

文章编号: 0258-7025(2001)12-1099-04

# 用两种照明方法在 $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$ 晶体中 实现非挥发全息存储\*

刘友文 刘立人 刘德安 周常河  
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

徐良瑛  
(中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 200050)

**提要** 报道了用两种照明方法在  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体中实现非挥发全息存储,一种是用紫外光敏化和红光同时记录的方法,另一种是用氩离子的 458 nm 蓝光敏化和红光同时记录的方法。结果表明第二种方法可以获得更高的光固定(非挥发)衍射效率和光固定效率,但引起弱光致散射。优化的蓝光光强为  $700 \text{ W/m}^2$  左右时,获得最大光固定折射率变化为  $5 \times 10^{-5}$ 。

**关键词** 光折变效应 非挥发全息存储  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体

中图分类号 TP 333.4<sup>+</sup>2 文献标识码 A

## Realization of Non-volatile Holographic Storage in $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$ Crystals with Two Illumination Schemes

LIU You-wen LIU Li-ren LIU De-an ZHOU Chang-he

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

XU Liang-ying

(Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

**Abstract** Realization of non-volatile holographic storage in  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystals with two illumination schemes is reported in this paper, one is with ultraviolet light for sensitization and red light recording proposed by Buse *et al.*, and the other is with 458 nm blue light from  $\text{Ar}^+$  laser for sensitization and red light recording. It is shown that the fixed (non-volatile) diffraction efficiency and the fixing efficiency with the second scheme are higher than those with the first scheme, but the second scheme causes weakly light-induced scattering. When the optimal intensity of blue light is around  $700 \text{ W/m}^2$ , the nonvolatile refractive-index change is up to  $5 \times 10^{-5}$ .

**Key words** photorefractive effect, nonvolatile holographic storage,  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystals

## 1 引言

掺铁铌酸锂光折变晶体有许多应用前景,例如体全息存储<sup>[1]</sup>,可擦除重写和高存储密度是它的主要优点。用带输运模型可以很好地解释光折变效应<sup>[2]</sup>。信号光和参考光干涉形成的非均匀光强激发施主中的电子到导带,在扩散、漂移和光伏打效应的作用下电子在导带中移动,直到被受主所俘获,形成的空间电荷场通过电光效应调制折射率——一个

相位全息就产生了。当用均匀记录光以布喇格角入射到体相位全息上,衍射光将重现信号光,重构了所存储的信息。但这一读出过程最终使电子分布均匀,空间电荷分布被冲掉,全息将被擦除。热固定<sup>[3]</sup>和电固定<sup>[4]</sup>等几种方法可解决这个难题,但它们很难实时实地进行处理,并且储存信息的快速光学擦除也是不可能的,这将影响全息读/写存储的实用化。

Buse 等提出了用铌酸锂晶体掺入不同深度能级杂质铁(浅能级)和(深能级)锰实现非挥发性全息存储的一种有效的解决方法<sup>[5]</sup>。它的全息存储分以下三个步骤,首先用非相干的均匀紫外光,通过导

\*国家自然科学基金(No. 69837020)和中国科学院百人计划资助项目。

带把电子从锰离子转移到铁离子中去,改变晶体对光的吸收,从而可以用可见光对晶体进行全息存储;第二步用紫外光和空间干涉的调制红光同时照射晶体进行存储记录,它可以使调制光的信息同时存储在铁离子和锰离子的光栅之中,第三步关闭紫外光,用红光去抹除铁离子光栅,使所有的电子都陷入到锰离子中去,从而保留了对红光不敏感的锰离子光栅,实现储存信息的光固定。当用红光再进行读出时,储存在锰离子光栅中的信息不会被抹除,从而达到信息的非挥发性存储,但用紫外光的快速光擦除仍是可行的。利用这种方法在双掺杂  $\text{LiNbO}_3:\text{Mn}:\text{Fe}$  晶体中的角分全息复用已经实现<sup>[6]</sup>,这种有效的技术途径将导致更加实用化的全息存储系统的实现。由于在记录阶段紫外光照射区域的全息可以被固定下来,因此可以很方便且有选择性地从记录的全息中固定出一块微小的局域体全息,这比激光加热热固定局域全息更加有效实用<sup>[7]</sup>。这样可以在一单块晶体内构造许多全息单元,从而现实在一块基底上集成一微小的三维光学系统<sup>[8]</sup>。

