

光折变全息 CO₂ 激光局域热固定*

刘 波 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

徐良瑛

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201800)

摘 要 提出用 CO₂ 激光对记录于 LiNbO₃ 晶体中的全息进行实时实地地局域热固定。通过脉冲加热和加载吸热体, 可以使得温度范围在 100~ 200℃ 之间的区域接近于加热光的形状, 分布于一局部范围。文中给出了加热模型及其数值解。通过得到的最优解参数进行了一系列实验。实验结果显示, 用 CO₂ 激光可以成功地对光折变全息进行实时实地地局域热固定, 并且加热时间短、固定转换效率较高。

关键词 光折变, 体全息, 热固定, CO₂ 激光。

1 引 言

由于光折变全息具有存储容量大、读出时间短、传输速率快等特点, 其已成为近年来研究热点之一, 在光信息存储和光学互连方面已得到广泛应用^[1-4]。对于光折变全息, 读出光在读出信息过程中同时也对记录的全息信息有擦除影响。因此为了长久保存记录的全息信息, 对该信息进行固定是必须的。热固定^[5, 6]是其中应用得最为广泛的一种方法。传统的热固定方法是用炉子加热整块晶体。在某些应用中, 必须对记录于晶体中局部范围内的全息信息进行实地热固定或热擦除(例如, 光电多芯片可重构空间变换光互连系统、空间复用存储系统^[7-9]等), 这种情况下, 炉子加热固定显然是不可行的。有人曾提出用电极阵列对 Sr_{0.75}Ba_{0.25}Nb₂O₆ 中的每块独立全息进行局域热固定^[10]。本文提出用 CO₂ 激光对光折变晶体(LiNbO₃) 中的全息进行实时实地地局域热固定。为了使被加热的区域局限在一较小的范围内, 将晶体的除通光区域外均覆盖一层金属吸热体, 此外为使加热的贯透性较好(即前后表面部分的温度差较小), 用连续脉冲 CO₂ 激光加热晶体。通过控制激光的输出功率、脉冲宽度、占空比、光束大小以及加热边界条件等, 可以很方便地加热晶体至所需的温度范围。理论分析及实验均验证了这一点。并且由于激光加热的无惯性, 加热固定时间较炉子加热固定短, 并且固定转换效率较高。

* 国家自然科学基金资助项目(项目号为 69577021)。

收稿日期: 1997-05-06; 收到修改稿日期: 1997-06-19

2 局域加热的理论分析

使用 CO₂ 激光加热的目的是达到局域热固定的效果, 即在一较小的区域中温度达到固定所需的范围, 而在此之外温度远低于此温度。为达到这一目的, 本文应用金属吸热体和脉冲加热技术。图 1 为 CO₂ 激光局域加热示意图。LiNbO₃ 晶体用铜块覆盖, 在晶体前后各开一孔以使记录光、加热光束以及探测光通过。直角坐标系如图 1 所示, 其坐标原点为前表面上加热激光束的中心。分析中设定加热光束沿 z 轴传输, 光束的能量呈高斯分布。其光强分布表达式如下:

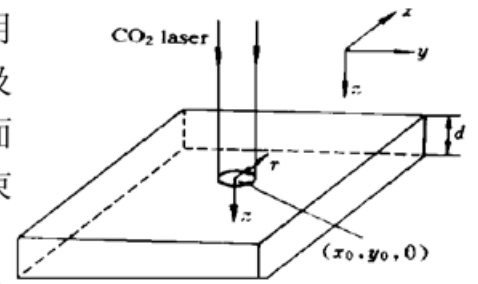


Fig. 1 Schematic diagram of local heating arrangement

$$I(r, t) = [P_0(t)/\pi r_0^2] \exp[-(r/r_0)^2] \quad (1)$$

式中 r_0 为高斯光束的 $\exp(-1)$ 半径, $P_0(t)$ 为 CO₂ 激光器的输出功率。对于本文的模型其热传导方程^[11]为

$$\begin{aligned} (\partial/\partial t)\theta(r, z, t) - (K/C)\nabla^2\theta(r, z, t) &= (1/C)g(r, z, t); \\ \theta(r, z, t = 0) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

