

基于层状固定光折变全息的 单块光学修正的 γ 网络*

闫晓娜 刘 波 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘 要 提出一种利用 CO_2 激光热固定的层状光折变体相位全息在一块晶体内实现一个固态微小化光学系统的方法。理论分析证明利用双面线状激光加热的方案可以形成适合热固定的层状温度分布。初步实验中, 在一块 LiNbO_3 光折变晶体中建立了单级的修正的 γ 网络。由此表明把一个复杂的光学系统微小化组装在单块的晶体中是可行的。

关键词 修正的 γ 网络, 全息光学元件, 光折变全息, 激光热固定。

1 引 言

由于三维自由空间光学系统能够提供宽带和无串扰的高密度互连而广泛应用于信息处理、光计算和光开关。在过去的几年中, 已有人提出堆栈集成^[1], 平面集成^[2], 反射-衍射折叠集成^[3]和偏振光学集成^[4]等方法, 把一个复杂的光学系统小型化以增强系统的稳定性和紧凑性。但是, 由于在这些方法中二维的光学信号沿着曲折的路径传播, 因此反射光学元件的离轴失真是不可避免的, 而且用这些方法建立的集成光学器件不可重构, 限制其在互连中的灵活应用。

光折变光学由于其内在的并行性和宽带通讯特性在信息处理中发挥了越来越重要的作用^[5]。光折变体全息由于具有高的衍射效率和实时全息的特性特别适用于可重构的光学互连^[6, 7]。最近, 我室提出利用 CO_2 激光器局域热固定光折变全息^[8], 为在晶体中选择性地建立光折变全息器件提供了可能。

本文提出利用激光热固定的层状光折变体全息在一块晶体中实现一个固态的光学系统。初始实验中, 作者在一块 LiNbO_3 光折变晶体中建立了单级修正的 γ 网络。

修正的 γ 网络是一种可重排的互连网络^[9], 包括三种互连函数: 两个加减 2^l 函数和一个 bar 函数。网络需要 1×2 或 2×2 的开关, 而不是如 γ 网络^[10]需要 1×3 或 3×3 的开关, 因此更适合于光学实现。如果不考虑开关元件的功能, 在网络的第 0 级, 各节点的每一输入光束扇出两束输出光, 一束直通到同一序号的输出节点, 而另一束则倾斜输出至与直通输出节点在纵向有一个像素位移的节点。在以后的各级, 位移依级次而变。为了在一块

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-08-15; 收到修改稿日期: 1997-11-05

晶体实现修正的 gamma 网络的第 0'级互连, 将在一块晶体的输入和输出端各记录一层全息元件序列。前一层的全息元件将使一输入光束衍射出两束光。一束直通的 0 号光束, 一束倾斜一个节点位移的 1 号光束。输出面的全息元件将使倾斜的 1 号光束再次衍射而垂直于输出面输出。每一全息元件阵列都是由多对平面波各自相干记录、CO₂ 光束侧面热固定的结果。加热的 CO₂ 激光束呈线状。为保证只有一层记录的全息被热固定, 附加的金属热吸收装置吸收要固定区域以外的热量。

由于光折变全息的可擦除性, 因此利用这种方法记录的全息元件可以实时修正。另外, 应用波长调节和角度空分技术可以在晶体的同一位置处记录多个互连通道, 实现可重构的互连。而且由于在这种方法中衍射光束设计成沿光轴传播, 因此不涉及离轴失真的问题。

