

# Crossbar 光交换网络

侯培培 职亚楠 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** Crossbar 网络是实现高速并行光学处理的一种最重要而有效的光交换网络结构。作为一种无阻塞网络, Crossbar 网络具有简单性, 易于实现控制, 适合于构成光开关矩阵。总结和分析了近 20 多年来发展的 Crossbar 光交换网络, 介绍了不同 Crossbar 光交换网络的原理、结构和性能, 分析了 Crossbar 光交换网络的关键技术。目前光学互连网络的发展方向是实现集成大规模光互连。可以预见光学互连网络会朝着更加实用化的方向发展, 并在其应用领域发挥越来越重要的作用。

**关键词** 光通信; 全光网络; Crossbar 网络; 光开关矩阵

**中图分类号** O731      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/LOP50.010003

## Crossbar Optical Switching Network

Hou Peipei Zhi Yanan Sun Jianfeng Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Crossbar network is one of the most important and effective structures to achieve high-speed parallel optical processing in optical switching networks. As a non-blocking network, crossbar network is simple, easy to control, and suitable for forming optical switch matrix. We summarize and analyze crossbar optical switching networks on the recent development for more than 20 years, describe the various crossbar principles, structures and properties of optical switching networks, and analyze the crossbar key technologies for optical switching network. The recent development direction of optical interconnection network is to achieve integrated large-scale optical interconnection. It is predictable that optical interconnection network will become more practical and play an increasingly important role in its application areas.

**Key words** optical communications; all-optical network; crossbar network; optical switch matrix

**OCIS codes** 060.1155; 060.4510; 060.6719; 190.4360

## 1 引言

高速并行光学互连网络具有传输信息速度快、通道间无电磁干扰等特点, 能够实现自由空间三维光互连, 具有很高的互连密度和互连带宽。从 20 世纪 70 年代光学传输和非线性材料取得重大进展以来, 人们对光互连及光学互连网络展开了广泛的研究。Goodman 等<sup>[1]</sup>指出光互连在计算机系统中将具有重要作用和重大意义, 为光信息处理的发展展示了广阔的前景<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代是光信息处理研究的大发展时期, 光学互连网络充分发挥了光束并行传输的特点, 特别是能够实现自由空间三维光互连, 打破了传统电子互连网络的平面或准平面互连的限制, 因而具有很高的互连密度和互连带宽。光学互连网络引起世界各先进工业国家的高度重视, 美国、西欧、日本和苏联等国家和地区都制定了庞大的研究计划, 许多著名的大学、实验室都投入大量人力和财力, 从基本逻辑器件、光互连到处理单元和系统结构等方面展开了广泛而深入的研究<sup>[3~5]</sup>。到 20 世纪 90 年代国际上已经研制成一些初步接近实用的光学信息处理系统<sup>[6~9]</sup>, 目前光学互连

**收稿日期:** 2012-07-17; **收到修改稿日期:** 2012-09-13; **网络出版日期:** 2012-11-27

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(60708018, 60908029), 上海市自然科学基金(09ZR1435300)和中国科学院“院长奖获得者”科研启动专项资金资助课题。

**作者简介:** 侯培培(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事铁电晶体畴工程及光折变光学等方面的研究。

E-mail: houpeipei@siom.ac.cn

网络的发展方向是实现集成大规模光互连。多种光学互联网络方案已经被提出,如 Crossbar、Shuffle、Crossover 等。Shuffle、Crossover 网络在网络拓扑结构上都是阻塞结构,而 Crossbar 网络是无阻塞结构。Shuffle、Crossover 网络在节点间互连结构的光学实现上都采用交叉连接结构,光学实现比较复杂;Crossbar 网络互连结构无交叉,光学实现容易。但无论哪种互连网络,目前每级互连的光学实现都需要由许多元件来完成,插入损耗较大,集成度较差。器件集成是其实用化的基础,因此研究集成结构的光学互连网络是有必要的。

Crossbar 网络通过简单的路径算法控制实现无阻塞互连,具有简单性,易于实现控制,适合于构成光开关矩阵。Crossbar 网络是  $N$  个输入和  $N$  个输出构成的能实现任意一个输入和任意一个输出之间互连的无阻塞开关网络,其特点是网络拓扑结构及路径控制算法简单,适合于并行计算机系统内部处理器与处理器或存储器间的互连及光通信。由于该网络节点开关数随网络输入和输出端数的增加而迅速增加,因此 Crossbar 网络不适合构成大规模互连,利用这种简单的互连算法构造高性能价格比的中小型 Crossbar 网络,再用其构造大规模互连网络成为 Crossbar 网络的发展趋势。

