

CO₂ 激光局域热固定光折变全息 的一种新方法*

李建郎 刘立人 郭迎春 周常河

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 提出用 CO₂ 激光加热后记录固定的方案对 LiNbO₃ 晶体中的全息进行实时实地局域热固定。通过加载绝热体, 利用连续激光加热晶体待固定区域局部范围至接近 200℃, 停止加热开始记录, 至该区域温度降至 100℃时, 将固定一个体全息。文中给出了热传导模型及其数值解。由得到的初步结果参数进行了一系列实验。实验结果显示, 应用这种方案可成功地对光折变全息进行实时实地局域热固定, 并且具有温度更均匀的特点, 所固定的全息质量有较大改善。

关键词 CO₂ 激光, 加热后全息固定, 温度均匀。

1 引 言

CO₂ 激光对光折变全息实时实地局域热固定, 具有加热速度快、固定时间短和固定效率高的优点^[1]。利用其局域能力可在晶体中选择性地建立光折变全息元件, 并可用于建立光电多芯片可重构空间变换光互连系统^[2]和空间复用存储系统^[3~5]。

本实验室曾提出利用 CO₂ 激光对光折变全息实时实地局域热固定^[1], 并已经把炉子加热的先记录后固定和同时记录固定技术方便地用于 CO₂ 激光热固定并取得比较理想的固定效果, Yan^[6]已在单层 LiNbO₃ 晶体中固定实现了单级修正的 gamma 网络。但由于 LiNbO₃·Fe 晶体在 10.6 μm 有较大吸收系数(5000~10000/m), 固定区域吸热前表面和后表面有较大的温差, 对全息会产生不均匀的固定。本文提出了 CO₂ 激光加热后记录固定的方案, 克服了以上两种方法局域热固定光折变全息时所导致的温度差, 取得了较好的固定效果。

2 CO₂ 激光局域加热原理

LiNbO₃ 晶体对 CO₂ 激光有较大吸收, 因此选用 CO₂ 激光器作为激光热固定源。为保证热弛豫时间之内质子光栅充分补偿施主光栅, 用绝热体包裹除固定区域以外的部分。实验设计时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控制在 100~200℃之间。LiNbO₃ 为各向异性晶体, 导热系数分量之间存在差别, 为了简化, 认为其导热系数为常数。

热固定方案如图 1 所示。黑色网格状部分为绝热棉, 圆状白色部分为通光加热记录孔,

* 国家自然科学基金、中国科学院和上海应用物理中心的资助课题。

收稿日期: 1999-01-11; 收到修改稿日期: 1999-03-04

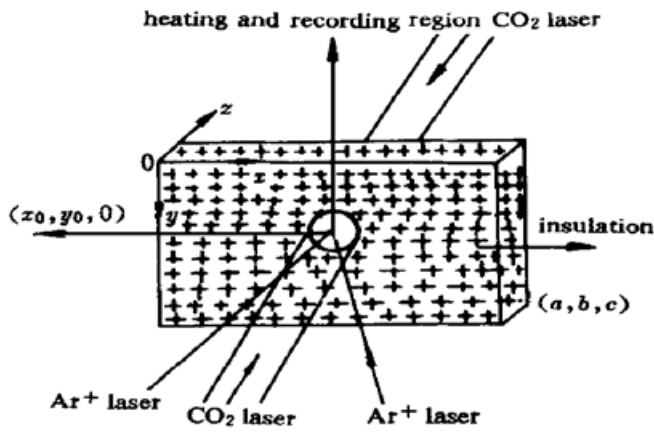


Fig. 1 The fixing schematic

CO₂ 激光束从前后表面入射加热, 两路氩离子激光束干涉录入全息, He-Ne 激光束从前后表面入射分别监测全息光栅强度和温度^[1]。a、b、c 分别为晶体在 x、y、z 方向上的厚度, 坐标原点 0 如图 1 所示, LiNbO₃ 晶体光轴沿 0x 方向。热传导方程和边界、初始条件分别为:

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

当 $t = 0$ 时,

$$T(x, y, z, t) = 23 \quad (2)$$

当 $t > 0$, $x = 0$ 或 $z = a$ 时,

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3a)$$

当 $y = 0$ 或 $y = b$ 时,

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3b)$$

当 $r > r_1$, $z = 0$ 或 $z = c$ 时

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3c)$$

当 $r \leq r_1$, $z = 0$ 或 $z = c$ 时

$$K \frac{\partial T}{\partial z} + h(T - 23) = 0 \quad (3d)$$

连续 CO₂ 激光从晶体前后表面加热, 在辐照区域, 能量分布为

$$I_1|_{z < t_1} = \frac{P_0}{\pi r_0^2} \exp[-\alpha z - (r/r_0)^2] \quad (4)$$

$$I_2|_{z < t_1} = \frac{P_0}{\pi r_0^2} \exp[-\alpha(c-z) - (r/r_0)^2] \quad (5)$$

$$I_1|_{z > t_1} = I_2|_{z > t_1} = 0 \quad (6)$$

热源为

$$g(x, y, z, t) = -\frac{\alpha(I_1 + I_2)}{\partial z} \quad (7)$$

式中 $T(x, y, z, t)$ 为某一点温度, P_0 为单束 CO₂ 激光功率, $g(x, y, z, t)$ 为辐射至晶体单位体积中的激光功率, $C = 2.0 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{k}^{-1}$ 为晶体比热, $K = 3.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 为热传导系数, $h = 0.29 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 为对流换热系数, LiNbO₃·Fe 晶体对 $10.6 \mu\text{m}$ 激光波长的吸收系数 $\alpha = 5000 \sim 10000 \text{ m}^{-1}$, 晶体尺寸取 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times c$, $r_0 = 1 \text{ mm}$ 为 CO₂ 激光束 $1/e$ 的能量半径, r 为 CO₂ 激光束半径, $r_1 = 1.5 \text{ mm}$ 为通光孔半径。 t_1 为 $r = 0$ 处点 $(x_0, y_0, 0)$ 或 (x_0, y_0, c) 温度升高到 200°C 所用的时间。

通过数值差分方法解以上方程组, 得出当 $P_0 = 3 \text{ W}$, $c = 1.2 \text{ mm}$ 时, 固定区域代表点 $(x_0, y_0, 0)$, $(x_0, y_0, c/2)$ 温度 T_1 和 T_2 随时间变化的动态曲线[见图 2(a)], $c = 2 \text{ mm}$ 时的曲线由图 2(b) 给出。从图 2 可看出, CO₂ 激光在约 4 分钟内将晶体待固定区域迅速加热至所需温度范围。 $t > t_1$ 时开始记录, 热传导和通光孔表面对流换热虽导致固定区域温度下降, 但固定区域温度很快趋于均匀, CO₂ 激光辐照方向上晶体厚度越小, 趋于均匀的速度则越快。

绝热体对温度下降进行延缓。当固定区域温度下降到 100℃ 时, 有足够的时间(> 15 min) 保证质子光栅充分补偿施主光栅。图 3(a) 和图 3(b) 分别示出了 $c = 1.2 \text{ mm}$ 和 $c = 2 \text{ mm}$ 两种条件下 $t = t_1$ 时刻加热区域的径向温度分布。图 4 为 $t = 20 \text{ min}$ 时晶体内部不同半径处温度随 z 的变化曲线。尽管厚度对局域性有影响, 但图 3 和图 4 的曲线比文献[1]中的图 7 有更好的温度同时均匀性。

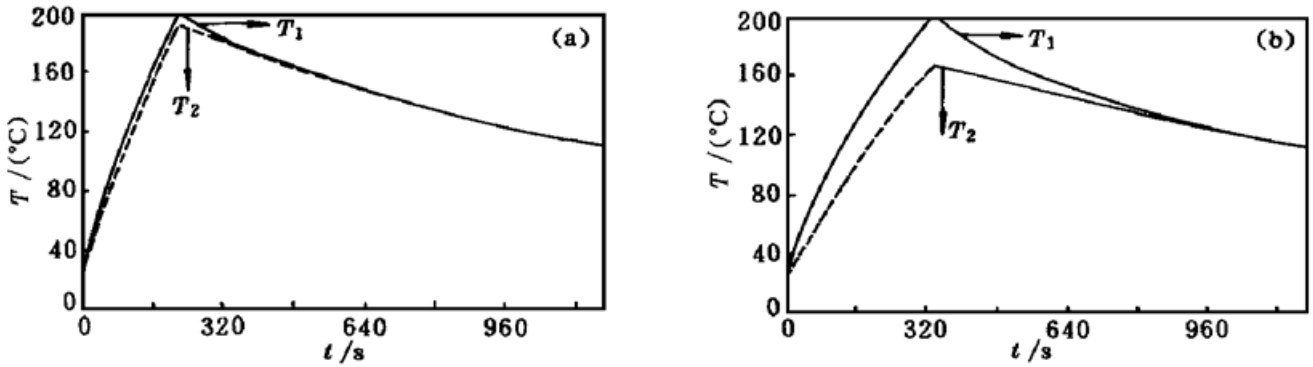


Fig. 2 Time evolution curve of different crystal depth at two represented. (a) $c = 1.2 \text{ mm}$ and (b) $c = 2 \text{ mm}$

