

64×64 全交叉互连函数的光学实现*

艾 军** 曹明翠 李一男 李洪谱

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)

摘 要 光互连全交叉网络在巨型计算机和光子交换网络系统等领域具有十分重要的潜在应用。本文在自行设计研制成功棱镜光栅和 65×65 大列阵 Dammann 光栅的基础上, 运用自由空间光学互连技术实现了 64×64 全交叉网络的互连函数。采用互连矩阵对输出图样进行了计算, 结果与实验吻合。

关键词 光学互连, 全交叉网络, 相位光栅。

1 引 言

利用光互连可在第三维自由空间实现对一系列相互平行的二维逻辑器件列阵面之间整体的立体互连, 避免了电子学超大规模集成电路互连对芯片引脚数目的限制^[1~3]。全交叉网络互连结构首先由美国科学家于八十年代末提出, 目的在于提供一种用于超大规模集成电路(VLSI)芯片之间互连的新结构。由于全交叉网络光学实现结构简单、光能损耗小, 易于集成且与榕树网络、Omega 网络等常用多级互连网络具有拓扑等价的性质^[4~9], 因而被视为发展新一代数字光计算机、光子交换机及光电混合巨型多处理计算机内部互连的首选网络^[10~13]。

全交叉网络的光学实现方案最先由 AT&T 贝尔实验室于 1988 年提出^[4]。他们采用二元 Dammann 光栅作为分束器产生强度均匀的光点列阵, 以此作为全交叉网络的输入。不过他们研制的 Dammann 光栅能够产生的最大光点列阵数只有 32×32, 已接近他们理论上预言的极限值 40×40^[14]。

作者对优化 Dammann 光栅结构设计各种算法进行了广泛的分析和研究, 提出了模拟退火回火算法(SAT), 在合理的计算量和计算时间内有效地克服了大列阵数光栅结构优化的困难。将退火回火算法的解作为初值, 采用先进的广义简约梯度法(GRG)进一步细化, 得到大列阵(65×65)、高二维衍射效率(82%)、均匀性好(理论计算非均匀性<0.4%)的光栅结构^[15,16], 突破了贝尔实验室预言的极限^[14], 为研制高密度、高容量的光互连网络所需的大列阵分束器提供了理论上的依据。

* 本课题得到国家自然科学基金、863 基金和国防预研基金的资助。

** 广东工学院计算机系, 广州 510090。

收稿日期:1993年8月9日;收到修改稿日期:1993年10月18日

本文报道采用自行研制的 65×65 Dammann 光栅作为分束器所实现的 64×64 全交叉网络的光学实验系统的研究结果。

2 全交叉网络的拓扑结构

全交叉网络是一种多级互连网络。按惯例，在讨论多级互连网络的拓扑结构时通常取网络的输入/输出端口数目为 $N = 2^n$ ， n 是网络的链路级数，从入端至出端依次编为 0, 1, ..., $n - 1$ 级。网络的结节点级依次为 0, 1, ..., n 级^[17]。 $N = 8$ 的全交叉网络拓扑结构如图 1 所示。它由 4 级结点和 3 级链路按照全交叉互连函数组成。全交叉互连函数可分为直通互连和交叉互连两大类。各级链路的直通互连函数均相同，可用单位矩阵描述；但不同链路级的交叉互连函数则互不相同，第 i 级链路的交叉互连函数可用交叉互连矩阵 $F_N^{(i)}$ 描述^[18~21]：

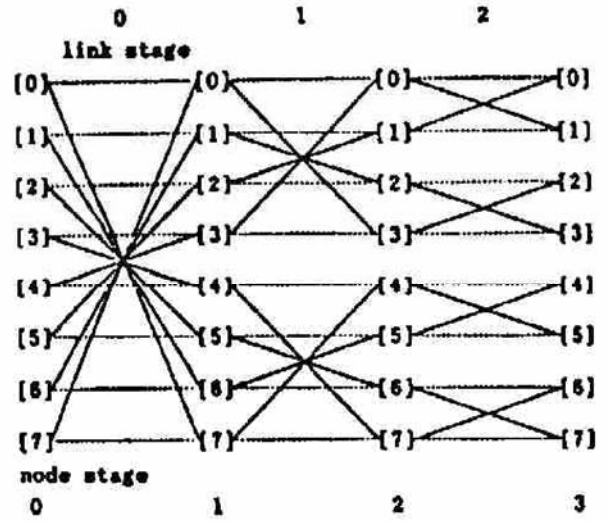


Fig. 1 $N = 8$ crossover network

$$F_N^{(i)} = \begin{bmatrix} I_i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I_i & & \vdots \\ \vdots & & & I_i & 0 \\ 0 & \dots & 0 & I_i \end{bmatrix}_{2^i}, \quad I_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & & & 1 & 0 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2^{i-1}} \quad (1)$$