光学 Crossbar 网络主要利用集成光学和自由空间光学来实现。集成光学的方法<sup>[10~17]</sup>是利用平面波导技术,将所有器件集成在一块衬底上,因而网络性能稳定可靠,插入损耗低,偏振无关,容易和光纤接口,而且适合大批量生产和大规模集成。自由空间光学包括几何光学和物理光学,有利用透镜、棱镜及全息元件构造的光学互连网络体系<sup>[18~31]</sup>,利用晶体的双折射原理<sup>[32,33]</sup>和声光、液晶器件构造的光学互连网络<sup>[34,~41]</sup>,以及平面集成光互连<sup>[29,42]</sup>等。在集成光学实现方式中,光束被束缚在波导内,限制了网络的容量,光学元件不能重构,灵活性差,而自由空间光学可以充分发挥光束高带宽大容量的特点,能自由实现空间三维光互连。本文对集成光学和自由空间光学实现的 Crossbar 网络分别进行介绍,分析了 Crossbar 光交换网络的关键技术。

## 2 集成光学实现的 Crossbar 网络

集成光学的方法实现的 Crossbar 网络大多采用光纤和波导器件实现。在一块衬底上利用无阻塞 Crossbar 开关阵列实现的波导定向耦合器光电开关。

1985 年 Bell 实验室第一次在一个 Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 晶体基底上集成 16 个互连开关,制备无阻塞光学 Crossbar 开关互连<sup>[10]</sup>。Ti 扩散波导只支持两种基本的偏振模式。器件设计根据非常偏振光的大电光系数而采用横磁模,由入射光线出口处的补偿器控制偏振态。器件的控制电压为 11 V,最低插入损耗为 3 dB,实验装置图如图 1 所示,参数见表 1。

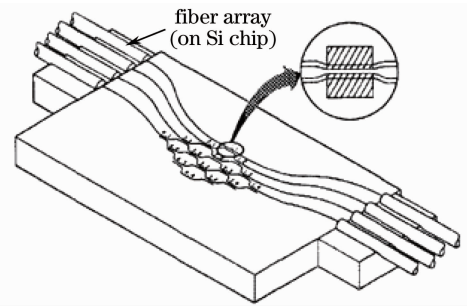


图 1 4×4 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 定向耦合器开关矩阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 4×4 Ti:LiNbO<sub>3</sub> directional coupler switch matrix

表 1 交叉态消光比和偏压

Table 1 Extinction ratios  $R_e$  and bias voltages  $V$  for crossed state

Output	Input			
	1 $R_e$ (V) / [dB/(V)]	2 $R_e$ (V) / [dB/(V)]	3 $R_e$ (V) / [dB/(V)]	4 $R_e$ (V) / [dB/(V)]
1	-18.3(2.5)	-22.2(0.5)	less than -35.0(2.5)	-16.4(2.5)
2	-27.2(2.5)	-22.5(3.1)	-17.8(1.0)	-11.6(0.0)
3	-35.7(3.2)	-30.0(0.8)	-21.6(1.1)	-12.5(2.1)
4	-19.8(1.6)	-11.6(0.0)	-34.0(3.0)	-20.7(2.8)

日本 NIT 公司在波导电光开关矩阵器件的实现方面具有领先优势<sup>[12,13]</sup>。其中,Okuno 等<sup>[14]</sup>利用硅衬底平面波导循环技术,将 8×8 的矩阵开关集成在 4 inch(1 inch=25.4 mm)的薄片上,消光比达 60.3 dB,插入损耗为 5.1 dB。Goh 等<sup>[15]</sup>使用 SiO<sub>2</sub> 平面光波回路(PLC)技术实现了 16×16 的低损耗、高消光比的无阻塞热光开关矩阵,开关矩阵采用双马赫-曾德尔干涉(MZI)开关单元结构,如图 2 所示,消光比可以比普通

MZI 开关的消光比提高一倍,矩阵的排列降低了总波导长度。阵列的互联级数为 15 级,开关单元总数为 256 个,总功耗 17 W,插入损耗 5.6 dB,平均消光比 61 dB,开关时间为毫秒量级。整个器件大小为  $107\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。