由上叙述可知, 建立的单块光学系统是紧凑的。同时在实验中由于输入和输出设置成二维阵列, 因此充分利用了三维自由空间光学互连的优越性。

2 修正的 gamma 网络

用光学方法来实现的互连网络通常都局限于节点间规则连接的网络, 因此许多现存的电子互连网络都要加以改变以适合于这一特性。修正的 gamma 网络就是一例, 它是为克服 gamma 网络的不规则的 1×3 和 3×3 的开关连接特性而从其转变而来的, 它的实现只需要简单的 2×2 直通和交换开关, 简化了光学实现。同时为了减少阻塞的可能性和增强系统的容错性, 相对于 gamma 网络, 修正的 gamma 网络中加入了 $n - 2$ 个附加级来实现 N 个输入到 N 个输出的无阻塞可重排的连接。通常, 附加的 i' 级放在 $i - 1$ 级和 i 级之间, 其连接特性与 i 级相同。Mod 级作为一独立级实现输出端的操作。由于每一级(从级 0 到级 $n - 3$) 增加一附加级, 因此, 对任何输入和输出对有 2^{n-2} 个通路可以选择。8×8 的修正的 gamma 网络的连接见图 1。图中附加的 0'级放在第 0 级的前面作为输入级。修正的 gamma 网络的路径控制算法见参考文献[9]。参考文献[10] 也同时给出了其作为可重排无阻塞的互连网络的证明。

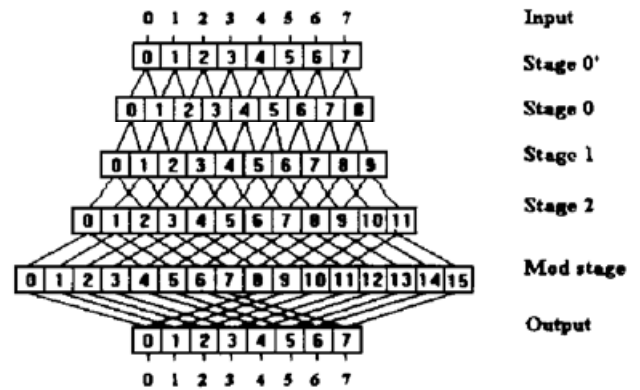


Fig. 1 The modified gamma network

3 CO₂ 激光器侧面热固定的原理

由于 LiNbO₃ 晶体对 CO₂ 激光束有较大的吸收, 因此选择 CO₂ 激光器作为激光热固定源。为了限制激光束只对一层所需的全息进行热固定, 用附加的金属 Cu 吸收固定区域外的能量。为了进行实验设计, 首先根据热传导方程给出理论分析。全息热固定所需的温度应控制在 100~ 200℃ 的范围。

热固定方案如图 2 所示。线状的 CO₂ 激光束从晶体的两面入射加热。图中白色

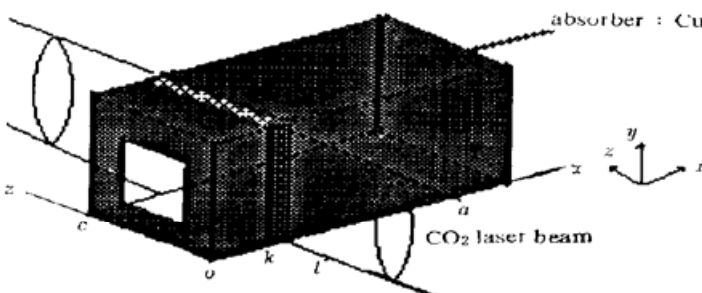


Fig. 2 Configuration of laser layer heating

的部分代表全息的记录面，黑色表示金属热吸收装置，晶体前后的网状面是热固定光束的入射面，晶体上下的点面代表绝热面。

令 $T(x, y, z)$ 表示晶体内温度的分布，则热传导方程和边界条件为^[11]：

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) + \frac{1}{c} g(x, y, z, t) = \frac{K}{c} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}$$

