

一种灵活扩充的分块式纵横制光互连网络

饶 斌 曹明翠 罗风光 万安君 徐 军

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 提出了一种新型的具有灵活扩充能力的分块式纵横制(Crossbar)光互连网络体系结构,并给出了该网络在最大扩充时光学子系统的物理实现及相应的一些实验结果。该体系结构中可采用自电光效应(SEED)器件作为高速光调制器,采用在单块 GaAs 基片上集成的场效应晶体管-自电光效应器件(FET-SEED)作为逻辑光开关器件。这种分块式网络体系结构,可以灵活地采用编码规则和选择一块、二块或四块场效应晶体管-自电光效应器件来提供可扩充的光接收模块的数目,解决了常规纵横制网络不易扩充的问题。但该种网络的最大规模为 32×32 。这种网络体系结构用在构造分布式多个计算机组成的网络计算应用中特别理想,在同步数字系列交叉互连系统的交叉连接矩阵的实现中也很有竞争力。

关键词 光互连, 纵横制, 自由-光效应。

1 引 言

自由光波作为一种信息载体具有高带宽、高密度、无串扰、互连功耗低、扇出能力强等优点。在信息处理能力方面,光子现在还远逊于电子。但在输入/输出能力方面,电子却远逊于光子。这些已是科学界的共识。由于光逻辑存储在目前技术水平下难以实现,所以在涉及光逻辑处理功能的地方必须使用光电混合的光逻辑开关器件。从光学双稳态的研究算起,光互连网络的研究已有十余年的历史。在这段时期内,光逻辑开关阵列器件已从最早的电压控制的对称自电光效应器件发展到场效应管和量子阱单片储存场的场效应晶体管-自电光效应器件及大规模 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 和量子阱混合集成的 CMOS-SEED 器件^[1, 2],甚至还有把半导体激光光源、CMOS 电路、MSM 探测器集成在一起的 VCSEL/MSM (vertical-cavity surface emitting laser/metal-oxide-metal) 光逻辑开关阵列器件。基于光逻辑开关器件的光互连网络的结构从最早的基于对称自电光效应器件的多级网络^[3]发展到基于场效应晶体管-自电光效应器件灵巧像素的多级网络^[4]。在结构更简单、封装更容易的应用系统要求下,现在已报道有多种基于具有复杂逻辑处理的 CMOS-SEED 或 VCSEL/MSM 的单级互连网络。单级互连网络的结构一般为纵横制结构。所谓纵横制即一个 N 输入端、 N 输出端的互连网络。纵横制网络中,从任意输入端到任意输出端的互连距离都为一步,能完成从任一输入端到任意多个输出端的广播功能。电纵横制网络由于驱动电互连线所耗功率大,同时多路驱动会引起电源电压波动,即所谓的 ΔI 噪声^[5],进而引起假开

关信号。因此电纵横制的规模难以做大，通道速率也不能很高。然而用光来实现纵横制则有可能避开这些问题。为探索更简单的光互连系统体系结构，面向可扩充的系统应用，本文在现有器件水平基础上，提出了一种具有灵活扩充能力的分块式光纵横制互连网络体系结构，并实现了其光学系统部分，证明了该结构的可行性。

2 分块式纵横制体系结构

2.1 光路结构原理

分块式纵横制系统由半导体激光器(LD)、偏振分光棱镜、波片、透镜、光栅、场效应晶体管-自电光效应器件单片集成探测列阵芯片、自电光效应器件高速光调制器构成。整个系统做在一块带有掩埋式磁导轨的金属底座上。在大规模生产时，具有互连成本低廉、稳定性好、连续时延短等特点。其光路原理如图 1(a) 所示。