利用波导器件构造的光学互连网络具有平面波输入输出,有光效率高、易于级联和结构紧凑等优点。但由于光束被束缚在波导中,大大限制了网络的容量,而且响应速度慢,光学元件不能重构,灵活性差。

## 3 自由空间光学实现的 Crossbar 网络

### 3.1 自由空间微机械型 Crossbar 网络

自由空间微机械光开关实现的 Crossbar 光网络将光学、电学和机械的结构集成到一块芯片上,具有自由空间光互连的基本优势(如亚微秒开关时间、低插入损耗、低串扰、低偏振和波长依赖等)和集成光学的优势(如结构紧凑、光学预准直和低成本等)。

自由空间微机械型光开关利用铰链自由旋转镜,相比利用扭力旋转微机械镜,具有长期稳定性和可恢复性。准直光由光纤阵列耦合进开关中,自由旋转镜通过单片的表面微加工技术集成在硅芯片上,通过旋转自动选定的旋转镜,将准直光切换到需要的输出端口,角度误差可以控制在  $0.1^\circ$ 。结构示意图和装置图如图 3,图 4 所示。光开关在直通态和交叉态转换过程中,随着传播距离的增加光束会产生发散,因此光束相对于接收光纤和转镜的对准角度是微机械型光开关存在的问题。传统的自由空间微机械 Crossbar 网络的旋转镜采用薄双面镜以减小插入损耗,转镜厚度要求在  $2\ \mu\text{m}$ ,转镜厚度的要求增加了制造的难度和加工成本<sup>[24,25]</sup>。报道的采用 Split crossbar 结构设计的  $2 \times 2$  微机械光开关可以避免转镜厚度的限制,插入损耗为 1.4 dB,误差为 0.08 dB,开关时间约为  $10\text{ ms}$ <sup>[27]</sup>。

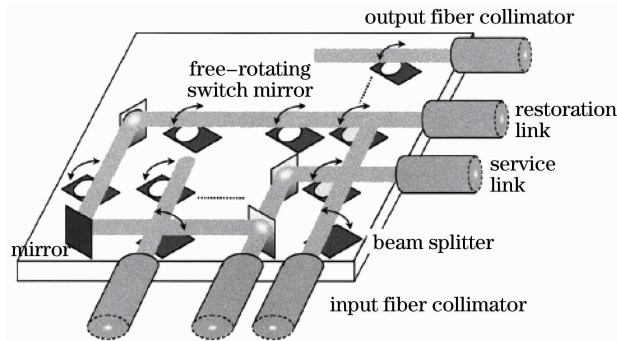


图 3 自由空间微机械光开关示意图

Fig. 3 Schematic of the free-space micromechanical optical switches

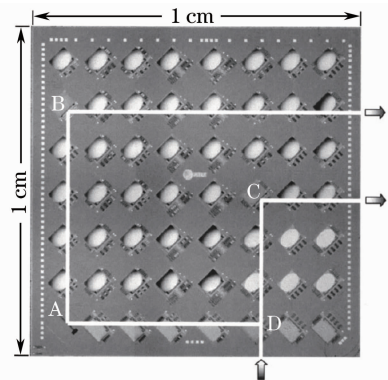


图 4 自由空间微机械光开关顶视图

Fig. 4 Top-view photograph of the free-space micromechanical optical switches configured

利用三维微结构和芯片上的光电探测器集成的自由空间微机械 Crossbar 网络,可以实现集成光互连系统的信号和开关配置检测,实现大量的网络管理功能。但对长时间保持一个开关状态的交换机镜像的可靠性要求很高,且响应速度慢。

### 3.2 折叠型 Crossbar 网络

折叠型 Crossbar 网络是利用平面反射镜及全息元件或分束器实现的自由空间光网络<sup>[29~31]</sup>。Cohen 等<sup>[30]</sup>利用可控的铁电液晶、方解石和棱镜等实现了偏振基础上的折叠式 Crossbar 网络,克服了其结构松散、不易安装的缺点。其中偏振分束液晶光开关工作原理是首先把输入光分为两路偏振光,然后把光输入液晶内,液晶根据是否加电压来改变光的偏振状态,最后光射到无源器件上,从而实现开关的两个状态。图 5 为开关简单的叠加。光束反射后,相对的竖直位置不变,方解石晶体在每一路上方向不同。