当 $t = 0, \quad T(x, y, z, t) = 27$

当 $t > 0, x = 0$ 和 $x = a, \quad T(x, y, z, t) = 27$

当 $k < x < l$

$$z = 0 \text{ 和 } z = c, \quad \frac{\partial T}{\partial z} + h(T - 27) = 0$$

$$y = 0 \text{ 和 } y = b, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

当 $0 < x < k$ 和 $l < x < a$

$$z = 0 \text{ 和 } z = c, \quad T(x, y, z, t) = 27$$

$$y = 0 \text{ 和 } y = b, \quad T(x, y, z, t) = 27$$

连续的 CO₂ 激光束从晶体的前后两个面对晶体加热，在晶体中其能量分布为

$$I_1 = I_0 \exp(-\alpha z), \quad (z = 0)$$

$$I_2 = I_0 \exp[-\alpha(c - z)]. \quad (z = c)$$

相应地

$$g = - \frac{\partial(I_1 + I_2)}{\partial z}$$

式中 a, b, c 分别为晶体的长度、高度和宽度(相应于 x, y, z 轴)。 $h = 0.29$ ($\text{Jcm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{sec}^{-1}$) 为晶体表面的扩散系数； $C = 2.0$ ($\text{Jcm}^{-3}\text{C}^{-1}$) 为晶体的比热； $K = 3.3$ ($\text{Jcm}^{-1}\text{C}^{-1}\text{sec}^{-1}$) 为热导。初始温度 $T = 27\text{C}$ 。所用的晶体是 LiNbO₃，尺度为 $10(x)$ mm \times $4(y)$ mm \times $4(z)$ mm，折射率 n 为 2.28，CO₂ 激光束在 x 轴方向宽 2 mm，即 $k = 4$ mm, $l = 6$ mm。应用这些条件，在横切面 $y = 0, b/4$ 和 $b/2$ 处，晶体内温度分布的数值解如图 3(a), (b) 和(c) 所示。

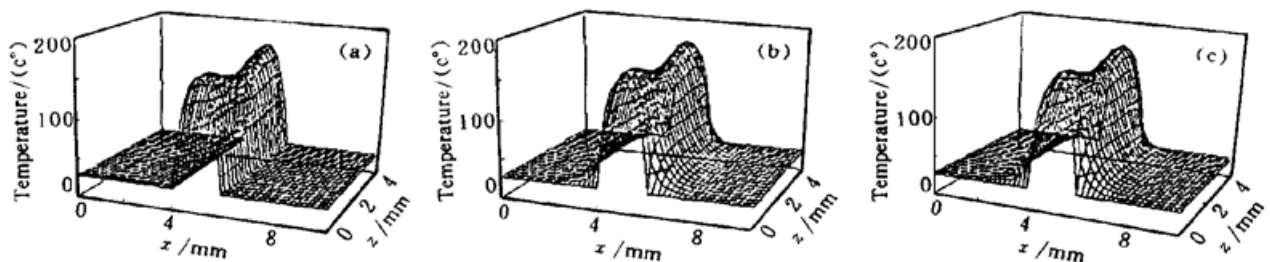


Fig. 3 (a) Temperature distributions on the crystal surface ($y = 0$ mm), (b) Temperature distributions on the quarter plane ($y = 1$ mm), (c) Temperature distributions on the center plane ($y = 2$ mm)

由图可见，激光束热固定区域的温度分布可达到 100~ 200°C 范围，因此推断可以用 CO₂ 激光束热固定晶体内的一层全息。

4 实现修正的 gamma 网络第一级互连的光学设计

4.1 系统的设计

为了叙述的方便，以修正的 gamma 网络的第 0'级为例讨论系统的设计。为了充分利用

三维自由空间光学互连的优越性, 16 个输入点将排列成二维阵列。在输入面输入像素点的排列如图 4(a) 所示, 相应输出面像素点的排列如图 4(b)。其中的圆代表 0 号直通光束, 星号代表 1 号倾斜衍射光束在输出平面的分布情况。

