

文章编号: 0258-7025(2001)01-0059-04

光折变晶体中全息图的热固定过程研究

宋雪华 陶世荃 江竹青 刘国庆

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

摘要 报道了 Fe:LiNbO₃ 和 Ce:Fe:LiNbO₃ 晶体中红光波段记录的光栅的热固定实验,详细描述了光折变晶体中全息图热固定的定影和显影工艺。在定影过程中测量了光栅峰值衍射效率随温度的变化。显影实验表明用原参考光显影会引起光栅的自增强衍射、布拉格角偏移、选择角增宽和背景噪声增加,采用非相干光显影可避免这些缺点。提出了一种降低光相干性的方法,从而可以采用原记录光路进行显影。

关键词 全息存储,光折变材料,热固定,定影,显影

中图分类号:TB 877 文献标识码:A

Study on Thermal Fixing Process of Holograms in Photorefractive Crystals

SONG Xue-hua TAO Shi-quan JIANG Zhu-qing LIU Guo-qing

(Applied Physics Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract In this paper, the technology of fixing and developing of thermal fixing of holograms in photorefractive LiNbO₃ crystals is described in detail. The dependence of the peak diffraction efficiency of grating on the temperature was measured at fixing stage. The experimental results of developing show that developing by reference beam usually suffer from self-enhancement, Bragg-angle shift, selective angel broadening and scattering noise increasing. Developing by incoherent light can avoid these disadvantages. In this paper, a method of decreasing coherent degree of light is proposed for developing by original recording optical set-up.

Key words holographic storage, photorefractive crystal, thermal fixing, fixing, developing

1 引 言

体全息存储是当前最有潜力的高速大容量信息存储技术,光折变材料是全息存储的首选材料。但是,在光折变晶体中记录的全息图暗保存时间通常很短,而且在读取过程中会受到读出光的擦除。为了使信息能够长期保存和非破坏性读出,必须对全息图进行固定。固定方法有热固定和电固定等,其中,热固定技术是目前研究得最为活跃并且效果很好的固定技术。

热固定的机理如下^[1]:以 Fe:LiNbO₃ 晶体为例,在一定光图样的写入过程中,光激发的电子经过不同的输运机制运动,在暗区被陷阱俘获,产生陷获电荷图样(即电子光栅)和与此相联系的空间电荷场。这些被陷获的电子在低于 200℃ 温度范围内是稳定的,而晶体中的 H⁺ 离子通常在很低温度下

(例如在 LiNbO₃ 中超过 60℃)就是运动的,并且能被空间电荷场驱动而运动。完整的热固定过程包括两个步骤^[2]:定影和显影过程。定影是在全息图记录进行之中或记录完成之后,将晶体加热到 100~180℃。在此温度下,晶体中的离子被热激活而运动,形成另一个光栅去中和电子光栅,即形成与电子光栅互补的有着相同光栅周期的离子光栅。显影是晶体冷却到室温后,用连续均匀光束照明全息图,对光敏感的电子光栅被部分清除,留下一个部分消补偿的离子光栅显现出来。读出光的照明不会擦除离子光栅,要完全擦除必须将晶体加热到 200℃ 以上,恢复离子和电子的均匀分布。

对于用 488~514 nm 波长的激光在 Fe:LiNbO₃ 晶体中记录的全息图,已有一些热固定的实验研究报告^[1,3,4],考虑到小型化晶体存储器的要求,记录和再现波长有向长波长发展的可能(为 532 nm,670 nm)相应的记录材料有多种不同掺杂的铌酸锂晶体,因此本文主要报道对红光敏感的 Ce:Fe:LiNbO₃

双掺晶体的热固定实验。我们采用在全息图记录之后再定影的方法(后固定),在加热过程中测量光栅衍射效率的变化。晶体冷却到室温后,用原参考光来进行显影,必要时采取措施降低显影光束的相干性,对显影效果进行对比实验。