$(i = 0, 1, \dots, n - 2, n - 1; n = \log_2 N)$

式中右下角标 2^i 表示矩阵 $F_N^{(i)}$ 是一个行、列维数均为 2^i 的方阵(将分块矩阵 I_i 视为 $F_N^{(i)}$ 的矩阵元)。

3 全交叉互连函数的光学实现

本文设计的全交叉网络的光学实现原理如图 2 所示，图 3 是该系统的实物照片。

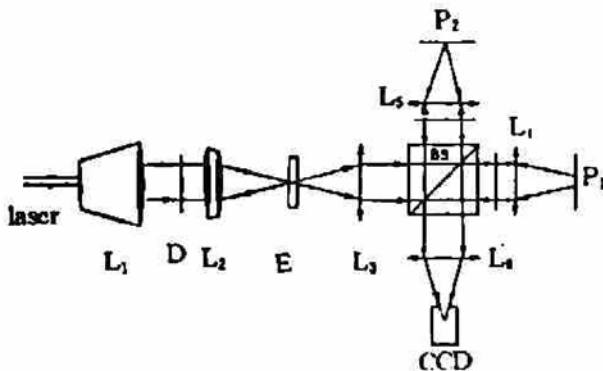


Fig. 2 Optical implementation scheme of crossover networks



Fig. 3 Photograph of our experimental setup

Ar^+ 激光器发射的波长为 514.5 nm 的光经扩束镜 L_1 照射到 Dammann 光栅 D，再经组

合调焦镜 L_2 在其焦平面 E 上产生一个均匀的光点列阵, 在焦平面 E 上放置了一块刻划了“E”字的光阑, 透过“E”字光阑的图样是一个“E”字形的光点列阵, 它可作为全交叉网络的输入图样。透镜 L_3-L_6 组成 $4F$ 成象系统, E 、 P_1 、 P_2 、 CCD 是其对应的像平面。输入图样经分光棱镜 BS 分为两路, 一路经 $E \rightarrow BS \rightarrow P_2 \rightarrow BS \rightarrow CCD$, 由 CCD 摄像机接收并送入监视器显示输出图样。 P_2 面上放置了一块平面反射镜, 用以实现全交叉网络的直通互连函数。另一路沿 $E \rightarrow BS \rightarrow P_1 \rightarrow BS \rightarrow CCD$ 进行, P_1 面上放置棱镜光栅, 用来实现全交叉网络的交叉互连函数。实现不同链路级的交叉互连函数, 需放置不同周期数的棱镜光栅。对应通道数为 N 的全交叉网络的第 i 级链路的交叉互连函数应在 P_1 面上放置周期数为 2^i 的棱镜光栅 ($i = 0, 1, n-1; n = \log_2 N$)^[4]。

64×64 全交叉网络 (即输入/输出端口数 $N = 64$) 共有 $n = \log_2 N = 6$ 级链路。已制作了周期数分别为 1, 2, 4, 8 的四块棱镜光栅, 其总尺寸均为 $6.4 \times 6.4 \text{ mm}^2$, 与“E”字光阑的尺寸相同, 用来实现 64×64 全交叉网络的第 0, 1, 2, 3 级链路的互连函数。其照片分别如图 4 (a)~(d) 所示。

