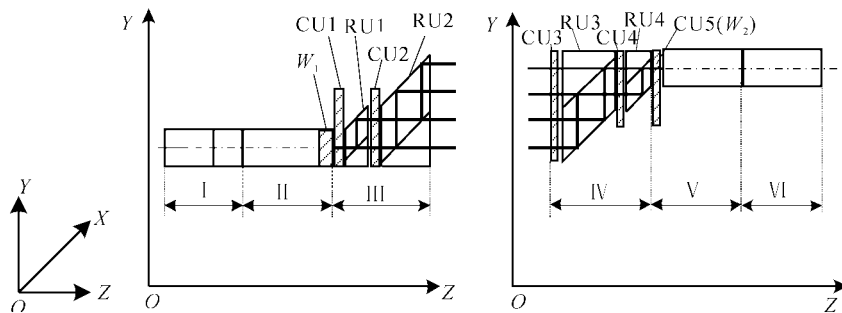


图 4 4×4 光矩阵开关的实现方法

Fig. 4 Implementation of 4×4 optical matrix switch

该方法中利用控制光的两个互相垂直的偏振态来实现光信号的路由扇出和路由扇入。由于从光网络进入光交叉连接矩阵的信号光均为随机偏振光, 因此需要用偏振控制模块将输入的随机偏振光变为线偏振光。

入射的 4 束随机偏振信号光沿 X 轴形成一维阵列 [I_1, I_2, I_3, I_4], 准直输入模块 I 对输入光束进行准直, 再经偏振控制模块 II 变为线偏振光, 路

由扇出模块 III 为每一路信号光 I_i 在 Y 方向提供 4 个可能的平行通道 [$I_iO_1, I_iO_2, I_iO_3, I_iO_4$], 其中的节点开关状态决定该 I_i 选定哪一个 O 通道, 且 I_1, I_2, I_3, I_4 所选的 O 通道各不相同。路由扇入模块 IV 沿 X 方向将各信号光束引导至相应的输出通道 O_i 。 O_1, O_1, O_3, O_4 沿 Y 轴排成一维阵列。偏振控制模块 II 与 V 配对使用, 用以提高输出端光耦合效率。输出光束再经输出 $1/4$ 节距渐变折射率透镜阵列 V

耦合至输出光纤。

下面具体介绍各部分的实现方法。

3.1 偏振控制模块

将随机偏振光变为线偏振光最简单的方法是使用起偏器,但这种方法有两个缺点。其一是能量利用率不高,输入光中与起偏方向正交的偏振分量被损耗。其二是该方法将引入相当大的偏振相关损耗,当输入光的偏振方向平行于起偏方向时,输入光能量几乎无损耗通过,但是当输入光的偏振方向与起偏方向正交时,输入光则几乎完全被损耗。对于光通信系统,应尽量降低光器件的插入损耗和偏振相关损耗。

利用如图 5 所示的方法实现将随机偏振光变为线偏振光,其中 C_1, C_2 为 YVO_4 晶体, W_1, W_2 为 $\lambda/2$ 延迟器。随机偏振光垂直入射于 YVO_4 晶体 C_1 , 可分解为电矢量平行于入射面的 e 光, 和电矢量垂直于入射面的 o 光。其中 e 光束以一小角度偏转, 垂直晶体 C_1 出射; o 光束将沿着原传播方向行进, 并经过 W_1 变为 e 光束。这样原来入射的一束随机偏振光则变成了两束空间分开微小距离且偏振状态相同的两束平行 e 光束。经过后面的路由扇出模块 III 和路由扇入模块 IV 时, 来自同一束输入信号光的两 e 光束作为整体同时通过各个节点开关。输出端 W_2 将该两束光恢复为正确的偏振态, 一束 o 光, 一束 e 光; 晶体 C_2 将它们合并为一束输出光, 以实现与输出 $1/4$ 节距渐变折射率透镜高效率耦合。 $\lambda/2$ 延迟器 W_1 与 W_2 实现方法不同, 其中 W_1 是静态的, 可由一片 $\lambda/2$ 波片实现; W_2 需由 1 bit 控制位来控制其工作状态: 1) 控制位设置为“1”, 保持上面一束线偏振光束的偏振态, 将下面一束线偏振光的偏振方向旋转 90° , 或 2) 控制位设置为“0”, 保持下面光束的偏振态, 而对上面光束的偏振方向旋转 90° 。该方法对输入信号光的能量利用率高, 且当输入光偏振态改变时, 其影响只是改变能量在两束光之间的分配, 而不会引起过高的偏振相关损耗。