## 2 实 验

实验所用晶体是用 Czochralski 法生长的掺入 0.011%  $\text{CuO}$  和 0.085%  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  铌酸锂单晶, $\text{Cu}$  和  $\text{Ce}$  分别以价态  $\text{Cu}^{+2+}$  和  $\text{Ce}^{3+/4+}$  存在于晶体中<sup>[9]</sup>,作为深能级中心(产生光折变效应的  $\text{Cu}$  的  $D$  吸收带的截止波长为 620 nm<sup>[10]</sup>,633 nm 的氦氛激光将不能有效地激发  $\text{Cu}^+$  中的电子)和浅能级中心。理论和实验证明了只有氧化的晶体才能实现非挥发性全息存储<sup>[11~13]</sup>,因此我们将生长的晶体在大气中作退火处理,温度为 900℃,时间 6 h。将其切割成大小为 10 mm×10 mm×2 mm,光轴平行于长的棱边的长方体,所有的面进行了光学抛光。

用传统的两波混频法进行全息记录,633 nm 的氦氛激光束分成近乎相等的两束异常光对称地入射到晶体上,它们的夹角为 24°,光束的直径为 2.0 mm,所记录光栅的波矢平行于晶体的光轴。敏化的紫外光是用 75 W 的球形超高压汞灯,滤光后再用会聚透镜聚焦产生的,敏化的蓝光光是用  $\text{Ar}^+$  激光器的 488 nm 寻常光束扩束产生的,敏化光垂直入射在晶体上并覆盖记录的区域。

首先用紫外光作为敏化光进行全息记录。记录前晶体用紫外光(光强  $0.023 \text{ W/cm}^2$ )预照明 1 h,记录时用调制的红光(光强  $0.067 \text{ W/cm}^2$ )和紫外光同

时照射晶体,期间用每隔一定的时间遮挡其中一束光的方法测量光栅的衍射效率——衍射光强与入射光强的比值,待记录稳定后,关闭紫外光,用其中的一束红光进行读出固定并测量衍射效率。双掺杂  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体的记录和固定过程的衍射效率随时间的变化如图 1 所示。

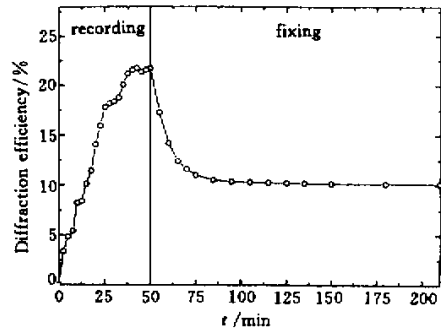


图 1  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体紫外敏化红光记录的记录和固定曲线

Fig. 1 Recording and fixing curves for the  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystal with ultraviolet sensitizing and red light recording

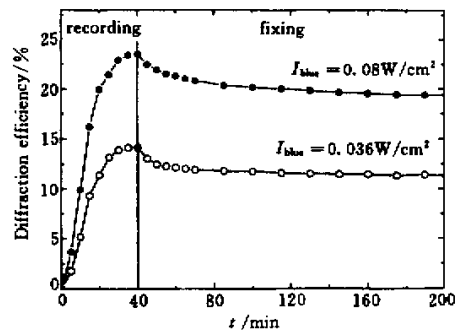


图 2  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体蓝光敏化红光记录的记录和固定曲线

Fig. 2 Recording and fixing curves for the  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystal with blue light sensitizing and red light recording

其次用蓝光作为敏化光进行全息记录。记录的过程与紫外光敏化全息记录一样,只不过记录前晶体是用蓝光(光强  $0.13 \text{ W/cm}^2$ )预照明 20 min。调制的红光光强为  $0.067 \text{ W/cm}^2$ ,敏化的蓝光光强为  $0.036 \text{ W/cm}^2$  和  $0.080 \text{ W/cm}^2$  时,记录和固定过程中晶体的衍射效率随时间的变化如图 2 所示。理论分析表明,当记录的红光光强一定时,太强和太弱的敏化光只能产生弱的空间电荷场,存在一个优化的

敏化光光强,可以产生最大空间电荷场,即记录的体全息有最大的衍射效率<sup>[12]</sup>。因此,我们固定记录的红光光强为 0.067 W/cm<sup>2</sup>,改变蓝光的光强,测量的饱和衍射效率  $\eta_s$ ,非挥发衍射效率  $\eta_n$ ,饱和折射率

变化  $\Delta n_s$  和非挥发折射率变化  $\Delta n_n$  如表 1 所示。折射率的变化是从 Kogelnik 的厚体光栅的衍射效率公式求得的<sup>[14]</sup>。