2 热固定实验

2.1 实验光路

热固定的实验光路如图 1 所示。计算机通过

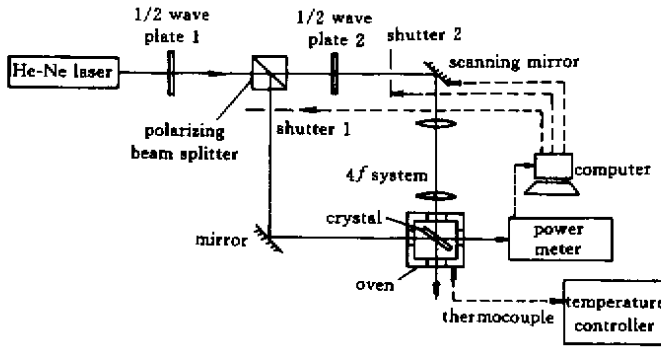


图 1 热固定光路

Fig. 1 Optical set-up of thermal fixing of holograms

2.2 定影实验

先以 Fe:LiNbO₃ 晶体(Fe 0.08%, 在空气中退火, 1050℃氧化 20 h, 实验室编号为 No. 8)为例来观察定影过程, 物光和参考光的入射角分别为 49°和 41°, 波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$, 晶体的折射率 $n = 2.3$, 根据公式

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin[(\theta_1 - \theta_2)/2]}$$

可知光栅间距 Λ 为 $0.152 \mu\text{m}$, 其中 θ_1 和 θ_2 分别是晶体内部参考光和物光与晶体表面法线的夹角。首先在室温下记录电子光栅, 衍射效率为 8%, 然后以 $2^\circ/\text{min}$ 的升温速度加热晶体, 每隔一定温度用振镜扫描晶体读取光栅, 每次读出光栅的峰值衍射效率与温度的关系示于图 2。从图 2 可以看出在 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 之间峰值衍射效率下降很快, 这是因为在此温度范围内, 离子很快补偿了电子光栅, 总的衍射光功率迅速下降。 90°C 以后峰值衍射效率衰减缓慢, 这是因为此时离子已最大限度地补偿了电子光栅, 热激发使得残留的电子光栅幅度衰减, 离子光栅也随之衰减, 但它们之间始终保持动态平衡^[3], 总的衍射光功率逐渐减小。在实际进行定影时, 当光栅的峰值衍射效率衰减缓慢, 趋于明显的

数模/模数转换接口来控制光栅的写入和读出, 包括控制快门 1 和 2 以通过或切断光束, 使功率计按指令采集光功率并存入文件; 控制振镜(Scanning mirror, 角度分辨率约为 0.002°)的转动来改变晶体入射光束的入射角, 实现角度复用和扫描读出。温控器(精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)可以控制加热炉升温的速度、达到的温度和保持温度的时间, 热电偶测量加热炉的温度并反馈回温控器以及时调整加热的功率。

稳态时可停止加热, 定影过程完成。

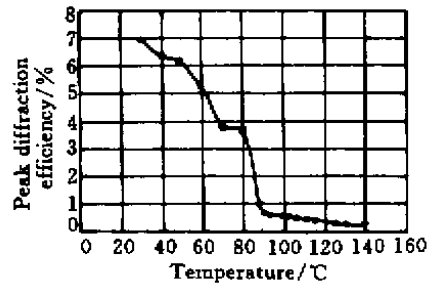


图 2 No. 8 晶体定影曲线

Fig. 2 Fixing curve in No. 8 crystal

2.3 显影实验

按文献报道用于显影的光束种类很多, 有非相干光束^[5]、均匀平面波^[4]、非布拉格匹配的扩展光束^[3]、强白光^[6]以及原参考光^[7, 8]等。我们首先采用原参考光来进行显影。所用晶体为 Ce:Fe:LiNbO₃ 晶体(Fe 0.07%, Ce 0.20%, 未还原, 实验室编号为 D3B), 记录条件同上, 相应光栅间距为 $0.152 \mu\text{m}$, 电子光栅的峰值衍射效率为 22.71%, 定影时升温速度为 $1^\circ/\text{min}$, 最高温度为 150°C , 入射到晶体的光功率密度为 $14.3 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。在参考光