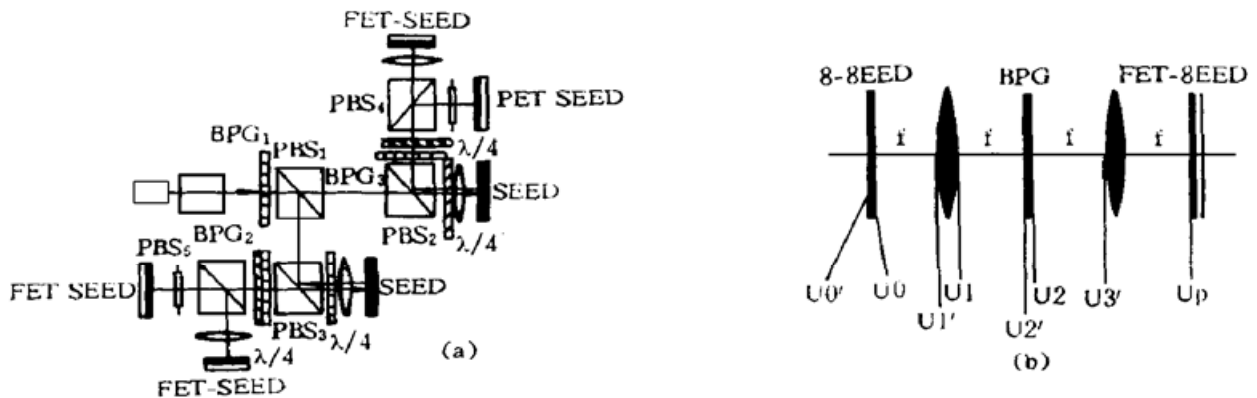


Fig. 1 (a) Separated-Crossbar, (b) Simplified optical layout

半导体激光通过一片二元位相光栅产生 8×8 的点阵，然后按系统扩充要求，可经过一个偏振分光棱镜，也可不经过分光棱镜直接进入调制光路。经过自电光效应器件调制后的信号光反射回原光路，由于光路中 λ/4 波片的影响，由偏振分光棱镜的另一方向出射，再经过一分为四的光栅与 4f 分像系统成像在场效应晶体管-自电光效应器件芯片窗口上。在最大扩充方式下，整个单级分块式纵横制包含四套 4f 系统，4 块场效应晶体管-自由光效应器件芯片。

单模 0.85 μm 半导体激光束经过一片 8×8 的 Damman 光栅后产生 8×8 的泵浦光点阵，再经自由光效应器件光调制器反射成为信号光点阵。每路信号光通过一个偏振分棱镜产生两个“拷贝”，经过一个一分四的位相光栅可产生四个“拷贝”^[9]。每个“拷贝”通过光路寻径到单片集成场效应晶体管-自电光效应器件光探测列阵不同的子窗口。每个子窗口接收了所有各路信号，可以任意 x 选通，从而实现纵横制的全互连功能。下面从傅里叶光学的理论出发来证明上述的光路原理的正确性。从光调制器列阵平面开始的一路光学系统的简化光路如图 1(b) 所示。半导体激光通过一片 8×8 的 Damman 光栅后，在透镜的焦平面上的光场分布是其透过率函数的傅里叶变换，即一个 8×8 的光点阵。其光场分布可写为：

$$u_0 = \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^4 \delta(x \pm \frac{2s-1}{2}p, y \pm \frac{2t-1}{2}p) \tag{1}$$

其中 p 为相邻两点之间的间距。经过一个对称自电光效应器件光调制器后，光波场为：

$$u'_0 = \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^4 \psi_{st} \delta(x \pm \frac{2s-1}{2}p, y \pm \frac{2t-1}{2}p) \tag{2}$$

其中 ψ 为调制矩阵。另外假设一分为四的二元位相光栅的位相变化方向为 x 方向，且周期为 d ，透过率函数为 $t(x, y)$ 。透过率函数的傅里叶变换表达式可写为：

$$T(\frac{x}{f\lambda/d}, \frac{y}{f\lambda/d}) = \sum_{n=-2}^1 \delta(\frac{x-f\lambda/d}{2f\lambda/d} - n) \tag{3}$$

由傅里叶光学理论可得：

$$\mathcal{Q}\{u'_1\} = \mathcal{Q}\{u_0\} \exp(jkf) \exp[-jf\pi\lambda(f_x^2 + f_y^2)] \tag{4}$$

$$u'_2 = \frac{1}{jf\lambda} \exp[j\frac{k}{2f}(x_f^2 + y_f^2)] \mathcal{Q}\{u'_1\} \tag{5}$$

$$u_2 = u'_2 t(x, y) \tag{6}$$

$$\mathcal{Q}\{u'_3\} = \mathcal{Q}\{u_2\} \exp[-jf\pi\lambda(f_x^2 + f_y^2)] \exp(jkf) \tag{7}$$

$$u_p = \frac{1}{jf\lambda} \exp[j\frac{k}{2f}(x_f^2 + y_f^2)] \mathcal{Q}\{u'_3\} \exp(jkf) \tag{8}$$