式中某一点相当于环境的温度上升用 $\theta(r, z, t)$ 来表示, $g(r, z, t)$ 为辐射至晶体单位体积中的激光功率, C 和 K 分别为晶体的比热和热传导系数, 通常在各向异性晶体中各方向上的热传导系数不一样, 但由于其间的差距较小, 为了简单起见, 假设沿各不同方向上的热传导系数相同。为了达到较好的加热贯透性, 使用连续脉冲 CO₂ 激光加热晶体, 其表达式如下:

$$g(x, y, z, t) = - \sum_0^{\infty} \text{rect}[(t - \frac{T_1}{2} - nT)/T_1](d/dz)[I(x, y, t) \exp(-\alpha z)]. \quad (3)$$

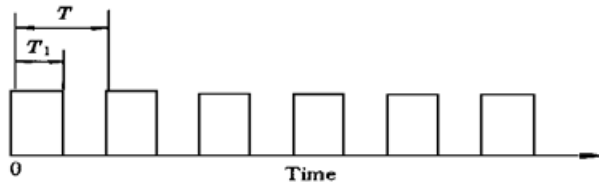


Fig. 2 Intensity profile of pulsed laser beam

式中 T 为脉冲周期, T_1 为每一脉冲中的出光宽度, α 为晶体对 CO₂ 激光的吸收系数。图 2 为加热激光的输出模式。此外为了达到局域加热的目的, 作者在晶体表面覆盖一层金属铜, 在分析中可将其看作恒温吸热体, 这样晶体的边界条件可写成

$$\begin{aligned} (\partial/\partial t)\theta[(x^2 + y^2) < r_h^2, z = 0 \text{ or } z = d, t] &= \gamma\theta; \\ \theta[(x^2 + y^2) > r_h^2, z = 0 \text{ or } z = d, t] &= 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\theta[x = 0 \text{ or } x = X, y, z, t] = \theta[x, y = 0 \text{ or } y = Y, z, t] = 0;$$

式中 γ 为对流热传导系数, r_h 为吸热体上开孔半径。在解方程组(1)、(2)、(3)和(4)以求得满足要求的可调实验参数(如激光器输出功率、脉冲宽度以及占空比等)时, 注意到, 由于热固定的温度范围在 100~ 200℃之间, 如何评判加热效果比较模糊。本文设定最终加热效果使得 $r = 0$ 处温度沿 z 分别的最大值 T_{\max}^0 的平均值尽可能接近而不超过 200℃。求解中用的一些材料及热传导参数见表 1。通过数值差分方法解以上方程组, 得出当 $T_{\max}^0 = 200^\circ\text{C}$ 时, 激光器的输出功率约为 8 W, 脉冲宽度为 4 ms, 占空比为 1/2。图 3 为 T_{\max}^0 随时间的动态变化曲线。从中可看出加热仅需几秒即可达到准稳态, 到达准稳态后, 其温度振荡约为 25℃。图 4 为稳态下晶体中不同半径的温度随 z 的分布。图 5 给出了前、后表面的平均温度随 r 的变化。图 6 为不同半径上的温度最高点到前表面的距离和晶体厚度的比例对 r 的变化曲线。

Table 1. Parameters chosen for LiNbO₃

n	$C / (\text{J}/\text{cm}^3/\text{deg})$	$K / (\text{J}/\text{cm}/\text{deg}/\text{sec})$	$\alpha / (1/\text{m})$	$\gamma / (\text{J}/\text{cm}^2/\text{deg}/\text{sec})$
2.28	2.0	3.3	5000~ 10000	0.29

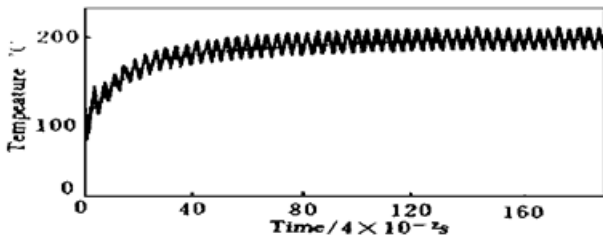


Fig. 3 Time-dependent heating at crystal center in the mode of repeatedly heated with thermal absorbers. The dash line represents the average temperature

