

自由空间全交叉微光学互连模块的研究

李洪谱 曹明翠 赵向军 罗风光 徐 军 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 提出了一种新颖的自由空间微光学互连模块。该光学互连模块是由自由空间光学全交叉互连网络和非对称 Fabry-Perot 腔多量子阱反射调制器作为电寻址的四功能节点组成, 具有稳定性好、体积小、重量轻、互连密度高、速度快、可编程等特点。

关键词 光互连, 非对称 F-P 腔多量子阱反射调制器

1 引 言

并行多处理机系统中,能相互进行通讯访问的互连网络是其最重要的组成部分。电子互连网络由于线互连而引入的瓶颈堵塞、时钟歪斜和串话等固有缺点,要想进一步提高通讯运算速度是十分困难的。光由于具有极高的时间和空间带宽、高密度、互不干扰、互连灵活性大的特性,因此多处理机系统中,各层次的线互连用光互连替代,已引起人们极大关注。许多发达国家已投入了很大的人力物力研究光电混合多处理机系统。近年来,日本 NTT 传输系统实验室连续报道研制出了 COSINE I、II 和 III 型光电混合多处理机系统,它们分别采用的是离散式的光纤和自由空间光学交叉矩阵网格格式的网络^[1],分离式的光学 Banyan 和液晶开关节点网络^[2],以及由电子和部分光学系统组成的立体式交叉 Mesh 网络^[3],美国贝尔实验室的 T. J. Cloonan 等人报道了用对称的自电光效应器件(S-SEED)和 Dammann 光栅分束器等光学元件组成的离散型全交叉网络^[4]。由于这些光学网络采用的是离散式的光学系统,具有体积大、稳定性差、很难实用化的缺点。本文在我们提出的自由空间规则光学互连网络矩阵理论的基础上,利用微光学焦平面成像的理论,提出了一种新颖、小型、高速、可编程光学互连模块。该光学互连模块由四位相菲涅尔透镜、棱镜光栅、组合棱镜、光信号源等构成光学全交叉网络,和由非对称 F-P 腔多量子阱反射调制器阵列作为四功能节点组成。

2 自由空间光学互连网络的矩阵理论

为了充分利用光传输特性,自由空间光子交换网络一般都采用二维或三维的光学全混洗交换 Omega、光学全交叉(Crossover)、光学榕树(Banyan)通讯网络系统。这些网络系统以前都采用拓扑图进行分析研究,而且在大容量的情况下,用电子技术实现这些网络是十分困难的。

* 本课题得到国家 863 高技术基金和国防科工委预研基金的资助。

收稿日期: 1994 年 3 月 14 日; 收到修改稿日期: 1994 年 4 月 26 日

为了更好地适应这些网络发展的需要,在参考文献[5]中,我们已提出了自由空间规则光互连网络的矩阵理论,若将网络的输入和输出端子序号作为输入矢量 k 和输出矢量 k' ,而且定义网络中第 s 级中第 j 个开关节点与第 $s+1$ 级的上面一个节点选通的状态为 $n_j^s(0)$,与下面一个节点选通为 $n_j^s(1)$,则自由空间光子交换网络的输入和输出矢量可表示为

$$k' = N^{(0)}N^{(1)}\dots\dots N^{(s-1)}K \quad (1)$$

上式中 $N^{(0)}, N^{(1)}, \dots, N^{(s-1)}$ 称为自由空间光子交换网络系统中的特征转换矩阵。以 $N=8$ 自由空间 Crossover 网络系统为例(如图 1 所示),它们各级特征转换矩阵可以分别表示为