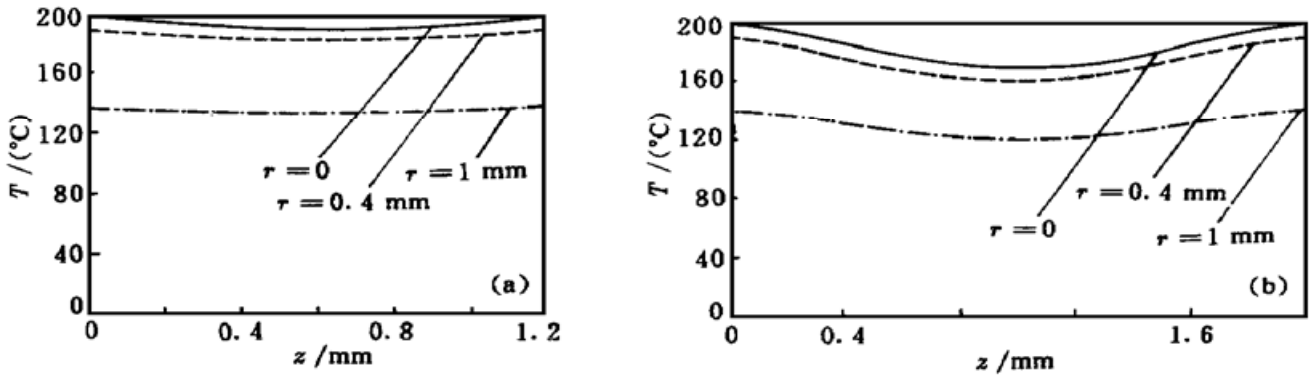


Fig. 3 Temperature distribution at radius direction to different crystal depth (a) $c = 1.2 \text{ mm}$ and (b) $c = 2 \text{ mm}$ at $t = t_1$

通过以上分析可以看出, 用 CO₂ 激光加热晶体并停止后一段时间内局域温度有较好分布。文献[7]从理论上(但不完善, 未考虑调制度随时间的变化)给出了固定折射率全息光栅强度随固定温度的变化曲线, 其它文献^[7~11]和本文作者的实验说明在 100℃(甚至 70℃~200℃)的很大范围都能固定全息, 对加热固定的温度要求仍很模糊, 所以这里得出的结论比较满意。

3 实验和结果

实验原理如图 5 所示, 选用质量分数为 7×10^{-4} 的 Fe·LiNbO₃ 晶体, 几何尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$,

光轴方向如图中所示。直径为 2 mm 的 CO₂ 激光束分成两路从晶体通光孔前后表面入射, 除通光部分外, 其余用绝热棉覆盖。两束波长为 514 nm 寻常偏振的 Ar⁺ 激光束作为记录光, 参考光和信号光之间夹角为 18°, 光强均为 10 mW/cm^2 , 光束直径为 2 mm。两束异常偏振的

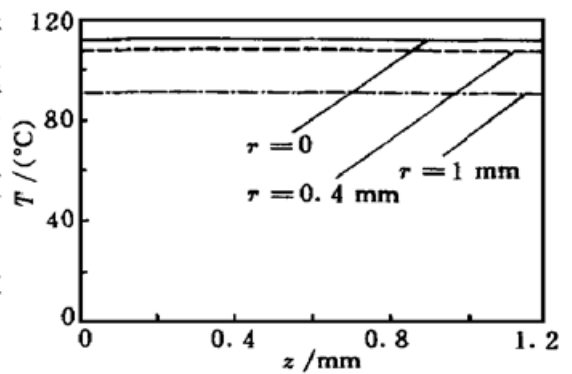


Fig. 4 Temperature distribution at radius direction to crystal depth. $c = 1.2 \text{ mm}$ at $t = 20 \text{ min}$

He-Ne 激光束功率均为 2 mW，其中一束经布拉格角匹配作为光栅探测，光栅衍射光用一探测器接收，另一束被扩束后垂直入射，晶体前后表面反射光干涉形成的条纹实时记录了温度信息，并由一 CCD 摄像器或照相底片接收，通过 CCD 输出到计算机分析监控。