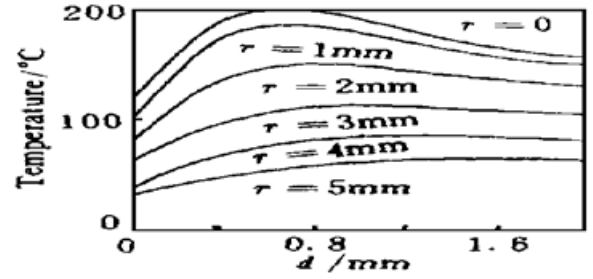


Fig. 4 Temperature distributions in crystal at different radii in the mode of pulsed laser heating with thermal absorbers

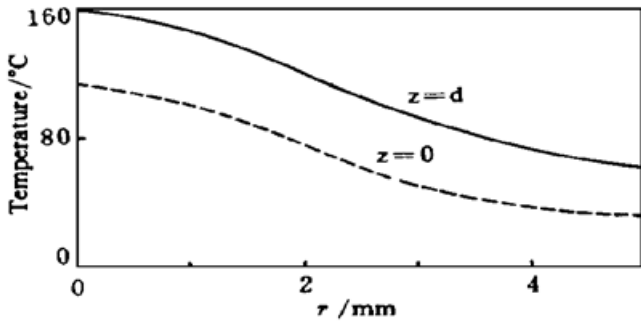


Fig. 5 Radius-dependent temperature distribution on the front (dashed line) and back surfaces (solid line) in the mode of pulsed laser heating with thermal absorbers

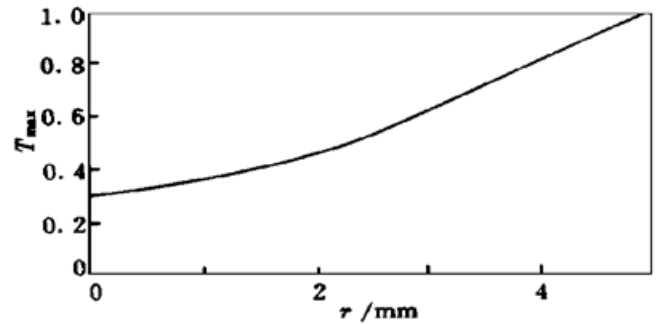


Fig. 6 Radius-dependent ratio of the maximum temperature location from the front surface to the thickness of crystal

通过以上的理论分析，可以看出用 CO₂ 激光加热晶体基本可到达局域的效果。通过脉冲加热和加金属吸热体技术可得到较好的效果。值得注意的是，由于加热固定的温度要求比较模糊(100~200℃)，所以从理论上结果较满意。通过以上分析，对于整块晶体加热固定，实现更为容易。

3 温度检测

为了达到满意的实验效果，对加热过程中温度的实时实地地检测是必不可少的。本文选用一种基于热膨胀和热致折射率变化的非接触式光学干涉法^[12, 13]。

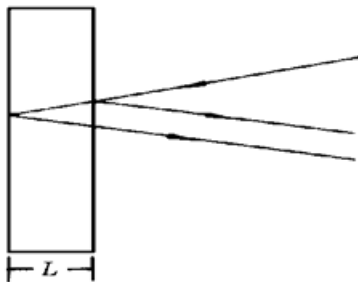


Fig. 7 Schematic diagram of optical interferometer for temperature detection

图 7 为其示意图。一束平面光波沿晶体表面的法线垂直入射晶体，其前、后表面的反射光波由于存在一定的光程差将产生干涉。加热过程中，晶体温度的变化会导致晶体尺寸和晶体平均折射率的变化，从而光程差也相应的改变。干涉条纹也将发生移动，从条纹的移动可以得出温度的变化情况。

晶体中前、后表面反射光波的光程差可表达为

$$\Phi = 2\pi(2nL) / \lambda \tag{5}$$

式中 λ 为入射光的波长， n 和 L 分别为晶体的平均折射率和晶体的厚度。热膨胀和热致折射率变化所导致的光程差的变化可以表示成

$$d\Phi/dT = (2\pi/\lambda) 2nL(\alpha + \beta) \tag{6}$$

其中 $\alpha \equiv (1/L)(dL/dT)$ 为晶体的线性热膨胀系数, $\beta \equiv (1/n)(dn/dT)$ 为晶体的热致折射率变化系数。众所周知, 光程差改变 2π 将导致干涉改变一个条纹(移动一个条纹)。未加热前光程差为 $\phi_0 = 2\pi(2n_0L_0)/\lambda$, 其中 n_0 和 L_0 分别为未加热前的折射率和晶体厚度。最后为了温度检测的方便, 给出温度对条纹的变化表达式

$$\Delta T / \text{fringe} = \left(\frac{d\phi/dT}{2\pi} \right)^{-1} = \frac{\lambda}{2nL(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