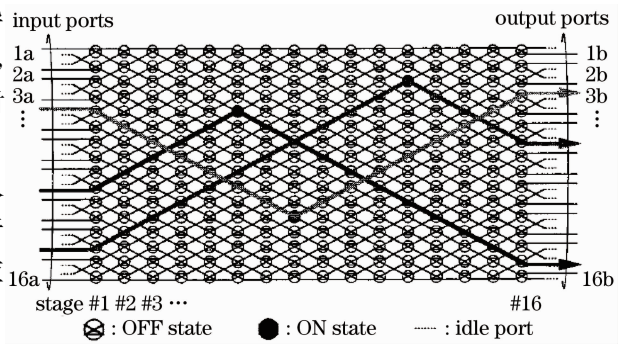


图 2  $16 \times 16$  严格无阻塞开关矩阵的逻辑排列  
Fig. 2 Logical arrangement of a  $16 \times 16$  strictly non-blocking switch matrix

Kozhevnikov 等<sup>[31]</sup>利用曲面镜作为傅里叶变换元件设计了尺寸为  $100\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$  的  $64 \times 64$  光学折叠型 Crossbar 网络,所有器件集成在一个标准电路板上。该折叠型 Crossbar 网络在微机械转镜矩阵光路中设置高反射曲面镜,利用曲面镜实现傅里叶变换,减小了开关的倾斜角度和尺寸,使光学系统结构紧凑。测得光纤插入损耗为  $1.9\text{ dB}$ ,串扰比  $60\text{ dB}$ ,开关速度约为  $10\text{ ms}$ ,低光损耗和短开关时间能有效提高接收灵敏度和系统的性能。

折叠型 Crossbar 网络具有紧凑模块化结构、低成本等优点。

### 3.3 声光型 Crossbar 网络

声光型 Crossbar 网络是利用空间光调制器件或声光调制器的各种矩阵-矢量乘法器实现的 Crossbar 光交换网络<sup>[34~37]</sup>。光波和超声波相互作用产生光波衍射现象,当满足布拉格条件时,光栅衍射光能量集中在  $+1$  级或  $-1$  级,所以这种布拉格声光器件的能量转换效率高。图 6 为利用声光偏转器及适当的光学放大和变换结构设计自由空间电控光交换系统。

在输入端,来自  $N$  个输入光纤的信号经准直后变成平行光,它们均以布拉格角入射到对应的声光偏转器(AOD)上,由驱动信号源和控制电路组成专用频率控制器(DFC),它使  $N$  个声光偏转器在同一时刻分别产生不同的超声波频率和驱动功率,而在不同时刻,按输入信息包 Crossbar 的路径改变要求实时地改变每个声光偏转器的超声波频率,使入射的平面波产生布拉格衍射,其衍射光(近似为平面波)在水平面内产生偏转,从而实现各条传输路径的实时变化。由此,这种光电混合系统就实现了  $N \times N$  Crossbar 光交换。这些矩阵-矢量乘法器构成的 Crossbar 网络结构具有空分光交换无阻塞、高速传输、并行操作等优点,但在一对一工作方式时,光效率的最高限只有  $1/N$ 。

声光开关中光在单模光纤中传播时,由于相互垂直的两个偏振态之间的能量交换会产生随机的偏振现象,已有报道通过新的光纤组成可以解决光功率损失产生的这种偏振分集现象<sup>[38]</sup>。对于光纤输出  $30\text{ }\mu\text{m}$  的偏差,采用光纤输出矩阵接收获得最佳插入损耗,信噪比可以减小到  $115\text{ dB}$ ,较高的插入损耗是声光开关需要解决的问题<sup>[39]</sup>。

### 3.4 偏振堆栈型 Crossbar 网络

偏振堆栈型 Crossbar 网络实现了互联网的积木式紧凑结构。利用晶体的双折射效应,通过不同偏振光学元件(晶片、波片及旋光片等)的适当串联组合,以偏振光互连代替自由空间光互连,可构成具有不同领域结构的偏振光互连单元。光学实现包括两部分,一部分是节点处直通-交叉(Bypass-exchange)光开关,另一部分是两级开关级之间的互连。根据 Bypass-exchange 光开关每路输入光和输出光的偏振特性,建立了利用半波片或电光晶体和双折射晶体构造的集成堆栈的多级互连网络<sup>[43,44]</sup>。

Wu 等<sup>[43]</sup>利用晶体和可控半波片建立了结构紧凑的 Crossbar 开关。基本偏光模块主要由方解石片以及旋光片和波片组成,方解石片可以分束也可以合束,旋光片和波片可以控制光束的偏振态。通过改变晶体的厚度可以控制产生所需的偏移间隔,如图 7 所示。

