

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1186-04

光强对 $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体非挥发性 全息记录性质的影响 *

刘友文¹⁾* * 刘立人¹⁾ 刘德安¹⁾ 周常河¹⁾ 徐良瑛²⁾

(1), 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(2), 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要: 实验研究了 $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体用蓝光敏化红光全息记录的光强对记录灵敏度和饱和衍射效率的影响。敏化光增加了记录灵敏度, 足够高的光强将导致灵敏度的饱和行为。记录光以亚线性的关系 $I_r(x < 1)$ 增大记录曲线 $\eta^{1/2} - t$ 初始记录阶段的斜率, 因而降低了记录灵敏度。饱和衍射效率对记录光和敏化光光强的依赖关系表明了存在饱和衍射效率的极大值。

关键词: 光折变效应; 非挥发性全息记录; 灵敏度; 饱和衍射效率; $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

1 引 言

由于高存储密度和可擦除重写的优点, 光折变铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体是最有希望的全息存储材料之一^[1]。但是在全息存储实用化上存在的问题之一就是读取所存储的信息的同时, 也逐渐擦除所存储的信息——破坏性或挥发性读取。用另一束光来实现全息的光固定(门光子记录或两色光全息记录)是最好的解决方案之一, 它不但能实现非破坏性读取, 而且还避免了象在 $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$ 采用的不能实时实地热固定^[2]的缺点。这种方法已成为近年来光折变全息存储的热点研究课题^[3~6]。

Buse 等人提出的双掺杂 $(\text{Fe}, \text{Mn}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体的两中心全息记录是一种新的门光子全息记录方法^[7]。铌酸锂晶体掺入不同能级深度杂质中心铁(浅能级中心)和锰(深能级中心)。用来记录的红光只能激发浅能级施主中心的电子, 而用来敏化的紫外光能激发深能级和浅能级施主中心的电子。用均匀的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, 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。关闭紫外光, 读取存储信息的红光去抹除浅能级中心的光栅, 使所有的电子

都陷入到锰离子中去, 从而保留了一部分对红光不敏感的锰离子光栅, 实现存储信息的光固定。当用红光再进行读出时, 储存在锰离子光栅的信息不会被抹除, 从而达到信息的非挥发性存储。用这种两中心全息记录的方法在 $(\text{Fe}, \text{Mn}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体中已实现了角分复用 50 幅非挥发全息记录和 50 幅局域化非挥发全息记录^[8,9]。理论和实验上对提高两中心全息记录灵敏度和优化全息也作了深入的研究^[10~14]。

最近, 我们报道了用两种照明方法在 $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体中实现非挥发全息存储, 一种是 Buse 等人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^[15,16]。双掺杂 $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体具有高的非挥发衍射效率和非常弱的光致散射的优点。在衡量光折变全息记录材料性能时, 有两个重要指标, 一个是动态范围, 它可以用记录过程的饱和衍射效率 η_{sat} 来表示; 另一个是记录灵敏度 S , 定义为 $S = (d\eta^{1/2}/dt) / I_r d^{[4]}$, 式中的 η 为衍射效率, t 为时间, 记录斜率 $d\eta^{1/2}/dt$ 定义为记录曲线 $\eta^{1/2} - t$ 初始记录阶段的斜率, d 为晶体的厚度, I_r 为总的记录光强。本文从实验上研究了 $(\text{Cu}, \text{Ce}) : \text{LiNbO}_3$ 晶体用蓝光敏化红光全息记录过程中, 这两个特征参数对光强的依赖关系。它有助于优化全息记录和更深刻地理解两中心全息记录的内在机制。

* 国家自然科学基金(69837020)和中国科学院百人计划资助课题。

* * 现通讯地址: 盐城师范学院物理系, 盐城 224002。

收稿日期: 2000-12-22; 收到修改稿日期: 2001-03-28

2 实验装置和方法

实验所用的晶体是用 Czochralski 法在大气环境下生长的掺入质量分数为 0.011% CuO 和 0.085% Ce₂O₃ 的铌酸锂单晶。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^[11-13]，因此我们将生长的晶体在大气中作退火处理，温度为 900 °C，时间为 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。

全息记录是采用传统的两波混频的方法，实验装置如图 1 所示。氩氟激光器的 633 nm 的寻常光分成近乎相等的两束光对称地入射到晶体上，它们在空气中的夹角为 20.7°，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。敏化的蓝光用 Ar⁺ 激光器的 458 nm 寻常光束扩束产生的，均匀敏化光垂直入射在晶体上并覆盖记录的区域。