综合以上各式，计算得：

$$u_p = - \exp(2j kf) \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^4 \psi_{st} \sum_{n=-2}^1 \delta[x - (2n + 1) \frac{f\lambda}{d} \pm \frac{2s-1}{2}p] \delta(y \pm \frac{2t-1}{2}p) \tag{9}$$

由上式可知在场效应晶体管-自电光效应器件探测窗口平面的光强 $|u_p|^2$ 分布为 32×8 的接收光列阵，与设计要求一致。

2.2 可扩充性原理

通过分块与灵活编码，该纵横制可以两种模式工作。

2.2.1 并行数据交叉互连模式

当数据为八路八位并行时，要实现全互连，每路数据必须扇出八路。这可以用一个一分为二的偏振分光棱镜和一片一分为四的二元位相光栅 BPG 来实现。此时光路原理如图 2(a) 所示。自电光效应器件调制器编码定义为图 2(b) 所示。探测器列阵平面上接收的是四个并排的如图 2(b) 所示的光点阵。共有 2 块这样的探测器列阵。当数据为十六路四位并行时，要实现交叉互连，每路数据必须扇出十六路，这可以用二个偏振分光棱镜和一片一分为四的位相光栅来实现。此时光路原理如图 1 所示。自电光效应器件调制器编码定义为图 2(c) 所示。探测器列阵平面上接收的是四个并排的如图 2(c) 所示的光点阵。共有四块这样的探测器列阵。

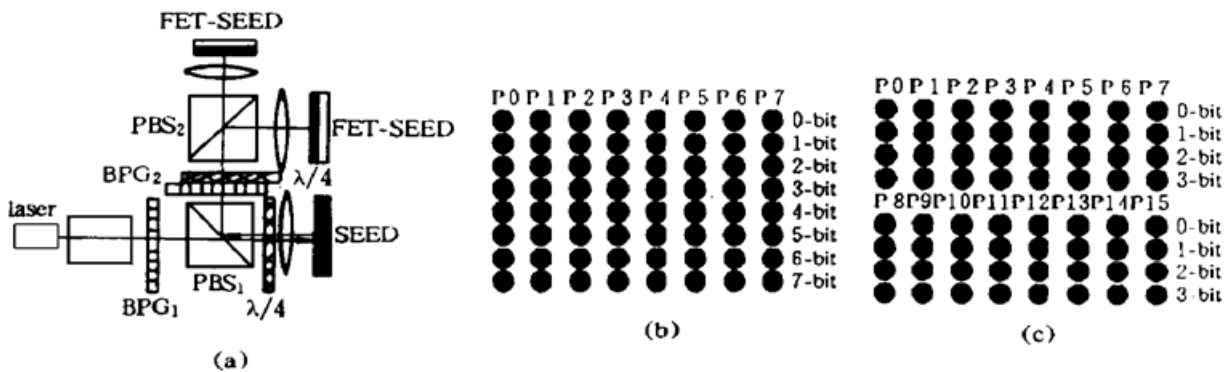


Fig. 2 (a) Configuration mode I, (b) Coding of SEED modulators, (c) Coding of SEED modulators

实际上，由于场效应晶体管-自电光效应器件单片集成的 CMOS-SEED 混合集成器件的发展，并行传输的数据位数受到的限制不大，更重要的是端口数目的多少。

2.2.2 串行数据交叉互连模式

当数据是十六路串行时，此时光路原理如图 3(a) 所示。自电光效应器件调制器编码定义如图 3(b) 所示。在图 3(b) 中所有标有相同通道号的自电光效应器件都用内部互连线连接。因此在此时每路信号已扇出了四路，只要再经过一片一分为四的光栅即可扇出十六路。探测器阵列平面上接收的是四个并排的如图 3(c) 所示的光点阵。共有 1 块这样的探测器阵列。当数据为三十二路串行时，此时光路原理如图 1 所示。自电光效应器件调制器编码定义为图 3(c) 所示。在编码调制时已利用内部互连线扇出了两路，再经过两个偏振分光棱镜及一片光栅，总共扇出了三十二路。探测器阵列平面上接收的是四个并排的如图 3(c) 所示的光点阵。这样的探测器阵列共有四块。