报道的 44 堆栈型光开关矩阵插入损耗为  $2.1\text{ dB}$ ,开关时间约为  $0.8\text{ ms}$ ,集成后开关矩阵尺寸为

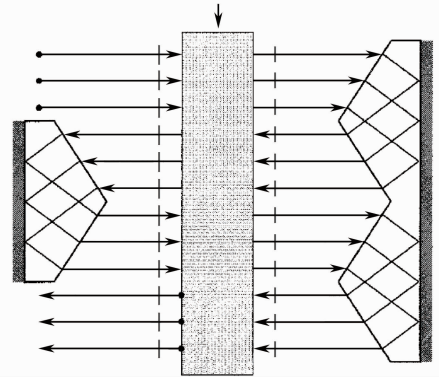


图 5 折叠 Crossbar 网络示意图

Fig. 5 Folded Crossbar network

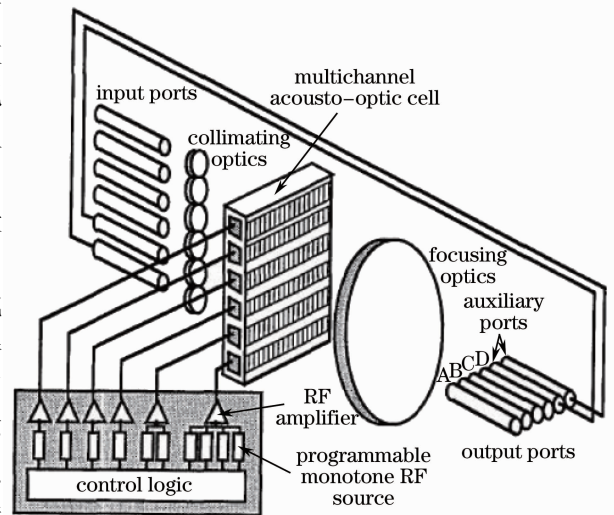


图 6  $4 \times 4$  声光开关结构示意图

Fig. 6 Acousto-optic photonic switch architecture for a  $4 \times 4$  implementation

16 mm×50 mm×15 mm<sup>[45]</sup>。

该技术结构简单紧凑,使用元件制作方便,堆栈组装的对准要求较低,胶合后模块具有较好的抗环境干扰的稳定性;偏光堆栈模块可达到很高的数据处理密度,所生成的二维阵列平行光束处于正交偏振状态,干涉串扰小。

### 3.5 单块晶体集成型 Crossbar 网络

单块晶体集成的小型 Crossbar 网络<sup>[46]</sup>在一块晶体上集成了所有的开关器件并实现了开关之间的互连。它主要是利用单轴晶体的双折射和双反射现象以及晶体的电光效应,将光束分束器和电光偏振调制器集成在一块晶体上,从而减少光束经过的光学面,降低能量损耗。这种单块集成结构的 Crossbar 网络不需要再校准,提高了开关的抗干扰能力,工作状态稳定,具有运行速度快、能量损耗小、安装简单等优点。

单块晶体集成的垂直输入结构 Crossbar 网络的示意图如图 8 所示,输入光束相互平行地垂直入射到晶体的输入面上,输出光束相互平行地垂直出射晶体。对于有  $N$  个输入  $N$  个输出的 Crossbar 网络,第一个输入应起偏为  $e$  偏振,第  $N$  个输入应起偏为  $o$  偏振,其余各路输入可起偏为  $o$  偏振也可以起偏为  $e$  偏振,因此第一个输出光为  $o$  偏振,第  $N$  个输出光为  $e$  偏振,其余输出光可能是  $o$  偏振也可能是  $e$  偏振。整个网络共需要  $m$  级开关级, $m = 2N - 3$ 。 $m$  为奇数的开关级包括  $N - 1$  个开关,即  $N - 1$  个电极对,每个开关都有两个输入和两个输出,一个为  $o$  偏振光,另一个为  $e$  偏振光。 $m$  为偶数的开关级包括  $N$  个开关,即  $N$  个电极对,第一个开关只有一个  $o$  偏振光输入和一个  $e$  偏振光输出,第  $N$  个开关只有一个  $e$  偏振光输入和一个  $o$  偏振光输出,其余开关均有两个输入和两个输出。单块晶体集成的 Crossbar 网络,由于其将所有的单元器件都集成在一块晶体上,因此网络的大小受到晶体尺寸的限制,输入输出端数比较少。