照明晶体过程中,每隔一段时间读一次光栅,光栅衍射效率的变化如图 3 所示。从图中可以看出随着照明时间的增加,光栅衍射效率逐渐上升,这表示电子光栅逐渐被擦除,而与电子光栅相补偿的离子光栅逐渐显影出来。但是,由于离子光栅再现出的物光和用于显影的原参考光可干涉形成重建全息图,因此衍射效率的增加并不仅仅因为离子光栅的显现,还包括了自增强衍射效应^[9]。图 4 分别是热固定前后电子光栅和离子光栅的读出曲线。

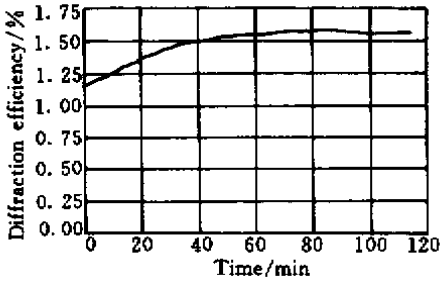


图 3 D3B 晶体的显影曲线(原参考光显影)

Fig.3 Developing curve in D3B crystal developed by reference beam

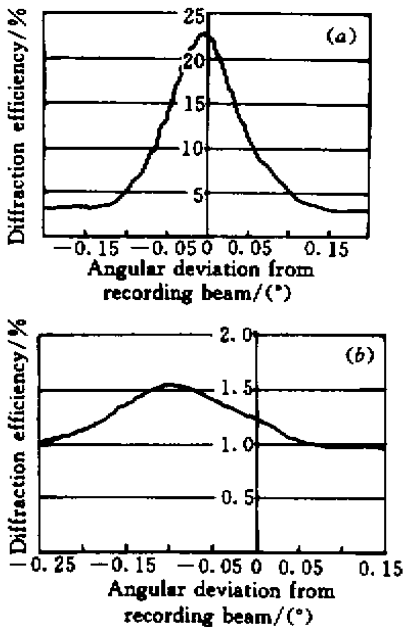


图 4 热固定前后电子光栅和离子光栅的读出曲线(原参考光显影)

(a) 电子光栅 (b) 离子光栅

Fig.4 Readout curve of electronic grating and ionic grating(developed by reference beam)

(a) electronic grating ; (b) ionic grating

D3B 晶体的折射率为 2.3,厚度为 0.88 mm,晶体外物光和参考光与晶体法线的夹角分别为 49°和

41°。晶体水平选择角的理论值^[10]为 0.133(已换算到空气中的值)。在实际测量选择角时,定义去除背景噪声后,峰值衍射效率 1/10 处对应的全角宽度为选择角。图 4 所示的电子光栅和离子光栅的选择角分别为 0.18°和 0.25°,说明原参考光显影使得光栅选择角增宽了。另外,热固定前后光栅有一定的布拉格角偏移,热固定后光栅的背景噪声也增加了。为了避免这些弊病,应当采取措施降低显影光的相干性和引入布拉格失配。

为了降低显影光的相干性,我们使振镜以高频率振动,光束快速地来回扫描晶体,扫描周期约 1 ms,远远小于晶体的光折变响应时间,扫描的角度范围约为 8°,远大于晶体光栅的选择角,这样可以极大地抑制显影光束与衍射光束之间的干涉,因而可近似地认为是非相干光显影。图 5 是 D3B 晶体采用这种非相干光束显影的曲线,实验条件与用原参考光显影的实验相同。

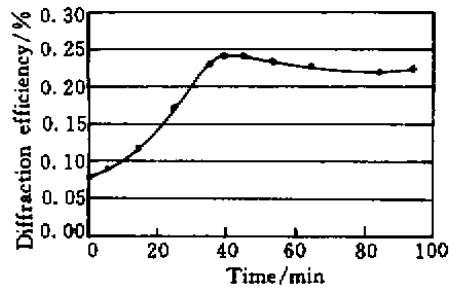


图 5 D3B 晶体非相干光束显影曲线

(电子光栅衍射效率为 0.94%)

Fig.5 Developing curve in D3B crystal developed by incoherent light

(The efficiency of electronic grating is 0.94%)