$$N^{(0)} = \begin{bmatrix} n_0^0(0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_7^0(0) \\ 0 & n_1^0(0) & 0 & 0 & 0 & 0 & n_6^0(0) & 0 \\ 0 & 0 & n_2^0(0) & 0 & 0 & n_5^0(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_3^0(0) & n_4^0(0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_3^0(1) & n_4^0(1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_2^0(1) & 0 & 0 & n_5^0(1) & 0 & 0 \\ 0 & n_1^0(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & n_6^0(1) & 0 \\ n_0^0(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_7^0(1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N^{(1)} = \begin{bmatrix} n_0^1(0) & 0 & 0 & n_3^1(0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1^1(0) & n_2^1(0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1^1(1) & n_2^1(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_0^1(1) & 0 & 0 & n_3^1(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_4^1(0) & 0 & 0 & n_7^1(0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_5^1(0) & n_6^1(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_5^1(1) & n_6^1(1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_4^1(1) & 0 & 0 & n_7^1(1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$N^{(2)} = \begin{bmatrix} n_0^2(0) & n_1^2(0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_0^2(1) & n_1^2(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_2^2(0) & n_3^2(0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_2^2(1) & n_3^2(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_4^2(0) & n_5^2(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_4^2(1) & n_5^2(1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_6^2(0) & n_7^2(0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_6^2(1) & n_7^2(1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

若将输入矢量 K_0 和输出矢量 K_s 的各端子表示为

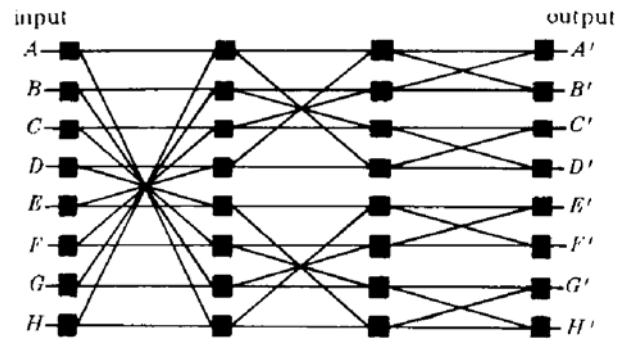


Fig. 1 The crossover interconnection network for $N=8$

$$K_0 = [A, B, C, D, E, F, G, H]^T$$

$$K_8 = [A', B', C', D', E', F', G', H']^T \tag{5}$$

Crossover 开关网络的输入输出端之间表示式为

$$K_8 = N^{(2)}N^{(1)}N^{(0)}K_0 \tag{6}$$

矩阵展开式为

$$\begin{bmatrix} A' \\ B' \\ C' \\ D' \\ E' \\ F' \\ G' \\ H' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_0^0(0)\{n_1^0(0)[n_0^0(0)A + n_7^0(0)H] + n_3^0(0)[n_3^0(0)D + n_4^0(0)E]\} \\ \quad + n_2^0(0)\{n_1^0(0)[n_0^0(0)B + n_6^0(0)G] + n_5^0(0)[n_2^0(0)C + n_5^0(0)F]\} \\ n_0^1(1)\{n_1^0(0)[n_0^0(0)A + n_7^0(0)H] + n_3^0(0)[n_3^0(0)D + n_4^0(0)E]\} \\ \quad + n_2^1(1)\{n_1^0(0)[n_0^0(0)B + n_6^0(0)G] + n_5^0(0)[n_2^0(0)C + n_5^0(0)F]\} \\ n_2^0(0)\{n_1^1(1)[n_0^0(0)B + n_6^0(0)G] + n_5^0(0)[n_2^0(0)C + n_5^0(0)F]\} \\ \quad + n_3^0(0)\{n_0^1(1)[n_0^0(0)A + n_7^0(0)H] + n_3^1(1)[n_3^0(0)D + n_4^0(0)E]\} \\ n_2^1(1)\{n_1^1(1)[n_0^0(0)B + n_6^0(0)G] + n_5^1(1)[n_2^0(0)C + n_5^0(0)F]\} \\ \quad + n_3^1(1)\{n_0^1(1)[n_0^0(0)A + n_7^0(0)H] + n_3^1(1)[n_3^0(0)D + n_4^0(0)E]\} \\ n_4^0(0)\{n_4^0(0)[n_3^0(1)D + n_4^0(1)E] + n_7^0(0)[n_0^0(1)A + n_7^0(1)H]\} \\ \quad + n_5^0(0)\{n_5^0(0)[n_2^0(1)C + n_5^0(1)F] + n_6^0(0)[n_1^0(1)B + n_6^0(1)G]\} \\ n_4^1(1)\{n_4^0(0)[n_3^0(1)D + n_4^0(1)E] + n_7^0(0)[n_0^0(1)A + n_7^0(1)H]\} \\ \quad + n_5^1(1)\{n_5^0(0)[n_2^0(1)C + n_5^0(1)F] + n_6^0(0)[n_1^0(1)B + n_6^0(1)G]\} \\ n_6^0(0)\{n_5^1(1)[n_2^0(1)C + n_5^0(1)F] + n_6^1(1)[n_1^0(1)B + n_6^0(1)G]\} \\ \quad + n_7^0(0)\{n_4^1(1)[n_3^0(1)D + n_4^0(1)E] + n_7^1(1)[n_0^0(1)A + n_7^0(1)H]\} \\ n_6^1(1)\{n_5^1(1)[n_2^0(1)C + n_5^0(1)F] + n_6^1(1)[n_1^0(1)B + n_6^0(1)G]\} \\ \quad + n_7^1(1)\{n_4^1(1)[n_3^0(1)D + n_4^0(1)E] + n_7^1(1)[n_0^0(1)A + n_7^0(1)H]\} \end{bmatrix} \tag{7}$$