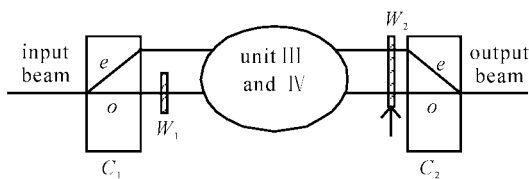


图 5 偏振控制器

Fig. 5 Polarization controller

3.2 节点开关

1×2 节点开关的原理图如图 6(a) 所示, 它由控

制单元和路由单元组成。输入线偏振光为 p 光(电矢量振动方向沿 Y 轴) 或 s 光(电矢量振动方向沿 X 轴)。控制单元对入射信号光改变 $\pi/2$ 位相, 或维持入射信号光的偏振态。路由单元由一个平行四边形棱镜和一个梯形棱镜胶合而成, 其胶合面镀有 PBS (polarization beam splitter) 膜。信号光束垂直入射路由单元, p 光将直接透过该 PBS 膜层, 从输出端口 2 出射; s 光则被 PBS 膜向上反射, 再经一次全反射, 从输出端口 1 出射。因此通过设置控制单元的控制位, 即可实现输入信号的选路。若将 2 个这样的开关级连, 即可实现 1 个输入到 4 个输出端口的路由扇出, 如图 6(b) 所示。

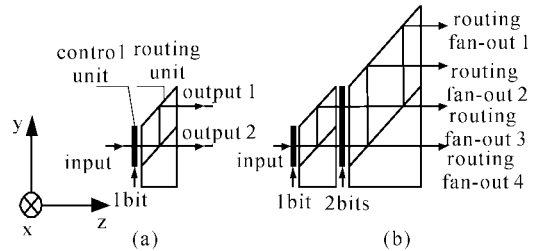


图 6 (a) 1×2 节点开关原理; (b) 1×4 路由扇出

Fig. 6 (a) Principle of 1×2 node switch;

(b) 1×4 routing fan-out network

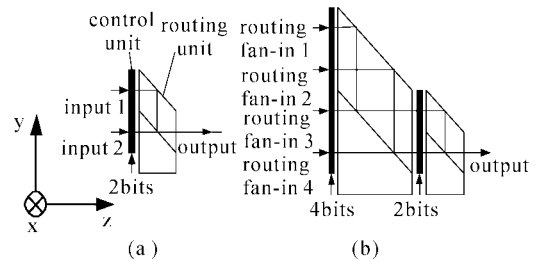


图 7 (a) 2×1 节点开关原理; (b) 2×1 路由扇入

Fig. 7 (a) Principle of 2×1 node switch;

(b) Routing 2×1 fan-in network

2×1 节点开关的原理图如图 7(a) 所示, 其路由单元的结构与 1×2 节点开关的相同, 两个控制单元对两个输入光信号分别控制。若输入 1 需被选通, 当入射光为 p 光时, 设置控制单元将该 p 光变为 s 光; 当入射光为 s 光, 则设置控制单元保持该偏振方向。若输入 2 需被选通, 当入射光为 p 光, 设置控制单元维持该偏振态; 当入射光为 s 光, 则设置控制单元将其变为 p 光。同样道理, 若将 2 个这样的开关级连, 即可实现 4 个输入到 1 个输出端口的耦合扇入, 如图 7(b) 所示。

其中控制单元的实现方法有两种, 其一是使用铁电液晶 (FLC), 其二是移动 $\lambda/2$ 波片阵列。我们采

取移动 $\lambda/2$ 波片列阵的方法来实现对节点开关的控制,控制原理如图 8 所示。 $\lambda/2$ 波片列阵由 $\lambda/2$ 波片和玻璃片组成。当控制位为 1 时,使 $\lambda/2$ 波片对准光路,入射的线偏振光的偏振方向旋转 90° ;当控制位