由于采用的不是布拉格匹配光束,所以不存在自增强衍射效应,显影后光栅的衍射效率均来自离子光栅。热固定前后光栅的读出曲线如图 6 所示,电子光栅和离子光栅的选择角的测量值分别为 0.15°和 0.16°,说明采用非相干光显影后光栅的选择角增宽很小。另外,光栅的布拉格角偏移也很小,信噪比也有所提高。所以,用非相干光显影比参考光显影的效果要好。

3 结 论

我们在 Fe : LiNbO₃ 和 Ce : Fe : LiNbO₃ 晶体中进

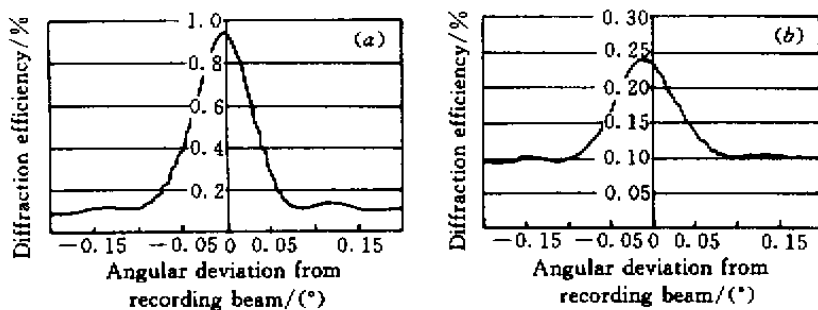


图6 热固定前后电子光栅和离子光栅的读出曲线(非相干光显影)

(a)电子光栅 (b)离子光栅

Fig.6 Readout curve of electronic grating and ionic grating (developed by incoherent light)

(a) electronic grating ; (b) ionic grating

行了红光波段记录的光栅的热固定实验。进行定影实验时,当光栅的峰值衍射效率衰减缓慢,趋于明显的稳态时可停止加热,定影过程完成。从显影过程的实验可知,采用原参考光显影会引起自增强衍射效应、光栅的选择角增宽、布拉格角偏移和背景噪声增加,采用非相干光显影要优于用原参考光显影。采用使原参考光束快速振动扫描法,既有效地降低了光的相干性,又利用了角度复用参考光束的光路配置,不需增加任何新的设备,简便易行,同时又使显影后光栅的性能有所提高。

参 考 文 献

- 1 R. Muller, L. Arizmendi, M. Carrascosa *et al.*. Time evolution of grating decay during photorefractive fixing processes in LiNbO_3 . *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(1): 308 ~ 312
- 2 M. Carrascosa, F. Agullo-lopez. Optimization of the developing stage for fixed gratings in LiNbO_3 . *Opt. Commun.*, 1996, **126**(4/6): 240 ~ 246
- 3 Amnon Yariv, Sergei S. Orlov, George A. Rakuljic.

Holographic storage dynamics in lithium niobate: theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(11): 2513 ~ 2523

- 4 Bo Liu, Liren Liu, Liangying Xu. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(11): 2170 ~ 2176
- 5 Victor Legva *et al.*. Fixing method for narrow bandwidth volume holograms in photorefractive materials. UP Patent No. 5335098, Data of Patent: Aug. 2, 1994
- 6 L. Arizmendi, P. D. Townsends, M. Carrascosa *et al.*. Photorefractive fixing and related thermal effects in LiNbO_3 . *J. Phys.: Condens. Matter*, 1991, **3**: 5399 ~ 5406
- 7 Matthew C. Bashaw, John F. Heanue. Quasi-stabilized ionic gratings in photorefractive media for multiplex holography. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1997, **14**(8): 2024 ~ 2042
- 8 A. Y. Liu, M. C. Bashaw, L. Hesselink. Observation and thermal fixing of holographic gratings in lead barium niobate crystal. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(3): 187 ~ 189
- 9 J. J. Amodei, D. L. Staebler. Holographic pattern fixing in electro-optic crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(12): 540 ~ 542
- 10 Shiquan Tao, Dayong Wang, Zhuqing Jiang *et al.*. Optical Holographic Storage. Beijing: Beijing Polytechnic University Publishing House, 1998. 12, 67 (in Chinese)