表 1 双掺杂 LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce 晶体用蓝光敏化非挥发性全息记录的特征参数,  $I_{\text{red}} = 0.67 \text{ W/cm}^2$  不变

Table 1 Characteristic parameters of non-volatile holographic storage with blue light sensitizing in the doped LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce crystal, where  $I_{\text{red}} = 0.67 \text{ W/cm}^2$  is a constant

$I_{\text{blue}} / \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	$\eta_n$	$\Delta n_n$	$\eta_s$	$\Delta n_s$	$\eta_n / \eta_s$
0.036	11.26 %	$3.66 \times 10^{-5}$	13.05 %	$3.95 \times 10^{-5}$	0.86
0.051	15.30 %	$4.30 \times 10^{-5}$	19.55 %	$4.91 \times 10^{-5}$	0.78
0.064	19.40 %	$4.89 \times 10^{-5}$	23.66 %	$5.46 \times 10^{-5}$	0.82
0.080	19.30 %	$4.88 \times 10^{-5}$	23.47 %	$5.43 \times 10^{-5}$	0.82
0.100	15.40 %	$4.32 \times 10^{-5}$	18.70 %	$4.79 \times 10^{-5}$	0.82
0.182	8.90 %	$3.24 \times 10^{-5}$	10.97 %	$3.61 \times 10^{-5}$	0.81

### 3 讨论

从图 1,图 2 可以看出,用紫外光敏化红光记录和蓝光敏化红光记录两种记录方案都可以实现全息的非挥发性存储。紫外光敏化红光记录的饱和衍射效率达到 22%,非挥发衍射效率为 10.1%,固定效率(定义为非挥发衍射效率与饱和衍射效率之比)为 46%。蓝光敏化红光记录的饱和衍射效率和固定衍射效率与敏化蓝光光强有关,在我们实验的蓝光光强范围内(见表 1),固定衍射效率基本上高于紫外光敏化红光记录的固定衍射效率,且平均固定效率达 82%。两种方案的固定效率的区别可能是因为紫外光和蓝光对深浅杂质中心的光激发系数不同,在记录阶段写入深能级的光栅强度不同所致。

光致散射是由于入射光与晶体表面和内部缺陷引起的散射光写入的噪音光栅所致。噪音光栅的存在不但会消耗入射光的能量,而且会降低存储信息读取时的信噪比。我们仔细观察了两种方法记录过程中光致散射的变化。图 3(a)和(b)分别为紫外光敏化红光记录和蓝光敏化红光记录后读出光的衍射图样。从图 3(a)可以看出紫外光敏化红光记录基本上观察不到光致散射,这是由于紫外光为非相干光源,它不但不能在晶体中写入噪音光栅,而且可以达到抑制光致散射<sup>[15]</sup>。但由于紫外光源一般是采用汞灯或者汞氙灯,它们发出的光很难准直,在照明的区域光强分布也不均匀,因此难以固定出调制度均匀的体全息。从图 3(b)蓝光敏化红光记录可以观察到分别与透射光斑和衍射光斑相切的两个弱各向同性(散射光与入射光偏振一致)散射圆环,它

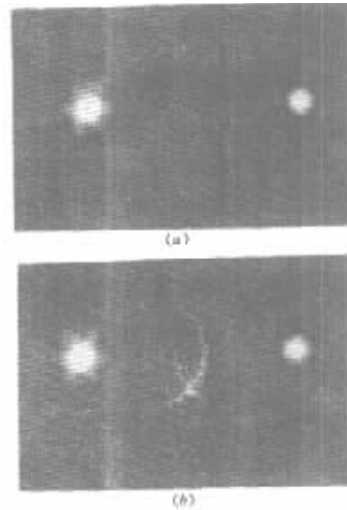


图 3 LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce 晶体全息记录后的衍射图样  
(a)用非相干的紫外光敏化 (b)用寻常偏振相干的蓝光敏化  
Fig. 3 Diffraction patterns of the LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce crystal  
(a)with unpolarized ultraviolet sensitizing and (b)with  
ordinarily polarized blue light sensitizing after holographic recording

从全息记录开始时就出现了,并且随着全息记录散射光强逐渐增强,关闭蓝光后散射光强基本不变。这两个散射圆环是由于敏化的蓝光是相干光,在晶体内写入噪音光栅,然后红光经噪音光栅的衍射产生了散射光锥与观察平面相交产生的<sup>[16]</sup>。图 3(b)中的散射噪声是由相干光的敏化引起的,只用非相干的蓝光敏化可完全消除这个散射噪声而不引入其他散射噪声。实际上还有一个与透射光斑和衍射光