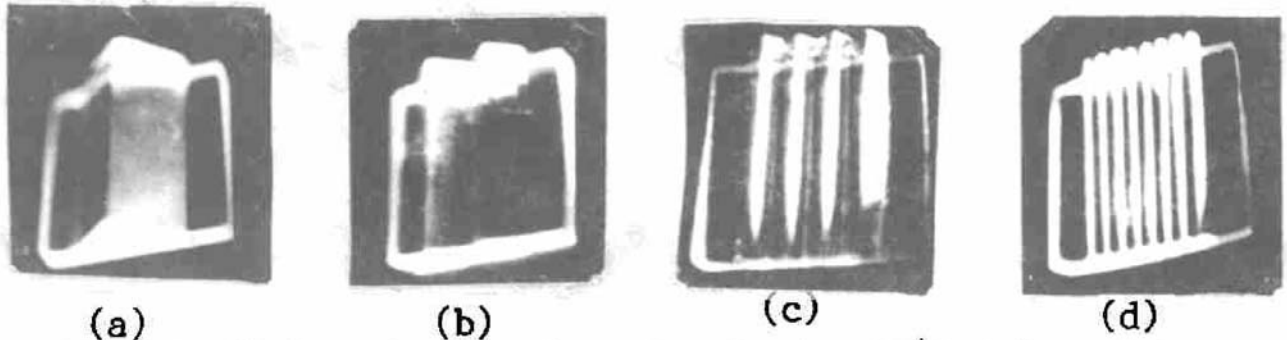


Fig. 4 (a)~(d) photographs of four prism gratings with periods of 1, 2, 4, 8 respectively

棱镜光栅又称棱镜列阵^[4], 其制作工艺是将若干个尺寸相同的直角棱镜并排胶合在一块透明的玻璃基片上而成。例如, 图 4(d) 中周期数为 8 的棱镜光栅就是由 8 个尺寸均为 $0.8 \times 6.4 \text{ mm}^2$ 的长条形直角棱镜并排胶合而成, 其总尺寸为 $(8 \times 0.8 = 6.4) \times 6.4 \text{ mm}^2$, 与“E”字光阑的尺寸一致。

分束器是采用模拟退火-回火-广义简约梯度 (SAT-GRG) 算法设计制作的 65×65 阵列的 Dammann 光栅。在组合调焦镜 L_2 的焦平面 E 处观察到该光栅产生的 65×65 光点列阵如图 5 所示。图中四周边缘的畸变是在拍摄照片时由于显示屏 (经 CCD 摄像机接收后送至显示屏显示) 四周边缘的场曲所致。如果适当减小透镜 L_6 的焦距, 使显示在显示屏 (监视器) 上的图像缩小到监视器的中央区域, 则拍摄到的点阵图样四周边缘将不再有畸变。图 6 是通过扫描其中第 36 行光点取样得到的 65 个光点的强度分布曲线 (相对值), 实测强度非均匀性 $< 15\%$, 比计算值 0.4% 大, 这主要是由光栅的制作工艺精度产生的。

为了使 Dammann 光栅产生的光点列阵刚好通过“E”字光阑, 需调整组合调焦镜 L_2 的焦距 f , 使之满足:

$$f = \frac{\Delta}{\text{tg}(\lambda/d)} \approx \frac{\Delta d}{\lambda} \quad (2)$$

式中 $\Delta = 6.4/64 = 0.1 \text{ mm}$ 是焦平面上相邻两光点之间的距离, $\lambda = 0.5145 \mu\text{m}$ 为 Ar^+ 激光器的辐射波长, d 为光栅周期常数, 其设计值为 1 mm 。由此可算出 $f = 194.4 \text{ mm}$ 。

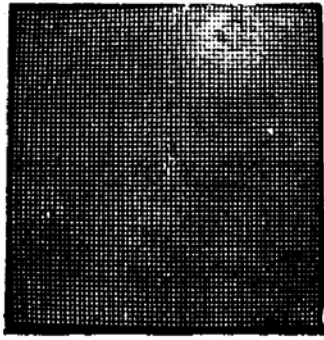


Fig. 5 Spot array generated by Dammmann grating with array of 65×65

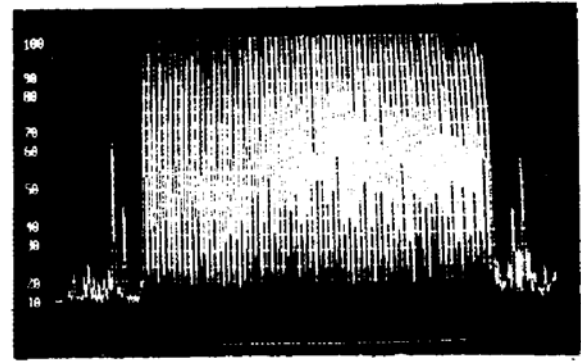


Fig. 6 Intensity distribution curve for one row (with 65 spots) of the Dammmann grating