为了实现光束高带宽大容量的特点,同时保证网络的光学实现简单,提出了一种自由空间型集成堆栈的 Crossbar 网络<sup>[47,48]</sup>,网络各级由多个结构相似的光学固态模块级联组成,每个基本模块只包括一块用作光互连的双折射晶体和一个用作信息处理的光开关阵列或光开关矩阵。如图 9 所示。任何与偏振相关的

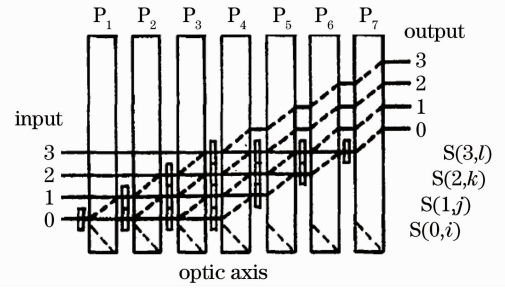


图 7 常规的  $4 \times 4$  Crossbar 网络光学结构示意图。开关行从左到右为 3,2,1,0;实线为寻常光;虚线为非常光  
Fig. 7 Optical design for a  $4 \times 4$  generalized Crossbar network. Switches in rows are labeled 3,2,1 and 0 from left to right. Solid lines, ordinary rays; dashed lines, extraordinary rays

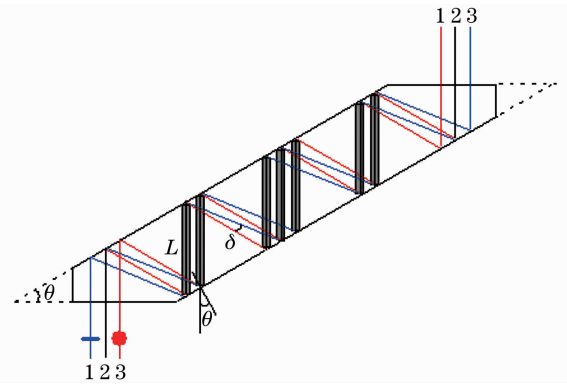


图 8  $3 \times 3$  单块晶体集成的 Crossbar 网络  
Fig. 8 Configuration of a  $3 \times 3$  Crossbar network integrated in a single block of  $\text{LiNbO}_3$  crystal

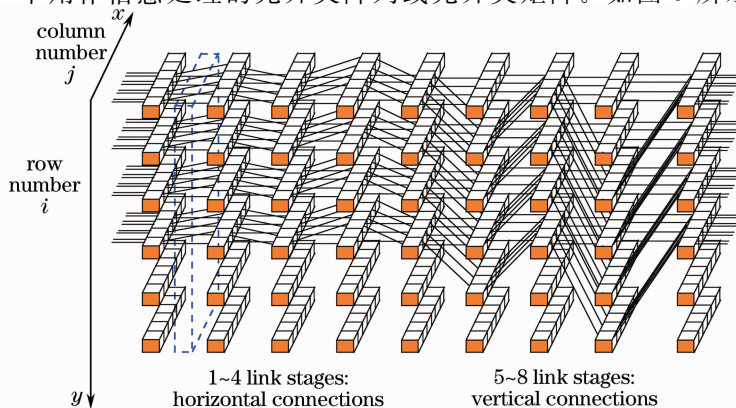


图 9 3D 集成堆栈型 Crossbar 网络结构(32 输入 32 输出)

Fig. 9 Architecture of the 3D packagable crossbar network (32 inputs and 32 outputs)

Bypass-exchange 光开关都适用于该网络的节点,但单块晶体集成的 Bypass-exchange 光开关更适合网络的固态模块化。该自由空间型集成堆栈的 Crossbar 网络相对于其他结构的光学互连网络具有连接级次和开关数少、结构简单紧凑、抗干扰、容易安装和校准的特点。