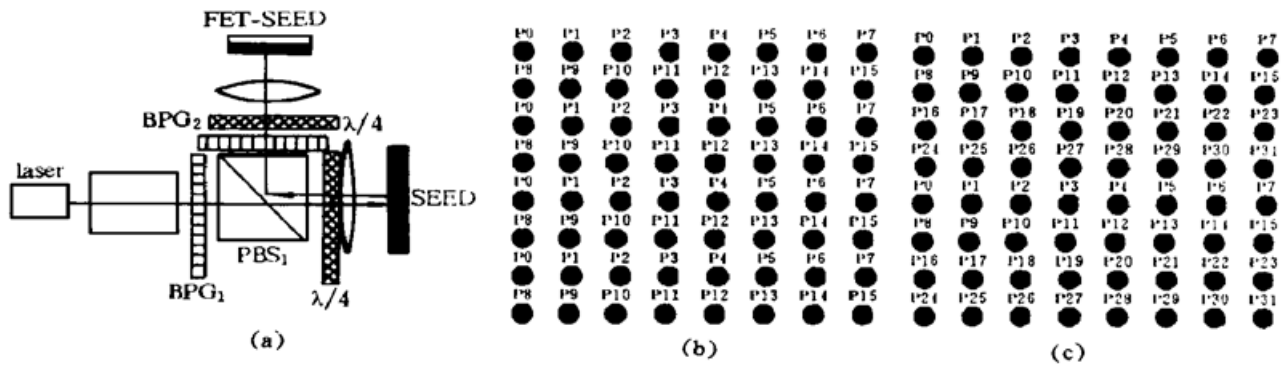


Fig. 3 (a) Configuration mode II, (b) Coding of SEED modulators, (c) Coding of SEED modulators

3 分块式光纵横制的光学系统实现与实验结果

在实验中实现了 32×32 分块式纵横制光互连网络光学系统。该系统采用掩埋式磁导轨固定，具有高精度、高稳定性特点。整个系统包括半导体激光器准直系统、四套 4f 分像系统、照明观察系统等。

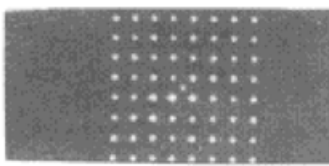


Fig. 4 Spots array photograph on SEED modulator window

图 4 是自电光效应器件调制器窗口平面上的输入光点阵照片。图 5 是各路光信号均调制为“1”时，用 CCD 扫描到的输出光点阵光强分布图。实测的光点阵光强均匀性为 89%。

图 6 是所有各路光信号均调制为“1”时，在任意一个场效应晶体管-自电光效应器件芯片探测窗口位置所照的光点阵照片。场效应晶体管-自电光效应器件的每个子窗口(每个子窗口可接收三十二路入射光信号)对应一个输出端口。每片场效应晶体管-自电光效应器

件上有八个子窗口，共有四片场效应晶体管-自电光效应器件，所以共有三十二个输出端口，

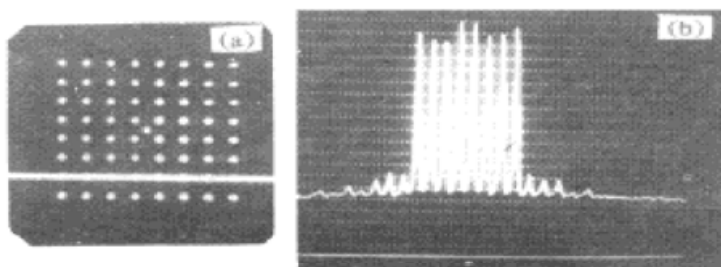


Fig. 5 Photographs of 8×8 spots array (a) and its intensity from CCD scanner (b)