通过“E”字光阑产生的“E”字形光点列阵亦即全交叉网络的输入图样如图 7 所示。从 P₂ 面反射镜反射输出的直通互连函数的输出图样与图 7 相同。在 P₂ 面前面放置一屏挡住直通互连光路，并在 P₁ 面分别放置周期数为 1, 2, 4, 8 的棱镜光栅，观察到全交叉网络的第 0, 1, 2, 3 级链路的交叉互连函数的输出图样分别如图 8(a)~(d)所示。

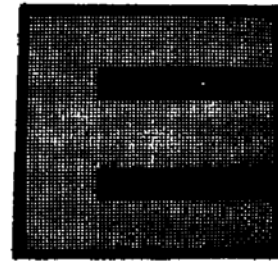


Fig. 7 The input pattern of the 64×64 crossover network

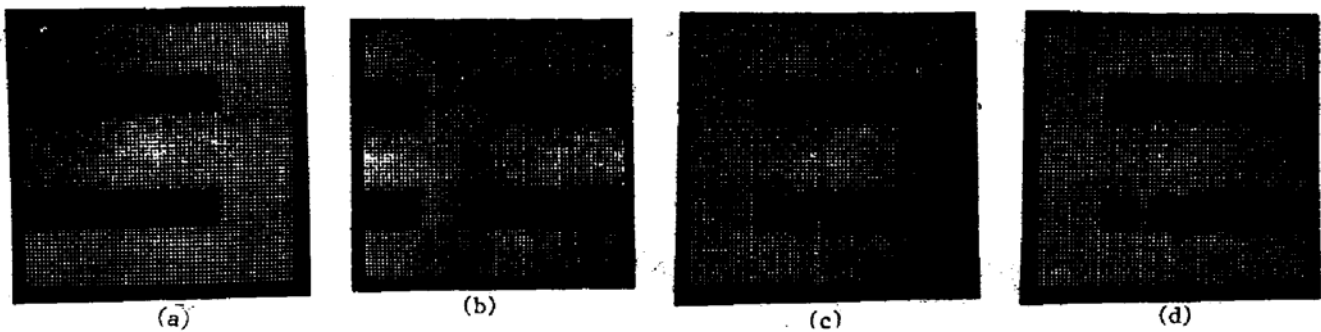


Fig. 8 (a)~(d) four output patterns for link stages of 0, 1, 2, 3 of the 64×64 crossover network, respectively

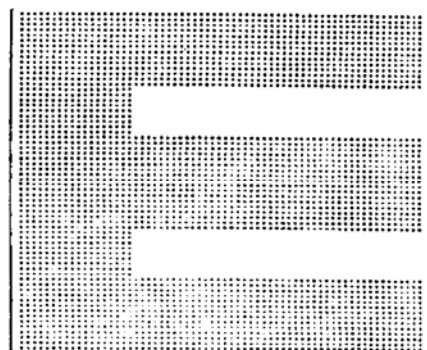
4 理论计算

对于 $N \times N$ 全交叉网络，可根据下述公式计算第 i 级链路的交叉互连函数的输出图样^[18~21]：

$$Y_N^{(i)} = X_N F_N^{(i)} \tag{3}$$

式中 X_N 为输入图样的矩阵表达形式，对于本文的实验系统输入图样可用下述矩阵描述：

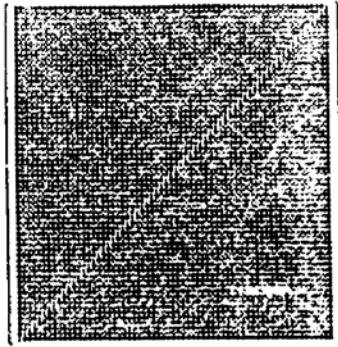
$$X_N = X_{64} =$$



$$\tag{4}$$

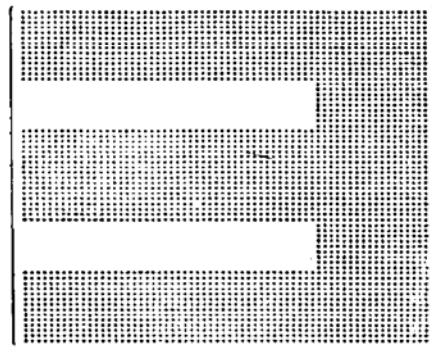
根据(1)式, 容易求得 $N = 64$ 全交叉网络第 0 级链路的交叉互连矩阵为:

$F_{64}^{(0)} =$ (5)



这样, 根据(3)式即可求得 0 级链路的输出图样:

$Y_{64}^{(0)} = X_{64} F_{64}^{(0)} =$ (6)



显然理论计算结果即(6)式与实验结果即图 8(a)是一致的。

类似地, 可以根据(1)式求得 $N = 64$ 全交叉网络的第 1, 2, 3, 级链路的交叉互连矩阵, 并根据(3)式分别计算出对应的输出图样。计算结果与图 8(b)~(d)一致。(限于篇幅计算过程从略)。

5 全交叉网络在巨型计算机系统互连中的潜在应用

在各种计算机体系结构中, 采用以互连网络为中心的多处理机系统被认为是开发新一代超高速、大容量、并行、流水的巨型计算机系统的最有效的一种方案^[22]。其结构框图如图 9 所示。其主要特征可归纳为: 1) 包含多个功能相同的处理机(P), 2) 所有处理机通过互连网络(IN)共享公共存储器(M)、控制单元(CU)以及输入/输出(I/O)通道(CH)和外围设备, 3) 整个系统由统一的操作系统控制, 在处理机和程序之间实现作业、任务、程序段、数组和数据元素各级的全面并行。

由此可见, 整个系统中, 无论是在处理机与处理机之间或是存储器与存储器之间都要通过互连网络实现信息交换。在由大量价廉的微、小型处理机组成的巨型多处理机系统中, 互连网络极其复杂。若采用传统的电子学线互连方法实现, 则互连网络的设备量及成本会占去整个多处理机系统的一半以上^[23]。相比之下, 光学全交叉网络则具有结构紧凑、容易实现、成本低廉、各通道时延相等、互连密度(带宽)高、光能损失少以及与 Omega 等常用多级互连

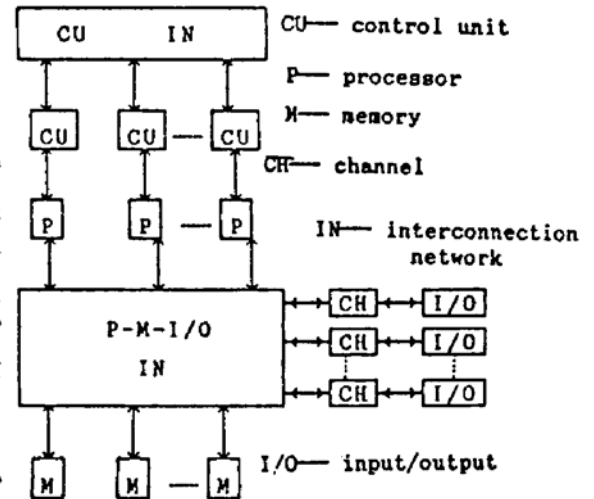


Fig. 9 Architecture of a multi-processor system based on interconnection network

网络拓扑等价等许多优点。因此,用光学全交叉网络替代传统的电子学互连网络构成光电混合并行多处理机系统对于发展新一代巨型计算机系统具有极其重要的应用前景。

结 语 高密度大容量的光学互连网络是发展新一代巨型计算机和电信交换网必须首先解决的主要难题之一。本文在研制成功棱镜光栅和 65×65 大点阵 Dammann 光栅的基础上,采用自由空间光学互连技术实现了 64×64 全交叉网络的互连函数。根据作者提出的互连网络的矩阵理论对全交叉互连函数的输出图样进行了计算,计算结果与实验吻合。