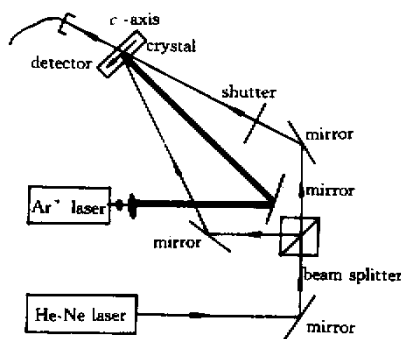


Fig. 1 Experimental setup

用均匀的敏化蓝光预照明晶体，并不产生象氧化的(Fe,Mn):LiNbO₃^[7,8]和(Ce,Mn):LiNbO₃^[17]等双掺杂晶体通常出现的光色效应。蓝光预照明晶体过程中，用一束光强非常弱的寻常偏振的 633 nm 红光测量吸收系数也并不产生显著的改变。这些结果表明，敏化蓝光预照明并不显著增加浅能级施主中心的数密度。因此在全息记录之前并不进行象在(Fe,Mn)LiNbO₃^[7,8]和(Ce,Mn):LiNbO₃^[17]晶体中的预照明。记录时用调制的红光和敏化的蓝光同时照射晶体进行全息记录，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(不考虑菲涅耳反射)，待记录稳定后，关闭敏化光，用其中的一束红光进行读出固定并测量衍射效率，用一束红光和蓝光同时照明进行擦除。双掺杂(Cu,Ce):LiNbO₃晶体的一个典型的记录、固定和擦除过程的衍射效率的平方根随时间的变化如图 2 所示，敏化蓝光和记录红光的光

强分别为 0.105 W/cm² 和 1.12 W/cm²。

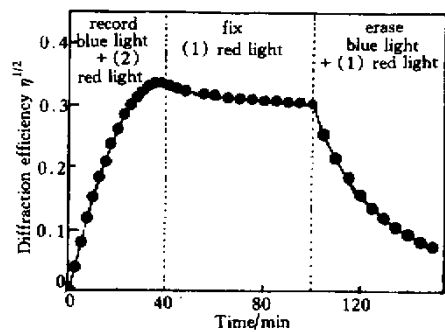


Fig. 2 Diffraction efficiency $\eta^{1/2}$ during a typical record-fix-erase process, where the intensities of total recording red and sensitizing blue light are 1.12 W/cm² and 0.105 W/cm², respectively

3 实验结果和讨论

固定敏化光强为 0.105 W/cm²，测量的记录斜率 $d\eta^{1/2}/dt$ 和记录灵敏度 S 随总记录光强的变化如图 3 所示。

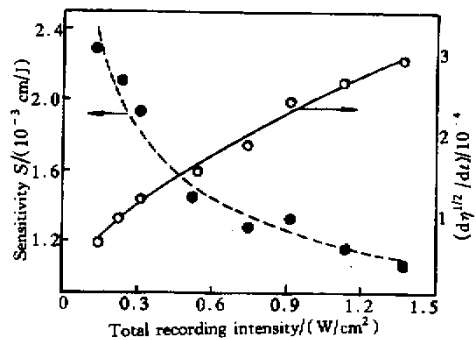


Fig. 3 Recording sensitivities S and $d\eta^{1/2}/dt$ vs total recording intensity with a constant sensitizing intensity of 0.105 W/cm²

在一中心全息记录中，记录斜率 $d\eta^{1/2}/dt$ 正比于两束记录光强的乘积，对于强度相等的记录光和参考光，即正比于总记录光强。对于两中心全息记录，同样会期望记录斜率也正比于总的记录光强，从而记录灵敏度 S 与记录光强无关。但是从图 3 可以看出，记录斜率的模拟曲线非常显著地偏离了线性关系，显示了亚线性关系 $I_r^x (x < 1)$ ，从而记录灵敏度与总记录光强的关系为 $I_r^{-(1-x)}$ ，记录光强将降低记录灵敏度。这种行为可以用以下观点理解：记录斜率 $d\eta^{1/2}/dt$ 正比于浅能级施主中心的数密度和总记录光强的乘积，记录光和敏化光同时记录照明将减少浅能级施主中心(在一中心全息记录中，由于

没有两中心记录深浅能级中心之间的电子交换(施主中心的数密度保持恒定),在敏化光强一定的情况下,记录光越强,浅能级施主中心的数密度越小,这将明显地导致记录斜率和总记录光强之间的亚线性关系。增加总记录光强将降低记录灵敏度。实验测量的记录灵敏度 S 随敏化光强的变化如图 4 所示,其中总的记录光强保持为恒定值 0.943 W/cm^2 。图 4 的插图是没有敏化光的记录曲线,可以看出记录灵敏度为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ cm/J}$,这是由于浅能级施主中心的数密度不为零。敏化光光强当然可以增加记录灵敏度,在敏化光光强小于 0.1 W/cm^2 的条件下,记录灵敏度随敏化光强线性增加,当敏化光光强大于 0.25 W/cm^2 时,灵敏度的饱和行为将出现,这类类似于在其它掺杂和非掺杂 LiNbO_3 晶体光子记录中出现的行为^[4-6]。从图 3 和图 4 看出 $(\text{Cu}, \text{Ce}):\text{LiNbO}_3$ 晶体在透射配置下的两中心全息记录的灵敏度的典型值为 $S = 0.001 \text{ cm/J} \sim 0.002 \text{ cm/J}$,约为 $(\text{Fe}, \text{Mn}):\text{LiNbO}_3$ ^[11] 晶体用紫外敏化 633 nm 红光记录灵敏度 0.0033 cm/J 的一半^[10]。