在本实验中, 由于温度的分布不均匀(随 r 和 z 的变化而变化), 只能检测温度变化的平均值。所使用的检测光源为 He-Ne 激光, 其波长为 632.8 nm。文献[14]给出了晶体的热膨胀系数和热致折射率变化系数。经过计算, $\Delta T / \text{fringe} \cong 3.3^\circ\text{C}/\text{fringe}$, 其精度满足本文的要求。

数据分析时, 可消去由于晶体的光学缺陷造成的位相差, 这样仅留下由于激光加热导致的光程差变化。此外, 还可应用莫尔条纹技术来消除初始位相差而实时检测温度场的变化。

4 实验和结果

CO₂ 激光局域加热固定光折变全息的结构示意图如图 8 所示。该系统可分为如下四个单

元: 1) CO₂ 激光加热固定单元。一束 CO₂ 激光被斩波器调制成脉冲模式照射到一块 LiNbO₃ 晶体上, 晶体被两块开有小孔的铜块覆盖, 铜块由于具有较大的导热系数可被看成为恒温体。CO₂ 激光束的直径为 1 mm, 铜块上小孔的直径为 4 mm, 晶体是掺铁量为 0.01% 的 LiNbO₃, 厚度为 2 mm, C 轴方向如图中所示。2) 全息写入单元。波长为 514.5 nm 的 Ar⁺ 激光束作为写入光, 该光束被分光透镜分成两束等光强 0.2 W/cm² 光束, 分别作为参考光 R 和信号光 S, 两束光对称于晶体法线入射且它们之间的夹角为 60°, 这样所记录的折射率光栅矢量平行于 C 轴。入射面处两入射光的直径约为 2.5 mm。3) 全息读出单元。由于在实验中需实时监测衍射效率的变化, 因此用一束很弱的 He-Ne 激光来实时读出记录光栅, 由于光强较弱, 可将其看成无擦除读出。该光束波长为 632.8 nm, 光强为 0.01 W/cm², 该光束的入射需满足布拉格条件。衍射光用一光探测器接受。4) 温度检测单元。另一束 He-Ne 激光被扩束后, 从晶体的后表面垂直照射晶体, 晶体的前表面和后表面的反射光将产生干涉条纹, 干涉条纹由一 CCD 接受, 接受到的信号可输入计算机进行分析, 干涉条纹可光学投影到一印有初始干涉条纹图样的透明胶片上, 叠加后的条纹图样可显示温度场的分布情况。

为了比较, 首先在常温下记录一光栅于晶体内, 经充分曝光后, 检测其衍射效率为 22.2%。然后, 擦除该折射率光栅。在再次记录光栅时, 打开 CO₂ 激光, 调整斩波器使调制后的 CO₂ 激光的脉冲周期为 $T = 4 \text{ ms}$, $T_1 = 2 \text{ ms}$, 占空比为 1/2。经过一定的调整, 使 CO₂ 激光器的输出功率为 8.3 W 即可达到所需的加热要求。保持这种状态 12 min, 然后冷却至常温, 用一束 Ar⁺ 激光来照射显影, 最后得到固定后的光栅衍射效率为 19.2%, 相对于常温记录效果, 可认为固定效率为 86.5%。这里固定效率定义为固定后的光栅衍射效率比上固定前

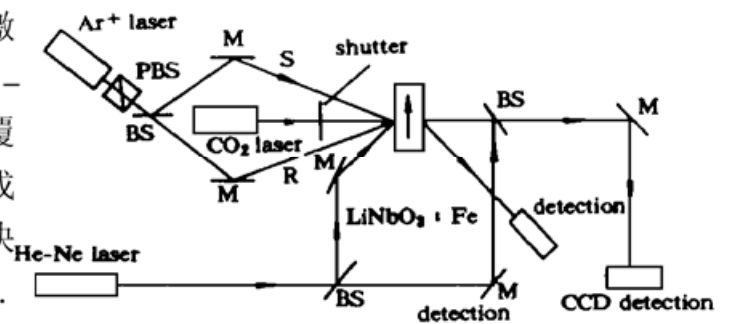


Fig. 8 Experiment arrangement. M's mirrors; BS's beam splitters; S the signal beam; R the reference beam