上式需注意的是，“+”并非为一般的“和”，而是表示某一级的某一个输出端可以与两个输入端相连，但与哪一个输入端相连就取决于开关状态。 $N = 8$ 时，自由空间 Crossover 网络输入和输出端的路径选择见表 1

Table 1 The routing selection between input and output ports in Crossover interconnection network for $N = 8$

	Order																							
	A'			B'			C'			D'			E'			F'			G'			H'		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
A	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(1)	0(0)	0(1)	3(0)	0(0)	0(1)	3(1)	0(1)	7(0)	4(0)	0(1)	7(0)	4(1)	0(1)	7(1)	7(0)	0(1)	7(1)	7(1)
B	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)	1(1)	1(0)	1(1)	2(0)	1(0)	1(1)	2(1)	1(1)	6(0)	5(0)	1(1)	6(0)	5(1)	1(1)	6(1)	6(0)	1(1)	6(1)	6(1)
C	2(0)	2(0)	1(0)	2(0)	2(0)	1(1)	2(0)	2(1)	2(0)	2(0)	2(1)	1(1)	2(1)	5(0)	5(0)	2(1)	5(0)	5(1)	2(1)	5(1)	6(0)	2(1)	5(1)	6(1)
D	3(0)	3(0)	0(0)	3(0)	3(0)	0(1)	3(0)	3(1)	3(0)	3(0)	3(1)	3(1)	3(1)	4(0)	4(0)	3(1)	4(0)	4(1)	3(1)	4(1)	7(0)	3(1)	4(1)	7(1)
E	4(0)	3(0)	0(0)	4(0)	3(0)	0(1)	4(0)	3(1)	3(0)	4(0)	3(1)	3(1)	4(1)	4(0)	4(0)	4(1)	4(0)	4(1)	4(1)	4(1)	7(0)	4(1)	4(1)	7(1)
F	5(0)	2(0)	1(0)	5(0)	2(0)	1(1)	5(0)	2(1)	2(0)	5(0)	2(1)	2(1)	5(1)	5(0)	5(0)	5(1)	5(0)	5(1)	5(1)	5(1)	6(0)	5(1)	5(1)	6(1)
G	6(0)	1(0)	1(0)	6(0)	1(0)	1(1)	6(0)	1(1)	2(0)	6(0)	1(1)	2(1)	6(1)	6(0)	5(0)	6(1)	6(0)	5(1)	6(1)	6(1)	6(0)	6(1)	6(1)	6(1)
H	7(0)	0(0)	0(0)	7(0)	0(0)	0(1)	7(0)	0(1)	3(0)	7(0)	0(1)	3(1)	7(1)	7(0)	4(0)	7(1)	7(0)	4(1)	7(1)	7(1)	7(0)	7(1)	7(1)	7(1)