为 0 时,使玻璃片对准光路,则保持入射线偏振光的偏振方向不变。波片的平移动作可通过继电器实现,开关速度可达 ms 量级。

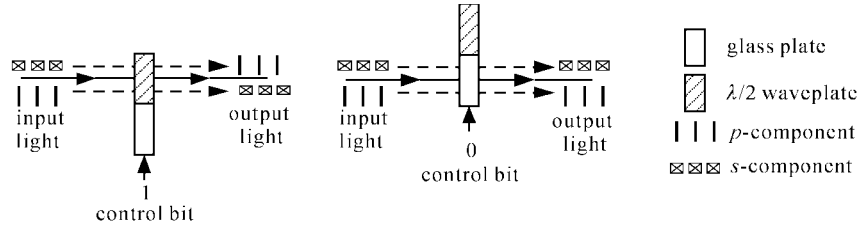


图 8 控制单元实现方法

Fig. 8 Implementation of the control units

表 1 4×4 光矩阵开关控制单元状态

Table 1 States of control units in 4×4 optical matrix switch

Input	CU1			CU2			CU3				CU4				CU5				Output
	11	11	12	11	12	13	14	31	32	33	34	41	42	43	44				
I1	0	0		0				0				0				O1			
	1		1		0				0				0			O2			
	0	1				1				0				0		O3			
	1		0				1				0				0	O4			
I2	21	21	22	21	22	23	24	41	42	43	44	41	42	43	44				
	0	0		0				1				1				O1			
	1		1		0				1				1			O2			
	0	1				1				1				1		O3			
I3	31	31	32	31	32	33	34	31	32	33	34	41	42	43	44				
	0	0		1				1				0				O1			
	1		1		1				1				0			O2			
	0	1				0				1				0		O3			
I4	41	41	42	41	42	43	44	41	42	43	44	41	42	43	44				
	0	0		1				0				1				O1			
	1		1		1				0				1			O2			
	0	1				0				0				1		O3			
I4	1		0				0				0				1	O4			

对于 4×4 光矩阵开关,图 4 中各控制单元(CU)状态如表 1 所示。从中可以看出,无论交叉连

接状态如何,CU3 的 16 个控制单元均只有一种状态,这意味着 $\lambda/2$ 波片阵列是静态的,无需移动,不必使用继电器控制。设计 CU3 如图 9 所示,由 2 块 $\lambda/2$ 波片和 2 块玻璃片组成,每片 $\lambda/2$ 波片和玻璃片均对应 4 个控制单元。此外,CU5 并不属于路由扇出和路由扇入模块,而与图 5 所示偏振控制器中 W_2 对应,由于该 $\lambda/2$ 延迟片阵列也可由移动 $\lambda/2$ 波片阵列实现,将其控制单元状态也列于该表中,但 CU5 与 CU1~CU4 控制位设置值含义不同,其定义见前

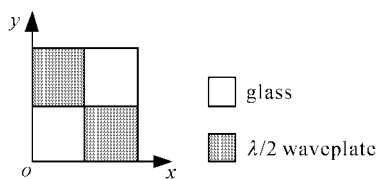


图 9 控制单元 CU3 的设计

Fig. 9 Design of switching array CU3

面相关部分所述。

4 实验与结论

利用这种方法实现了 4×4 光矩阵开关, 实验模块照片如图 10 所示。利用高精度 V 型槽将输入/输出光纤准直器排成一维阵列, 相邻准直器间距



图 10 4×4 光矩阵开关实验模块

Fig. 10 Experiment module of 4×4 optical matrix switch

1.8 mm, 间距位置误差小于 $2 \mu\text{m}$, 准直距离为 60 mm。实验中所用 $\lambda/2$ 波片均为零级波片, 带宽大于 40 nm, 消光比高于 34 dB。PBS 膜性能优良, 对于 p 偏振光束, 透过率为 98.9%, 其 s/p 对比度达 -32.3 dB; 对于 s 偏振光束, 反射率为 98.1%, 其 p/s 对比度达 -32.5 dB。所有光学元件工作中心

波长为 1550 nm。器件中所有光学元件的装配、调试均在 CCD 监控系统下进行, 以保证输入到输出的高耦合效率。实验测得整个 4×4 光矩阵开关插入损耗为 2.1 dB。通道间串话最低可达 -62.44 dB, 最高却达到 -19.32 dB, 但通过进一步改进工艺可降低。开关时间约为 10 ms。

利用该方法制作光矩阵开关可由 4×4 扩展至 8×8 , 16×16 。具有插损低、串话小、开关时间中等 (ms 量级) 等特点, 且使用的是目前已经成熟的工艺, 性能稳定, 易于作为产品进一步开发。

参 考 文 献

- 1 Toshiaki Katagiri, Yahei Koyamada. Non-blocking 100×100 optomechanical matrix switch [J]. *J. Opt. Comm.*, 1993, **14**(4):122~127
- 2 H. Okayama, M. Kawahara. Prototype 32×32 optical switch matrix [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(14):1128~1129
- 3 Louay Eldada, Robert Norwood, Robert Blomquist *et al.*. Thermo-optically active polymeric photonic components [C]. OFC'2000, WH1-1~WH1-3
- 4 Ehrhardt Armin, Eisett Michael, Gerd Grosskopf *et al.*. Semiconductor laser amplifier as optical switching gate [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(8):1287~1295
- 5 D. T. Neilson, V. A. Aksyuk, S. Arney *et al.*. Fully provisioned 112×112 micro-mechanical optical crossconnect with 35.8Tb/s demonstrated capacity [C]. OFC'2000, PD12-1~PD12-3