## 4 结束语

本文概览了几种典型的 Crossbar 网络结构。传统的自由空间光学系统具有处理高密度数据的潜力,但体积大,结构松散,调整较为复杂,不利于实用推广,所以,研究集成结构的光学互连网络是必要的。已有技术中一般存在以下缺陷之一:较大的离轴像差、较大的能量损耗、有限的级联能力、不易加工、不易校准和打包。因此,光学互连器件的紧凑化包装是光学互连技术的研究和发展中需要解决的关键问题之一。随着网络构成技术、器件技术、大规模制造工艺的逐步成熟,光开关和光互连网络将逐步走向实用化,器件的集成是其实用化的基础。光学处理系统的紧凑化、模块化对于促进我国光通信和信息光学的发展具有重要现实意义和应用价值,其市场潜力十分巨大。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S. Y. Kung *et al.*. Optical interconnections for VLSI systems[J]. *Proc. IEEE*, 1984, **72**(7): 850~866
- 2 T. Y. Feng. A survey of interconnection networks[J]. *Computer*, 1981, **14**(12): 12~27
- 3 J. S. Turner. Design of a broadcast packet switching network[J]. *IEEE Trans. Communications*, 1988, **36**(6): 734~743
- 4 S. R. Forrest, G. L. Tangonan, V. Jones. A simple  $8 \times 8$  optoelectronic crossbar switch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(4): 607~614
- 5 R. Hoebelheinrich, R. Thomsen. Multiple crossbar network integrated supercomputing framework[C]. Proceedings of the 1989 ACM/IEEE Conference on Supercomputing'89, 1989. 713~720
- 6 K. D. Pedrotti, S. Beccue, W. J. Haber *et al.*.  $16 \times 16$  optical-fiber crossbar switch operating at  $0.85 \mu\text{m}$ [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9): 1334~1342
- 7 P. Granstrand, B. Lagerström, P. Svensson *et al.*. Integrated optics  $4 \times 4$  switch matrix with digital optical switches[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(1): 4~5
- 8 M. Hashimoto, M. Fukui, K. I. Kitayama. Self-routing optical crossbar switch[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(7): 522~524
- 9 A. G. Kirk, W. A. Crossland, T. J. Hall. A compact and scalable free-space optical crossbar[C]. IEEE Third International Conference on Holographic Systems, Components and Applications, 1991. 137~141
- 10 L. M. Caughan, G. A. Bogert.  $4 \times 4$   $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  integrated optical crossbar switch array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(4): 348~350
- 11 P. Granstrand, B. Stoltz, L. Thylen *et al.*. Strictly nonblocking  $8 \times 8$  integrated optical switch matrix[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(15): 816~818
- 12 T. Kirihara, M. Ogawa, H. Inoue *et al.*. Lossless and low-crosstalk characteristics in an InP-based  $4 \times 4$  optical switch with integrated single-stage optical amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 218~221
- 13 T. Goh, A. Himeno, M. Okuno *et al.*. High-extinction ratio and low-loss silica-based  $8 \times 8$  strictly nonblocking thermo-optic matrix switch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1192~1199
- 14 M. Okuno, K. Kato, R. Nagase *et al.*. Silica-based  $8 \times 8$  optical matrix switch integrating new switching units with large fabrication tolerance[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 771~781
- 15 T. Goh, M. Yasu, K. Hattori *et al.*. Low loss and high extinction ratio strictly nonblocking  $16 \times 16$  thermo-optic matrix switch on 6-in wafer using silica-based planar lightwave circuit technology[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3): 371~379
- 16 R. Kasahara, M. Yanagisawa, T. Goh *et al.*. New structure of silica-based planar lightwave circuits for low power thermo-optic switch and its application to  $8 \times 8$  optical matrix switch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(6): 993~1000
- 17 L. J. Zhou, S. S. Djordjevic, R. Proietti *et al.*. Design and evaluation of an arbitration-free passive optical crossbar for on-chip interconnection networks[J]. *Appl. Phys. A*, 2009, **95**(4): 1111~1118
- 18 M. Fukui, K. Kitayama. High-throughput optical image crossbar switch that uses a point light source array[J]. *Opt.*