从表可见，任意输入端都可以与任意输出端相通。任意输入端都可以与所有输出端连通。例如输入端 F 和输出端 A' 通讯，则第 0 级的第 5 节点开关，第 1 级的第 2 节点和第 2 级的第 1 节点开关状态都为 $n(0)$ ，实际状态为高态“1”。

在光子交换网络特征转换矩阵的基础上,可以十分方便地表示出了整个多级光子交换网络从 N 个输入端同时与 N 个输出端同时通讯或任何一个输入端同时与 N 个输出端同时通讯时的路径选通和各节点开关的选通状态。

3 光学互连通讯模块结构

图 2 是我们研制的 8×8 光学互连组合器件结构示意图。其中 FML_1, FML_2 为四位相的非涅耳微透镜列阵,各透镜之间的间隔为 0.4 mm ,微透镜列阵的形貌如图 3 所示; BS_1, BS_2 为 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 的偏光棱镜, M 为平面反射镜, PG 为周期性的棱镜光栅; MQW_1, MQW_2 为 2×8 非对称 F-P 腔多量子阱反射调制器开关列阵,其窗口如图 4 所示,每一个调制器的尺寸为 $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$,间隔亦为 0.4 mm ,此开关列阵由中国科学院半导体所提供,开关时间可达 $50 \times 10^{-9} \text{ s}$,工作状态可分常开、常闭两种状态^[6]。这里我们考虑常闭状态(即器件加 $8 \sim 10 \text{ V}$ 直流电压后,处于高反射式状态;反之则处于低反射式状态),对应的光波段为 850.3 nm ,带宽为 2 nm 左右。扩束的平行光经过四位相非涅耳透镜列阵 FML_1 和偏光棱镜 BS_1 ,将光束分成两束偏振光,分别聚焦在开关列阵 MQW_2 的窗口和棱镜光栅 PG 上,两束光分别经多量子阱光开关列阵 MQW_2 和棱镜光栅 PG ,经 $1/4$ 波片,偏光棱镜 BS_1 又重新重合,入射在四位相非涅耳透镜列阵 FML_2 上。其中一条路径为 $FML_1-B S_1-MQW_2-B S_1-FML_2$ 的光束,通过偏光棱镜 BS_2 、平面反射镜 M 、偏光棱镜 BS_2 聚焦在探测器列阵 Detector 上,另一条路径为 $FML_1-B S_1-PG-B S_1-FML_2$ 的光束,经过偏光棱镜 BS_2 、多量子阱光开关列阵 MQW_1 、偏光棱镜 BS_2 聚焦在探测器列阵 Detector 上。可见,通道间的间距为 0.4 mm , 2×8 的输入端口的信息分别经过两条路径和两个电寻址的多量子阱开关器件的控制,达到 2×8 的输出端口。