的衍射效率。图 9 为固定后照射显影的衍射效率变化曲线。加热固定时间为 10 min 和 20 min 分别重复以上实验，得到的衍射效率分别为 17.9% 和 19.8%。其衍射效率的显影变化曲线示于图 10。对比以上实验，可看出加热固定 12 min 后基本达到饱和。用炉子加热固定，一般需 30 min 左右。这是由于激光加热具有无惯性特点，因此其作用时间较短。注意到热对晶体中电子有一定的激发率，温度越高激发几率越大，因而固定时，高温对记录于晶体中的电子光栅有一定的擦除影响。所以认为，对记录后固定，由于激光加热固定作用时间短，固定效率将更高。

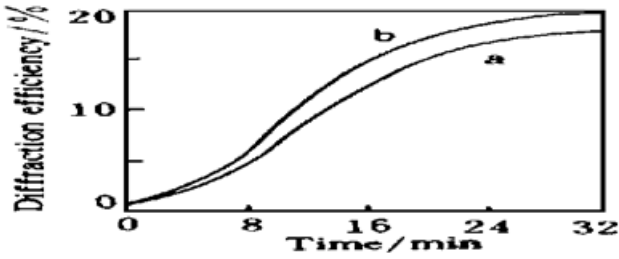


Fig. 9 Readout of a hologram thermally fixed by pulsed laser beam with absorbers: (a) 10 minutes, (b) 20 minutes

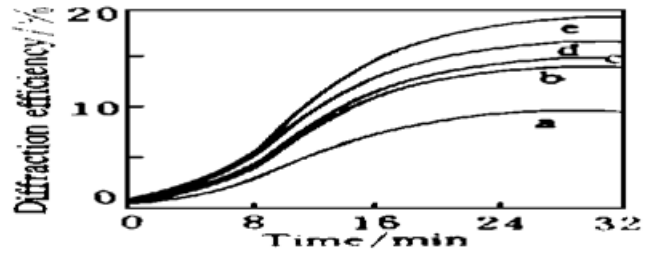


Fig. 10 Readout of a hologram thermally fixed by pulsed laser beam in the duration of 12 min: (a) $T = 16$ ms and $T_1 = 8$ ms, (b) $T = 8$ ms and $T_1 = 4$ ms, (c) $T = 1$ ms and $T_1 = 0.5$ s, (d) $T = 2$ ms and $T_1 = 1$ ms, and (e) $T = 4$ ms and $T_1 = 2$ ms

保持相同的加热固定时间 12 min，改变 CO₂ 激光的脉冲调制，1) $T = 16$ ms, $T_1 = 8$ ms; 2) $T = 8$ ms, $T_1 = 4$ ms; 3) $T = 2$ ms, $T_1 = 1$ ms; 4) $T = 1$ ms, $T_1 = 0.5$ ms。分别

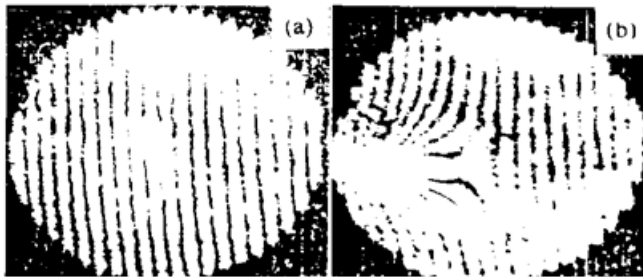


Fig. 11 Photographies of interference fringes in temperature detecting. (a) Before heating and (b) After 10 ms when heating by CO₂ laser beam

进行以上实验。加热固定后的衍射效率显影曲线示于图 9。从图中可看出，当 $T = 4$ ms 和 $T_1 = 2$ ms 时，固定后的衍射效率较高。对比理论分析和实验结果，发现当 CO₂ 激光的脉冲周期太大时，准稳态的温度振荡过大，因而导致固定效果不太理想，而周期过小时，近后表面部分加热效果不好，同样导致固定效率低。