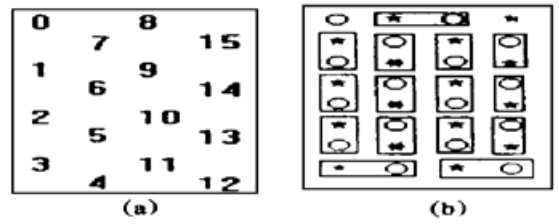


Fig. 4 (a) Arrangement of input points, (b) Arrangement of output points

输入面像素点 0, 1, 2, 3(8, 9, 10, 11) 位置处局域光栅的记录如图 5(a) 所示。在 5(a) 中同时显示了相对于 0, 1, 2, 3(8, 9, 10, 11) 点输出面光栅的记录, 它是由前表面光栅的倾斜衍射光束和从前表面直接入射的光束相干记录的, 实现对前表面光栅的倾斜衍射光束再衍射而使之垂直于晶体的表面输出。前后面光栅的读出如图 5(b)。像素点 4, 5, 6, 7(12, 13, 14, 15) 位置处光栅的记录类似于点 0, 1, 2, 3(8, 9, 10, 11) 光栅的记录, 如图 6(a) 所示。光栅的读出如图 6(b) 所示。

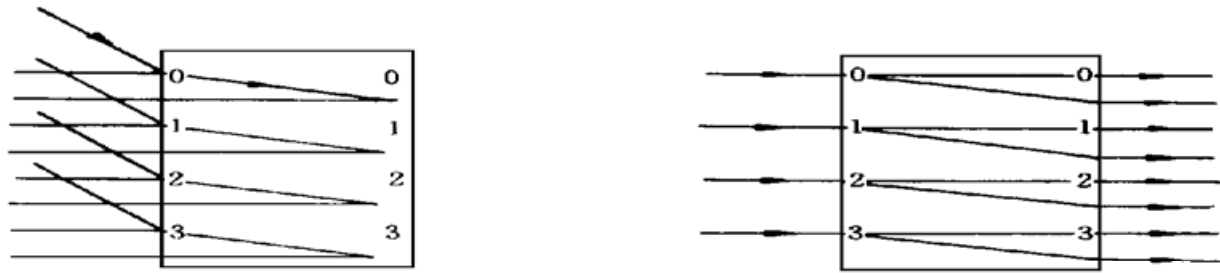


Fig. 5 (a) The recording of the gratings on both the first layer and the second layer, (b) The read-out of the gratings on both the first layer and the second layer

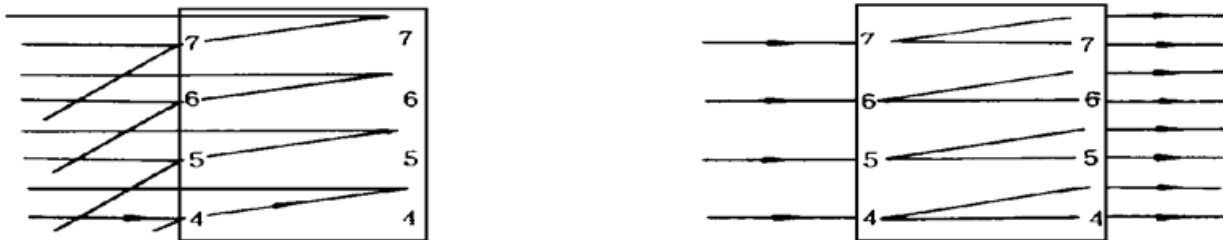


Fig. 6 (a) The recording of the gratings on both the first layer and the second layer, (b) The read-out of the gratings on both the first layer and the second layer

4.2 效率的设计

从原理的描述可知, 50% 的能量分配是最佳的, 这可以通过计算记录光束的光强比实现, 由于篇幅的限制, 关于这方面的考虑将在以后的文章中讨论。

5 实 验

实验原理如图 7 所示。其中 M_2 和 M_4 是光束分束器, M_1 和 M_3 是全反射镜。晶体前的掩模板用来实现光栅的选择性记录, 即只有通过掩模板上透光孔的部分才记录全息元件。