为了比较，常温下在晶体内记录一光栅至饱和，用 He-Ne 光检测其衍射效率为 32%。擦除该折射率光栅。打开 CO₂ 激光按图 4 的情况加热晶体， $P_0 = 3 \text{ W}$ 。由于理论计算与实际情况存在偏差，He-Ne 激光干涉条纹反映的只是辐照区域的平均温度，实验观测到的时间 t_1 约为 5 min，比理论计算的结果稍大。 t_1 时刻后，断开 CO₂ 激光，开始用 Ar⁺ 激光记录全息，保持 12 分钟后迅速冷却至常温。用一束 Ar⁺ 激光来照射显影，得到固定后的最大光栅衍射效率

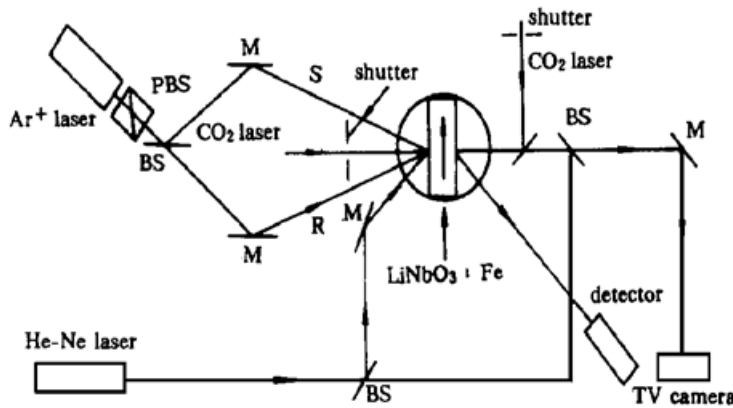


Fig. 5 The experimental setup. M: mirrors; BS: beam splitters; S: the signal beam; R: the reference beam

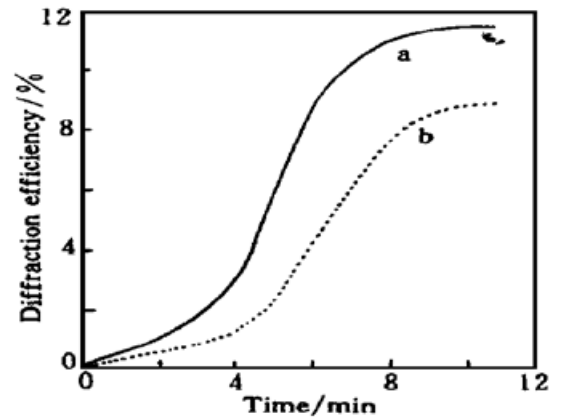


Fig. 6 Readout of a hologram thermally fixed after CO₂ laser heating fixed to different crystal depth. (a) $c = 1.2 \text{ mm}$ and (b) $c = 2 \text{ mm}$

为 11.4%。图 6 中曲线 a 给出了固定后显影过程的衍射效率随时间变化曲线。实验同时测出 t_1 时刻后记录区域在无冷却措施时温度从 200°C 弛豫下降到 100°C 约需 16 分钟，利用这种 CO₂ 激光加热后记录固定的方法完全能够在 LiNbO₃·Fe 光折变晶体中固定体全息。用厚度为 2 mm 的晶体重复以上实验，得到固定后最大衍射效率为 8.3% (图 6 中曲线 b)。需要指出，干涉法只能测定固定区域的平均温度，目前实验室仍缺乏精确分辨毫米级小区域各点温度的直接手段。晶体厚度对固定区域温度均匀性的影响只是通过图 6 显影过程最大衍射效率间接体现。图 7 为温度检测的干涉图样，图 7(a) 为 $t = 0$ 时的干涉图样，图 7(b) 为 t_1 时刻温度达到 200°C 时干涉图样，图 7(c) 为记录 12 分钟后的干涉图样。