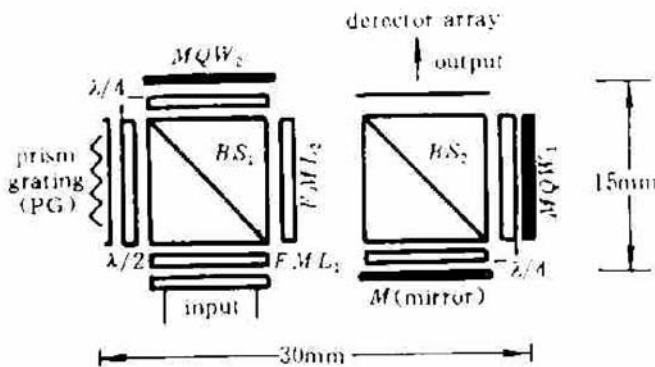


Fig. 2 The schematic diagram of the optical interconnection package



Fig. 3 The frame of micro-Frenel len arrays

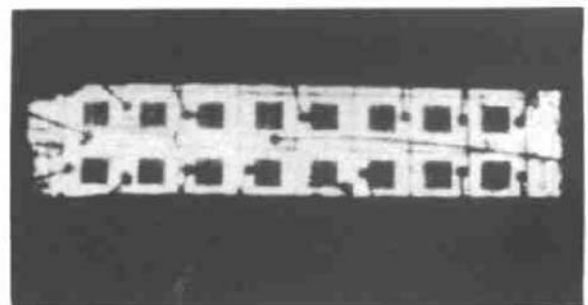


Fig. 4 The electrical addressed MQW ASFP modulator arrays of 8×2

从图 2 可知,多量子阱光开关列阵 MQW_2 是控制全交叉网络的直通状态,而 MQW_1 是控制网络的交叉状态。参见图 1,根据开关状态的定义,网络的第 0 级,对开关序号 j 为 $0, 1, 2, 3$,直通选通为 $n_0^j(0)$,交叉选通为 $n_0^j(1)$,对开关序号 j 为 $4, 5, 6, 7$,直通选通为 $n_0^j(1)$,交叉选通为 $n_0^j(0)$ 。

4 光学互连模块光信息通道的初步测试

图 5 是互连模块实物照片,一级模块体积约为 $35 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$,光学通道的间距为 0.4 mm ,光学互连为全交叉互连网络。实验中采用的光源是氩离子泵浦掺钛兰宝石可调谐激光器,激光器波长调谐的范围为 $700 \sim 900 \text{ nm}$,线宽小于 1 nm ,可以满足非对称 F-P 腔多量子阱反射调制器所需要的波段条件。首先将激光器波长调谐在 850.3 nm ,准直扩束垂直入射到菲涅尔微透镜列阵 FML_1 上,便可形成 8×8 光束点阵,如图 6 所示,聚焦在开关列阵 MQW_2 的窗口上,如图 7 所示,其衍射效率为 60% 。图 8 为光源未编码时,将电信号控制于多量子阱开关 MQW_2 的第 3 开关节点的图形。图 8 中的下面为电信号波形,上面波形是探测器测试到的光通过 FML_1 - BS_1 - MQW_2 ,再从电寻址多量子阱光开关 MQW_2 反射后,通过 FML_2 - BS_2 - M - BS_2 -Detector 的光信息波形,中间一条直线为 MQW_2 第 3 开关节点的光信号为 0 时的基准线。从照片可知,多量子阱光开关的高态和低态之比为 $3:1$ 。通讯系统的延迟时间小于 10^{-10} s ,随着多量子阱调制器器件本身信噪比的提高,以及菲涅尔透镜衍射效率的提高,互连模块的插入损耗将限制在 10 dB 以内。