实验中用于温度检测的干涉条纹图样如图 11 所示。其中(a)为加热前的干涉图样，(b)为加热约 10 ms 时的干涉图。

通过以上实验得出几条结论：1) 用 CO₂ 激光可以对光折变曲线进行局域热固定；2) 应用脉冲加热和覆盖金属吸热体技术可较好地实现热固定；3) 固定时间较短；4) 固定效率较高。

结论和讨论 本文提出一种全新的局域热固定方法。用 CO₂ 激光可将光折变晶体中某一小区域加热至热固定所要求的温度范围，从而固定了记录于其中的光折变全息。由于控制方便，用该方法可对记录于光折变晶体中的全息进行实时实地地热固定。相对于传统的加热固定方法，激光加热固定操作方便、作用时间短，且固定效率也较高。干涉法温度检测技术可用来实时地监控温度的变化。

可以理解由于激光加热导致的温度场不均匀而使得固定后的全息图质量将较为复杂，但

从实验效果可以理解这对光互连的应用影响较小, 对图像存储的影响将是以后的研究方向。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S. Y. Kung *et al.*, Optical interconnects for VLSI systems. *Proc. IEEE*, 1984, **72**(3) : 850~ 866
- [2] P. Yeh, A. E. T. Chiou, J. Hong, Optical interconnection using photorefractive dynamic holograms. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(28) : 2093~ 2095
- [3] D. Psaltis, D. Brady, K. Wagner, Adaptive optical networks using photorefractive crystals. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(22) : 1752~ 1759
- [4] J. E. Ford, Y. Fainman, S. H. Lee, Reconfigurable array interconnection by photorefractive correction. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(36) : 5363~ 5377
- [5] J. J. Amodei, D. L. Stuebler, Improved electrooptic materials and fixing techniques for holographic recording. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(1) : 390~ 396
- [6] M. Carrasosa, F. Agulló-López, Theoretical modeling of the fixing and developing of holographic grating in LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(12) : 2317~ 2322
- [7] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, A. J. Daiber *et al.*, Digital holographic storage system incorporating thermal fixing in lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(11) : 1615~ 1617
- [8] D. Psaltis, G. Barbastathis, A. Pu, Holographic memories. *Proc. SPIE*, 1996, **2778** : 418~ 421
- [9] L. Hesselink, J. Heanue, M. C. Bashaw, Holographic digital data storage system. *Proc. SPIE*, 1996, **2778** : 410~ 413
- [10] Y. Qiao, Ming Tong, Electrical fixing of photorefractive holograms in Sr_{0.75}Ba_{0.25}Nb₂O₆. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8) : 1004~ 1006
- [11] M. Mansuripur, G. A. Neville Connell, J. Goodman, Laser-induced local heating of multilayers. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(7) : 1106~ 1114
- [12] K. L. Saenger, J. Gupta, Laser interferometric thermometry for substrate temperature measurement. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(8) : 1221~ 1226
- [13] R. A. Morgan, K. I. Kang, C. C. Hsu *et al.*, Measurement of the thermal diffusivity of nonlinear anisotropic crystals using optical interferometry. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(36) : 5266~ 5271
- [14] V. V. Zhdanova, V. P. Klyuev, V. V. Lemonov *et al.*, Thermal properties of lithium niobate crystals. *Sov. Phys. Solid State.*, 1968, **10**(9) : 1360~ 1364

Local Thermal Fixing of Photorefractive LiNbO₃ Hologram by CO₂ Laser

Liu Bo Liu Liren

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

Xu Liangying

(Shanghai Institute of Silicate, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 16 May 1997; revised 19 June 1997)

Abstract An real-time and in-situ fixing method by heating with a CO₂ laser beam is suggested to thermally fix a small local hologram in a bulk of Fe:LiNbO₃ photorefractive crystal. To form a heating-up to 100~ 200°C volume with the shape similar to the heat transfer equations, different heating modes with or without metal absorbers for heat-guiding by using a continuous or pulsed laser beam are analyzed. The optimal mode may be the case of pulsed heating with absorbers. On this basis, experiments are designed and demonstrated. It is shown that the fixing process by CO₂ laser beam is very short compared with the process by oven, and the fixing efficiency is high.

Key words photorefractive, volume hologram, thermal fixing, CO₂ laser.