- Lett.*, 1993, **18**(5): 376~378
- 19 H. Toshiyoshi, H. Fujita. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 1996, **5**(4): 231~237
- 20 E. L. Goldstein, L. Y. Lin, R. W. Tkach. Multiwavelength opaque optical-cross connect networks[J]. *IEICE Trans. Electron*, 1999, **E82-C**(8): 1361~1370
- 21 L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach. Free-space micromachined optical switches for optical networking[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1999, **5**(1): 4~9
- 22 L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach. On the expandability of free-space micromachined optical cross connects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(4): 482~489
- 23 L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach. Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time large-scale optical cross connects[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 525~527
- 24 G. Wu, A. R. Mirza, S. K. Gamage *et al.*. Design and use of compactlensed fibers for low cost packaging of optical MEMS components[J]. *Micromech. Microeng.*, 2004, **14**(10): 1367~1375
- 25 C. K. Lee, C. Y. Wu. Study of electrothermal V-beamactuators and latched mechanism for optical switch[J]. *Micromech. Microeng.*, 2005, **15**(1): 11~19
- 26 Hu Qiaoyan, Yuan Jin, Li Jing *et al.*.  $4 \times 4$  crossbar micro-electro-mechanical system optical matrix switches[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 937~941
- 胡巧燕, 袁菁, 李静等.  $4 \times 4$  纵横交换微电机系统光开关阵列[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 937~941
- 27 Y. J. Yang, B. T. Liao, W. C. Kuo. A novel 22 MEMS optical switch using the split cross-bar design[J]. *Micromech. Microeng.*, 2007, **17**(5): 875~882
- 28 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization dependent and polarization independent  $4 \times 4$  free space optical switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 383~388
- 杨俊波, 苏显渝. 与偏振相关和无关的  $4 \times 4$  自由空间光开关[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 383~388
- 29 U. Lohmann, J. Jahns, S. Limmer *et al.*. Three-dimensional crossbar interconnection using planar-integratedfree-space optics and digital mirror-device[C]. *SPIE*, 2011, **7942**: 794203
- 30 N. Cohen, D. Mendlovic, B. Leibner *et al.*. Compact polarization-based all-optical interconnection systems with growth capability[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(23): 5479~5487
- 31 M. Kozhevnikov, N. R. Basavanahally, J. D. Weld *et al.*. Compact  $64 \times 64$  micromechanical optical cross connect[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 993~995
- 32 T. J. Cloonan, A. L. Lentine. Self-routing crossbar packet switch employing free space optics for chip-to-chip interconnections[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(26): 3721~3733
- 33 T. J. Cloonan. Free-space optical implementation of a feed forward crossbar network[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(14): 2006~2012
- 34 D. O. Harris, A. Van der Lugt. Acousto-optic photonic switch[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(21): 1177~1179
- 35 P. C. Huang, W. E. Stephens, T. C. Banwell *et al.*. Performance of  $4 \times 4$  optical crossbar switch utilizing acousto-optic deflector[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(4): 252~253
- 36 D. O. Harris, A. Van der Lugt. Multichannel acousto-optic crossbar switch with arbitrary signal fan-out[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(11): 1684~1686
- 37 R. R. Mcleod, K. Y. Wu, K. Wagner *et al.*. Acousto-optic photonic crossbar switch. Part I : design[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(32): 6331~6353
- 38 V. A. Shulgin. Polarization-Independent Acoustooptic Light Switching System for Single-Mode Fiber Communications[P]. Russian Federation Patent, Application Priority Data, 2004, 2004 123 331
- 39 A. V. Danilyan, V. A. Shulgin, V. E. Chernov. Optimization of the input losses in fiber-optic communications with an acousto-optic all-optical switch[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4319~4325
- 40 K. H. Brenner, T. M. Merklein. Implementation of an optical crossbar network based on directional switches[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(14): 2446~2451
- 41 H. Jeon, A. A. Sawchuk. Optical crossbar interconnections using variable grating mode devices[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(2): 261~269
- 42 S. Reinhorn, Y. Amitai, A. A. Friesem *et al.*. Compact optical crossbar switch[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(5): 1039~1044
- 43 Y. M. Wu, L. R. Liu, Z. J. Wang. Optical crossbar elementsused for switching networks[J]. *Appl. Opt.*, 1994,

- 33**(2): 175~178
- 44 M. E. Marhic, S. G. Lee. Mirror-folded free-space crossbars with holographic implementation[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(32): 6438~6444
- 45 Cao Mingcui, Hu Qiaoyan, Wan Zhujun *et al.*. A novel routing optical matrix switching method[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**(1-6): 163~170
- 46 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  $2 \times 2$  光开关[J]. 光学学报, 2004, **24**(6): 777~780
- 47 Z. Song, L. R. Liu, D. A. Liu *et al.*. Packagable free-space optical crossbar network based on bypass-exchange switch [J]. *Optik*, 2003, **114**(11): 491~496
- 48 Hou Peipei, Song Zhe, Li Xudong *et al.*. Integrated optical  $N \times N$  crossbar network and its control algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 365~369  
侯培培, 宋 哲, 李旭东 等. 单块晶体集成的  $N \times N$  纵横开关网络及其控制算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 365~369