输入和输出面共 32 个光折变光栅均由寻常偏振光记录。实验过程包括三步: 1) 输入面 16 个全息光栅的记录和固定; 2) 输出面 16 个全息光栅的记录和固定; 3) 读输入和输出的光栅, 即实现了互连。第一步, 利用图 8(a) 的掩模板, 第一和第三列的 8 个光栅将由向下倾斜

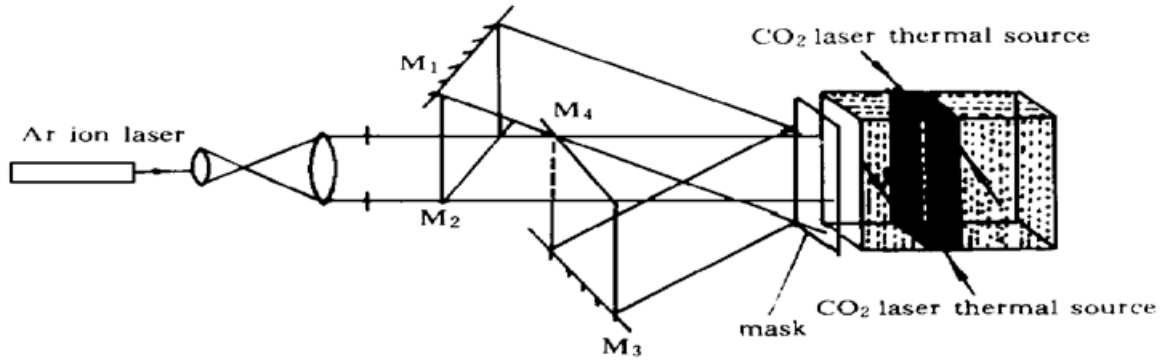


Fig. 7 The experimental setup

的光束和垂直入射的光束记录；而第二和第四列共 8 个光栅则由向上倾斜的光束和垂直入射

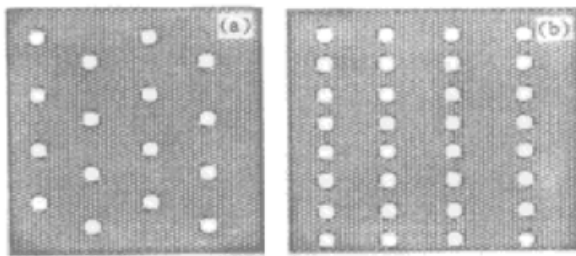


Fig. 8 (a) The masks for the step 1 and (b) the mask for the step 2

的光束记录，CO₂ 激光束的热固定将与光栅的记录同步进行。在第二步，经过如图 8(b) 的模板，读出第一级的衍射光束，它们将与从输入面入射的光束干涉记录输出面的共 16 个光栅。

在初始实验中，选择掺 Fe 重量为 0.01 mol%、尺度为 10 mm × 4 mm × 4 mm 的 LiNbO₃ 晶体作为光折变全息记录介质。输入和输出掩模板的孔径为 0.2 mm，输入面像素点的间距为 1 mm，输出面为

0.5 mm。空气中记录光束的夹角为 6.5°。记录源采用波长为 514.5 nm 的氩离子激光器。热固定采用波长 10.6 μm 的 CO₂ 激光器，其输出的直径为 2 mm 的光束分别通过凹、凸柱状透镜变换成尺度为 2 mm × 4 mm 的线状脉冲 CO₂ 激光束对晶体局域加热。