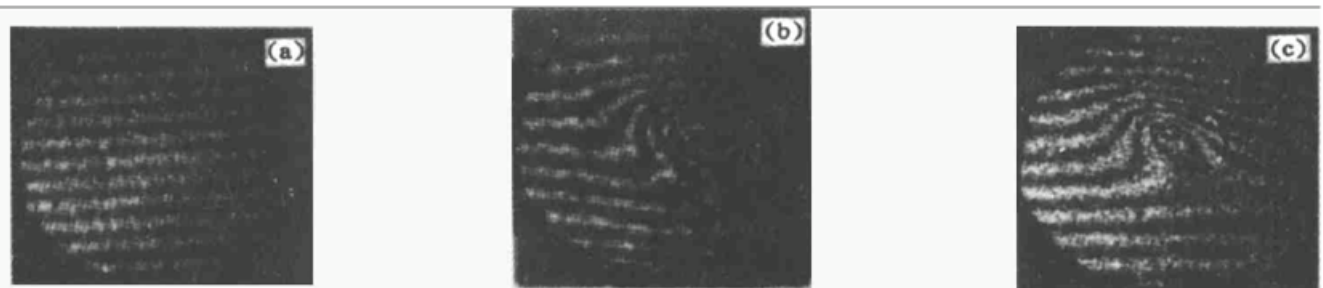


Fig. 7 Photographies of interference in temperature detecting. (a) at $t = 0$, (b) at $t = t_1$ and (c) at $t = t_1 + 12 \text{ min}$

结 论 提出了用 CO₂ 激光加热后记录并局域固定的新方法。利用晶体热传导和加载绝热

体, 克服了激光同时加热记录固定和记录后激光加热固定所导致的温度场不均匀对全息图固定质量的影响, 在晶体径向和厚度 z 向温度相对特别均匀, 并通过选择晶体厚度可进一步优化。初步的实验和分析说明 CO₂ 激光加热后记录固定的方法是可行的。同样的方法也可对整块晶体中光折变全息进行固定。

参 考 文 献

- [1] Liu B, Liu L, Xu L *et al.*. Local thermal fixing of a photorefractive LiNbO₃ hologram by use of a CO₂ laser. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(8) : 1342~ 1349
- [2] Ford J E, Fainmain Y, Lee S H. Reconfigurable array interconnection by photorefractive correction. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(36) : 5363~ 5377
- [3] Heanue J F, Bashaw M C, Daiber A J *et al.*. Digital holographic storage system incorporating thermal fixing in lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(11) : 1615~ 1617
- [4] Psaltis D, Barbastathis G, Pu A. Holographic memories. *Proc. SPIE*, 1996, **2778** : 418~ 421
- [5] Hesselink L, Heanue J, Bashaw M C. Holographic digital data storage system. *Proc. SPIE*, 1996, **2778** : 410~ 413
- [6] Yan X, Liu L, Liu B *et al.*. Single-block optical system using layer thermal fixed photorefractive holograms. *Opt. Comm.* 1998, **154**(1/3) : 87~ 92
- [7] Carrascosa M, Agullo-Lopez F. Theoretical modeling of the fixing and developing of holographic gratings in LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(12) : 2317~ 2322
- [8] Meyer W, Wurfel P, Munser R *et al.*. Kinetics of fixation of phase holograms in LiNbO₃. *Phys. Stat. Sol. (A)*, 1979, **53**(10) : 171~ 180
- [9] Carrascosa M, Arizmendi L. High-temperature photorefractive effects in LiNbO₃:Fe. *J. Appl. Phys.*, 1992, **73**(6) : 2709~ 2713
- [10] Yariv A, Orlov S S. Holographic storage dynamics in lithium niobate: theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(11) : 2513~ 2523
- [11] Strman B I, Carrascosa M, Agullo-Lopez F *et al.*. Two kinetic regimes for high-temperature photorefractive phenomena in LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **15**(1) : 148~ 151

A New Method of Local Thermal Fixing by CO₂ Laser

Li Jianlang Liu Liren Guo Yingchun Zhou Changhe

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

(Received 11 January 1999; revised 4 March 1999)

Abstract A real-time and in-situ recording-fixing method after heating with CO₂ laser beams is suggested to thermally fix a small local hologram in a bulk of Fe:LiNbO₃ photorefractive crystal. With an insulator mantling the crystal, when two cw CO₂ laser beams heat it to form a 200°C volume with the shape of Gauss beam, CO₂ laser beams are blocked and Ar⁺ laser beams are used to record a photorefractive hologram, finally fixed a hologram in crystal before the temperature descended to 100°C. A heat transfer model and numeric solution are given. On the basis of simulation, a series of experimental result are obtained. Both experiment and theory analysis show that this scheme can fix a better hologram in real time and in situ, the temperature distribution is uniform.

Key words CO₂ laser, post recording and fixing, temperature uniformity.