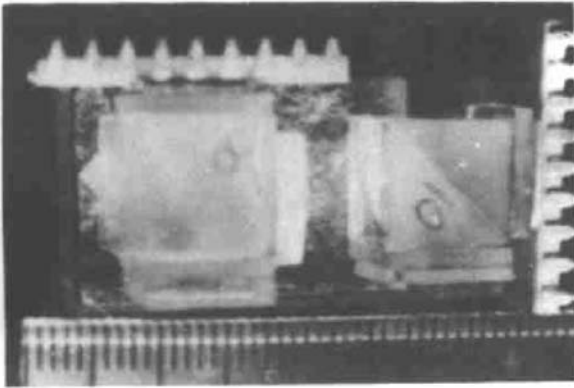


Fig. 5 Photograph of the micro-optical package

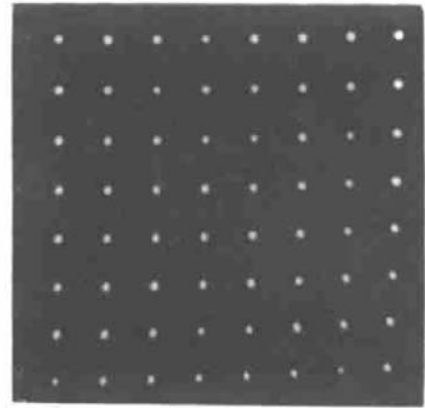


Fig. 6 The 8×8 spot arrays generated by micro-Fresnel lenses

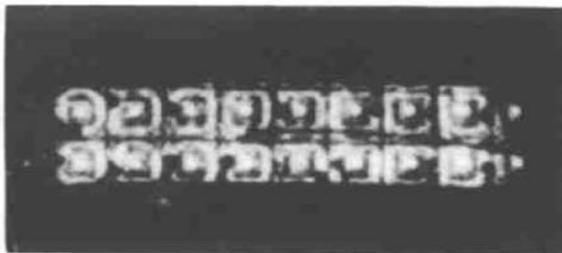


Fig. 7 The spot arrays of 2×8 focused on the mesas of MQW_2

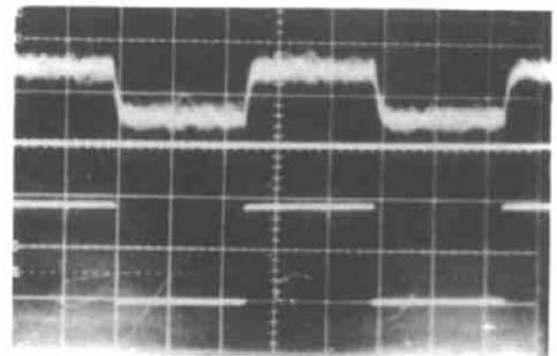


Fig. 8 The output characteristics of an electrical addressed MQW ASFP modulator

5 讨 论

虽然 $N = 8$ 时,光学互连通讯网络是由三级组成,但由于其它各级网络结构除棱镜光栅周期不同之外,其它都完全相同,故光学互连通讯网络由三块基本相同的模块组成。该模块体

积为 $35 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$, 光学通讯间距为 0.4 mm , 可并行传输 16×16 光信息量, 光学通道间距若为 0.2 mm , 可并行传输 32×32 光信息量。此单级光学互连通讯模块的研制为实用化的多级光学互连网络的研究奠定了坚实的基础。初步测试表明, 这种光学互连通讯网络具有体积小、重量轻、互连密度高、速度快、无串话、无时间歪斜、可编程、灵活性大等优点。

致谢 作者对中国科学院半导体所吴荣汉研究员等提供 SEED 器件以及测试上的帮助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 T. Sakano, T. Mastsumsto, K. Noguchi *et al.*. Design and performance of a Multiprocessor system employing board-to board free-space optical interconnections; COSIN-1, *Appl. Opt.*, 1991, **30**(17): 2334~2343
- 2 T. Sakano, K. Noguchi, T. Mastsumsto. Multiprocessor system using an automatically rearrangeable free-space multichannel optical switch; COSIN-2, *Appl. Opt.*, 1993, **32**(20): 3690~3699
- 3 T. Sakano, K. Noguchi, T. Mastsumsto. A Multiprocessor system using interboard free-space optical interconnects; COSIN-3, optical computing, 1993 TECHNICAL DIGEST, SERIES Vol. 7, palm springs, california; Optical Society of America 276~279
- 4 T. J. Cloonan, F. B. McCormick. Phontic switching applications of 2-D crossover networks based on 2-input, 2-output switching nodes. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(17): 2309~2322
- 5 Mingcui Cao, Hingpu Li, Fengguang Luo. A New Mathematical Analysis for Free-space Regular Interconnections. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(13): 2960~2967
- 6 K-K. Low, R. H. Yan, J. L. Merz *et al.*. Normally-off high-contrast asymmetric Fabry-Perot reflection modulator using Wannier-Stark localization in superlattice. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1886~1888

The Research on Free-space Crossover Micro-optical Interconnection Package

Li Hongpu Cao Mingcui Zhao Xiangjun Luo Fengguang Xu Jun Li Zhaiguang
(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A novel micro-optical crossover interconnection package has been proposed. The optical crossover switching network where asymmetric Fabry-Perot reflection modulator arrays based on multiple quantum wells are used as electrical addressed four-function interchange nodes is described. The micro-optical interconnection package features stability high speed, small weight, and ease of integration.

Key words optical interconnection, asymmetric Fabry-Perot reflection modulator based on multiple quantum wells