斑相切的圆环,不过它的光强相当弱,所以在图 3(b)并不可见,它是由记录的红光写入的噪音光栅自衍射产生的<sup>[17]</sup>。蓝色的氩离子激光准直度高,扩束后光强分布均匀,可以在晶体内固定出非常均匀的体全息。

从表 1 可以看出,当蓝光光强逐渐增强时,饱和(固定)衍射效率逐渐增加,然后又减小,存在一个优化的敏化光光强,可以使饱和(固定)衍射效率达到最大值,即在晶体内写入最强体光栅,这与我们的理论分析是一致的<sup>[12]</sup>。太弱的均匀敏化蓝光只能从深能级杂质中激发产生非常少的电子,太强的均匀敏化蓝光将会擦除所写入的光栅,这两种情况均产生弱的空间电荷场,导致低衍射效率。在本实验中,当蓝光的光强在  $0.06 \sim 0.08 \text{ W/cm}^2$  左右,饱和和固定折射率分别达到  $4.9 \times 10^{-5}$  和  $5.5 \times 10^{-5}$ 。

## 4 结 论

本文用两种照明方法在双掺杂铜和铈铌酸锂晶体的非挥发性全息存储,一种是 Buse 等提出的用紫外光敏化和红光同时记录的方法,另一种是用氩离子的 458 nm 蓝光敏化和红光同时记录的方法,并对蓝光的光强进行了优化。对这两种记录方法的饱和(非挥发)和光固定衍射效率、光致散射效应进行了比较和讨论。实验结果表明双掺杂  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  晶体是一种有前途的非挥发性全息存储光折变材料。

## 参 考 文 献

- 1 D. Psaltis, F. Mok. Holographic memories. *Sci. Am.*, 1995, **273**(5):70~76
- 2 N. V. Kuyhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals I: steady state. *Ferroelectrics*, 1979, **23**(3-4):949~960
- 3 J. J. Amodei, D. L. Staebler. Holographic pattern fixing in electro-optic crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(12):540~542

- 4 F. Micheron, G. Bismuth. Electrical control of fixation and erasure of holographic patterns in ferroelectric materials. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**(2):79~81
- 5 K. Buse, A. Adibi, D. Psaltis. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals. *Nature*, 1998, **393**(7):665~668
- 6 A. Adibi, K. Buse, D. Psaltis. Multiplexing holograms in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):652~654
- 7 B. Liu, L. Liu, L. Xu *et al.*. Local thermal fixing of a photorefractive  $\text{LiNbO}_3$  hologram by a  $\text{CO}_2$  laser. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(5):1342~1349
- 8 L. Liu, B. Liu, X. Yan *et al.*. Photorefractive miniaturized integration of optical 3-D systems. *J. Opt. A*, 1999, **1**(1):220~224
- 9 A. Darwish, M. D. Aggarwal, J. Morris *et al.*. Investigations of the charge transfer and the photosensitivity in single and double doped  $\text{LiNbO}_3$ , single crystals, an optical-electron paramagnetic resonance study (Part I). *SPIE*, 1997, **3137**:63~74
- 10 B. Dischler, J. R. Herrington, A. Rauber *et al.*. Correlation of the photorefractive sensitivity in doped with chemically reduced changes in the optical absorption spectra. *Solid State Communication*, 1974, **14**(11):1233~1236
- 11 Y. Liu, L. Liu, C. Zhou *et al.*. Photorefractive holographic storage in photochromic doubly doped  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10):1437~1438 (in Chinese)
- 12 Y. Liu, L. Liu, C. Zhou. Prescription for optimizing holograms in  $\text{LiNbO}_3\cdots\text{Fe}\cdots\text{Mn}$ . *Opt. Lett.*, 2000, **25**(8):551~553
- 13 A. Adibi, K. Buse, D. Psaltis. Effect of annealing in two-center holographic recording. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(25):3767~3769
- 14 H. Kogelnik. Coupling wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9):2909~2947
- 15 Q. B. He, P. Yeh. Fanning noise reduction in photorefractive amplifiers using incoherent erasures. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2):283~287
- 16 R. Magnusson, T. K. Gaylord. Laser scattering induced holograms in lithium niobate. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(7):1545~1548
- 17 Z. Wu, J. Wang, G. Zhang *et al.*. Photo-induced light diffraction in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ . *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1987, **36**(9):1203~1207 (in Chinese)