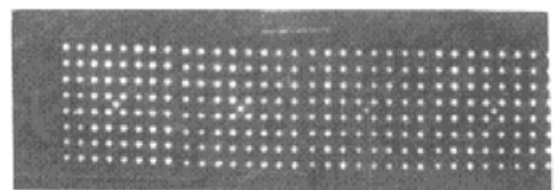


Fig. 6 Photograph of arrays on detect-window of FET-SEED chip

实际上实现了 32×32 的纵横制功能。

通过使用不同的编码规则和不同的场效应晶体管-自电光效应器件可以实现 16×16 、 8×8 (八位并行数据) 等不同规模的纵横制, 而且每路光学系统与 32×32 纵横制完全一致, 只是所需的路数、编码规则不同、场效应晶体管-自电光效应器件芯片窗口定义不同而已。因此它们的光学系统实现不再一一赘述。

4 网络特性

从网络的结构原理及所使用的器件特性出发, 该网络具有如下特点:

1) 所有的动态路的开关功能由场效应晶体管-自电光效应器件芯片上集成的电逻辑来完成: 可以无冲突地实现异步连接(只要不发生目的地冲突);

2) 自电光效应器件高速光调制器状态翻转时间为 10 ps 量级: 场效应晶体管-自电光效应器件可探测变化速度达 10^{-11} 的光信号。网络为单级, 连接时延很短。系统可重构速率理论上与场效应晶体管-自电光效应器件芯片上电逻辑状态改变时间一致;

3) 该系统所使用的器件在大规模生产时成本低廉;

4) 该系统具有 32×32 内的规模可扩充能力(只需要换光栅及几片场效应晶体管-自电光效应器件芯片);

5) 由于光信号带宽高, 传输速率高, 应用于系统时有很强的升级可扩充能力, 而这种特性电互连网络很难拥有;

6) 当 CMOS-SEED 混合集成技术发展出更强的电逻辑功能时, 可同时结合电的扇出能力, 实现更大规模的互连能力。

结 论 本文提出了一种可扩充的分块式纵横制光互连网络体系结构, 并实现了最大扩充时的光学系统。这种网络结构简单、成本低廉、可扩充性好、互连能力优于其他拓扑结构, 可广泛应用于通讯的交叉互连模块(如同步数字系列交叉连接矩阵)和由基于多个高性能工作站的成组计算系统, 有效地提高系统的性能价格比。

参 考 文 献

- [1] A. L. Lentine, D. A. B. Miller, Evolution of the SEED technology: bistable logic gates to optoelectronic smart pixels. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(2): 655~ 669
- [2] K. W. Goosen, J. A. Walker, L. A. D'Asaro *et al.*, GaAs MQW modulators integrated with silicon CMOS. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, **7**(4): 360~ 362
- [3] Mingcui Cao, Hongpu Li, Li Yuan *et al.*, A novel free-space multistage interconnection network and its optical implementation. *Opt. Rev.*, 1997, **4**(3): 349~ 353
- [4] F. B. McCormick, Five-stage free-space optical switching network with field-effect transistor self-electro-optic-effect-device smart-pixels arrays. *Appl. Opt.*, 1994, **32**(8): 1601~ 1618
- [5] Joydeep Ghosh, Anujan Varma, Reduction of simultaneous switching noise in large Crossbar networks. *IEEE Trans. Circuits & Syst.*, 1991, **38**(1): 86~ 99
- [6] Rick L. Morrison, Sonya L. Walker, Tom J. Cloonan, Beam array generation and holographic interconnections in a free-space optical switching network. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2512~ 2518

A Scalable Optical Separated-Crossbar Network

Rao Bin Cao Mingcui Luo Fengguang

Wan Anjun Xu Jun

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

(Received 19 November 1996; revised 25 January 1997)

Abstract A novel, flexibly scalable optical separated-Crossbar network configuration is proposed. Optical sub-system is physically implemented. We present experimental results of the optical sub-system. Network configuration of separated-Crossbar employs the SEED devices as high-speed optical modulators and the FET-SEED device integrated on a single GaAs chip as optical logic array. This configuration solves the problem that a Crossbar is hardly scalable by employing flexible code rule and one, two or four FET-SEED chips to provide scalable optical channel receivers. But the size of the separated-Crossbar is limited within 32×32 . This network configuration is especially promising in network computing application based on distributed computers. And it is competitive in realization of Cross-connect matrix of SDH Cross-connect system.

Key words optical interconnection, Crossbar, SEED.