若输入如图 9(a) 所示的模式，则预测的输出应该如图 9(b) 所示，实验结果的照片如图 10 所示，可以看出，与 9(b) 有相同模式分布。

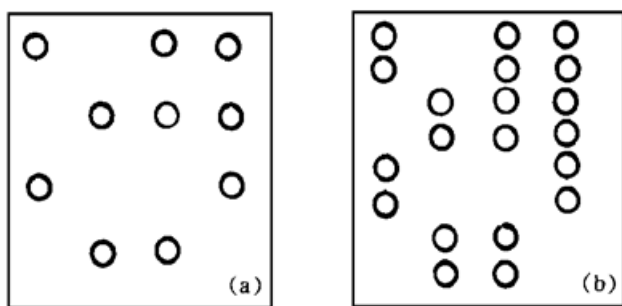


Fig. 9 (a) An input pattern, (b) The predicted output pattern

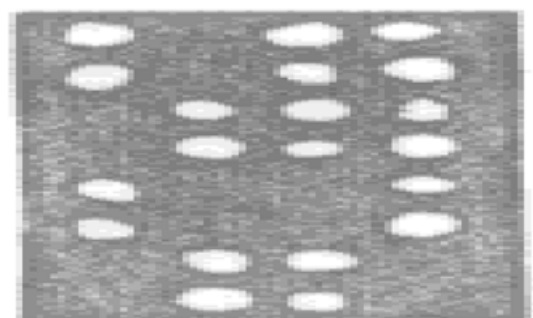


Fig. 10 The experimental photograph

结 论 本文提出了一种利用层状固定的光折变全息在单一的 LiNbO₃ 晶体建立一固态的光学系统。理论分析已证明利用激光热固定的方法可以在要固定的全息处形成合适的温度分布。一个实验系统实现了修正的 gamma 网络的第 0' 级，实验结果与理论分析相符。由此可见把一个复杂的系统建立在单一的一块晶体中是完全有可能的。

参 考 文 献

- [1] K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa *et al.*, Stacked planar optics: An application of the planar microlens. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(19) : 3456~ 3460
- [2] J. Jahns, A. Huang, Planar integration of free space optical components. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(9) : 1602~ 1605
- [3] K.-H. Brenner, M. Kufner, S. Kufner *et al.*, Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming and plastic molding. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(32) : 6464~ 6469
- [4] L. Liu, Y. Yin, H. Peag *et al.*, Design and fabrication of parallel processor modules by polarization-optical stacked integration. *Intern. J. Optoelectronics*, 1995, **10**(1) : 39~ 49
- [5] P. Yeh, A. Chiou, J. Hong, Photorefractive nonlinear optics and optical computing. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(4) : 328~ 343
- [6] S. Wu, Q. Song, A. Mayers *et al.*, Reconfigurable interconnections using photorefractive holograms. *Appl. Opt.*, 1990, **10**(8) : 1118~ 1125
- [7] B. Cantanzaro, J. Ma, Y. Fainman *et al.*, Wavelength-multiplexed reconfigurable interconnect using a volume holographic lens array. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17) : 1358~ 1360
- [8] B. Liu, L. Liu, *et al.*, Local thermal fixing of photorefractive LiNbO₃ holograms by CO₂ laser beam. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(8) : 1342~ 1350
- [9] Y. Wu, L. Liu, Z. Wang, Modified gamma network and its optical implementation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(35) : 7194~ 7199
- [10] D. S. Park, C. S. Raghavendra, The gamma network. *IEEE Trans. Compt.*, 1984, **C-33**(5) : 367 ~ 372
- [11] M. N. Ozisik, Heat Conduction, New York: John Wiley and Sons, 1980

Optical Single-Block Modified Gamma Network Using Layered Thermally Fixed Photorefractive Holograms

Yan Xiaona Liu Bo Liu Liren

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 August 1997; revised 5 November 1997)

Abstract A scheme of using CO₂ laser beams to thermally fix layers of photorefractive phase holograms in a single block of LiNbO₃ crystal to fabricate a solid-state miniaturized optical system is suggested. Theoretical analysis shows that by the heating with two face-to-face narrow beams a layer-like temperature distribution suitable for fixing can be reached. In a primary experiment, a stage of the Gamma network is realized in a single block of photorefractive LiNbO₃ crystal. It is thus seen that to package and miniaturize a complicated optical system into a single block of crystal is possible.

Key words modified gamma network, holographic component, photorefractive hologram, laser heating.