参 考 文 献

- [1] M. R. Feldman *et al.*, Comparison between optical and electrical interconnects based on power and speed considerations. *Appl. Opt.*, 1988, 27(9): 1742~1751
- [2] F. E. Kiamiler, P. Marchand *et al.*, Performance comparison between optoelectronic and VLSI multistage interconnection networks. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(12): 1674~1692
J. W. Goodman *et al.*, Optical interconnections for VLSI systems, *Proc. IEEE*, 1984, 72(7): 850~866
- [3] 曹明翠,李洪谱,罗风光, 数字光计算微光学模块体系结构及微光学互连模块的应用. 高技术通讯, 1992, 2(12): 33~36
- [4] J. Jahns, M. J. Murdocca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, 27(15): 3155~3160
- [5] S. H. Song, E. H. Lee *et al.*, Planar optical implementation of crossover interconnects. *Opt. Lett.*, 1992, 17(18): 1253
- [6] T. J. Cloonan, Topological equivalence of optical crossover networks and modified data manipulator networks. *Appl. Opt.*, 1989, 28(13): 2494~2498
- [7] 艾 军,曹明翠,李再光, 互连网络拓扑等价的图分析法. 计算机研究与发展, 1994, 31(3): 29~33
- [8] 艾 军,曹明翠,李再光, 互连网络拓扑等价的多多样性与图分析法. 小型微型计算机系统, 1993, 14(7): 17~23
- [9] 艾 军,曹明翠,李再光, 互连网络拓扑等价的图分析法与逻辑名矩阵. 电子学报, 1994, 22(8): 94~97
- [10] H. S. Hinton, Photonic switching and optical computing based on free-space digital optics. *Proc. SPIE*, 1215 Topical Meeting on Digital Optical Computing (USA, 1990): 132~142
- [11] H. S. Hinton, Photonic switching fabrics. *IEEE Commun. Magazine*, 1990, April, 71~89
- [12] T. J. Cloonan, G. W. Richards *et al.*, Free-space photonic switching architectures based on extended generalized shuffle networks. *Appl. Opt.*, 1992, 31(35): 7471~7492
- [13] F. B. McCormick, F. A. P. Tooley *et al.*, Experimental investigation of a free-space optical switching network by using symmetric self-electro-optic-effect devices. *Appl. Opt.*, 1992, 31(26): 5431
- [14] J. Jahns, M. M. Downs *et al.*, Dammann gratings for laser beam shaping. *Opt. Eng.*, 1989, 28(12): 1267
- [15] 李一男, 位相型计算机源生全息的设计及其在光学计算中的应用. 华中理工大学硕士学位论文, 1992
- [16] Li Yinan, Cao Mingcui *et al.*, Massive spots array generated by computer-generated freneral beam splitter. *Opt. Eng.*, accepted
- [17] C. L. Wu, T. Y. Feng, On a class of multistage interconnection networks. *IEEE Trans. Computers*, 1980, C-29(8): 694~702
- [18] Ai Jun, M. C. Cao *et al.*, Study on free-space optical interconnection networks. *Proceedings of the Sino-Japan Symposium on Engineering Optics (SJSEO '92)*, Beijing. Edited and published by Acta Optica Sinica. 25~28 Oct. 1992: 309~312
- [19] Ai Jun, M. C. Cao *et al.*, Study on optical Omega and crossover networks by use of interconnect matrices. *International conference on Laser '92*. Houston, Texas. Society for Optical & Quantum Electronics. Dec. 7~10, 1992: 551~557
- [20] 艾 军,曹明翠,李再光, 全交叉互连的模拟实现. 光子学报, 1994, 23(4): 308~312
- [21] 曹明翠,李洪谱等, 自由空间规则互连网络矩阵理论和光学四功能交换开关 OMEGA 网络. 光子学

报, 1992, 21(5): 97~105

[22] 王鼎兴, 陈国良, 互连网络结构分析. 北京, 科学出版社, 1990, 10~16

[23] 区益善, 多微机系统与并行处理. 广州, 华南工学院出版社, 1987, 1~8

Optical Implementation of 64×64 Crossover Interconnection Functions

Ai Jun* Cao Mingcui Li Yinan Li Hongpu

Luo Fengguang Xu Jun Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 9 August 1993; revised 18 October 1993)

Abstract Optical interconnection networks have important potential applications in the fields of super-computers and photonic switching network systems etc. Based on the prism gratings and the 65×65 -array Dammann grating designed and fabricated by us, we implemented the 64×64 crossover interconnection functions by using free-space optical interconnection technology. Calculations about output patterns of crossover interconnection functions have been made, which are agreement with our experimental results.

Key words optical interconnection, crossover network, phase grating.

* Department of Computer Engineering, Guangdong Institute of Technology, Guangzhou 510090