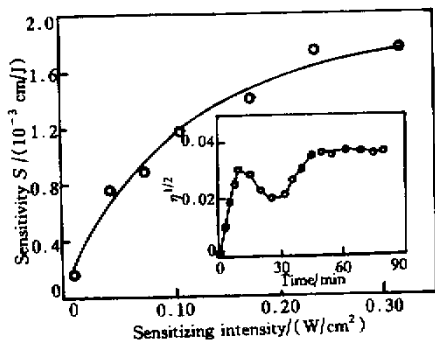


Fig. 4 Recording sensitivities S vs sensitizing intensity with a constant total recording intensity of 0.943 W/cm^2 . The inset is recording curve without sensitizing beam

当总记录光强为 0.943 W/cm^2 时,饱和衍射效率 η_{sat} 随敏化光强的变化如图 5 所示。当蓝光光强逐渐增强时,饱和衍射效率逐渐增加至一最大值,然后又减小。其原因在于,如果均匀敏化蓝光太弱,记录的红光将使大量的电子陷入在深能级中心,浅能级施主中心的数密度将很小;如果均匀敏化蓝光太强,敏化蓝光将擦除所记录的全息,这两种情况均产生弱的空间电荷场,导致低衍射效率。图 5 说明存在的最大的饱和衍射效率达到 13%,由于高固定效率(定义为非挥发衍射效率与饱和衍射效率之比,象图 2 所显示的那样,在我们的实验中,固定效率的平均值约为 0.8),非挥发衍射效率达 10.5%,这相当于在 $(\text{Fe}, \text{Mn}):\text{LiNbO}_3$ 晶体中所获得的非挥发衍射

效率^[7,8]。没有敏化光也可以获得非零的饱和衍射效率 0.15%,这可认为是记录在深能级中心 Cu 离子中。从图 4 的插图中可以看出,在开始的衍射效率增加后,记录在深能级中心 Ce 离子中光栅会被红光逐渐擦除,因为 Cu 二价离子对 633 nm 的红光有非常弱的敏感^[18]而全息连续记录在 Cu 离子中直至饱和。当敏化光强为 0.105 W/cm^2 时,饱和衍射效率 η_{sat} 随总记录光强的变化如图 6 所示,它的行为类似于图 5,且最大饱和衍射效率及它所对应的记录光与敏化光强之比与图 5 中的基本相等。这些结果与我们的理论分析相一致^[13],即记录的全息仅仅取决于记录光与敏化光光强之比,一个合适的记录光与敏化光光强之比,可以使饱和(固定)衍射效率达到最大值,写入最强体光栅。

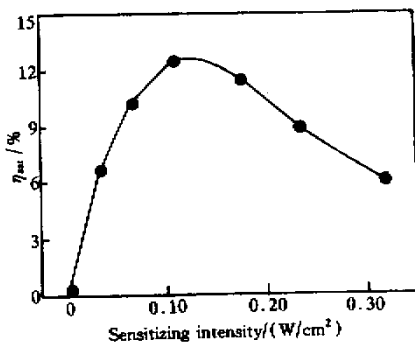


Fig. 5 Saturation diffraction efficiency η_{sat} vs sensitizing intensity with a constant total recording intensity of 0.943 W/cm^2

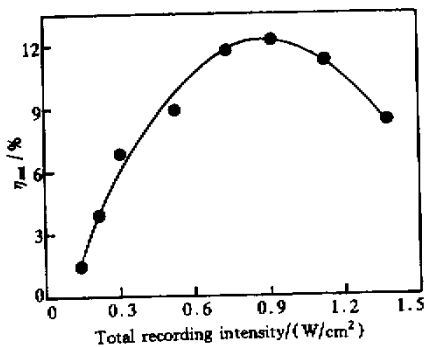


Fig. 6 Saturation diffraction efficiency η_{sat} vs total recording intensity with a constant sensitizing intensity of 0.105 W/cm^2

结论 实验研究了 $(\text{Cu}, \text{Ce}):\text{LiNbO}_3$ 晶体用蓝光敏化红光全息记录的光强对记录灵敏度和饱和衍射效率的影响。敏化光增加了记录灵敏度,足够高的光强将导致灵敏度的饱和行为。记录光以亚线性的关系 $I_r^x (x < 1)$ 增加记录曲线 $\eta^{1/2} - t$ 初始记录阶段的

斜率,因而降低了记录灵敏度。饱和衍射效率对记录光和敏化光的依赖关系表明了存在饱和衍射效率的极大值。这些光强的依赖关系可以根据两中心全息记录模型得到解释,有助于优化全息记录和更深刻地理解两中心全息记录的内在机制。

参 考 文 献

- [1] Günter P, Huignard J P eds. *Photorefractive Materials and Their Applications I*, Vol. 61 of *Topics in Applied Physics*. Berlin Springer-Verlag, 1987
- [2] Amodei J J, Steabler D L. Holographic pattern fixing in electro-optic crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(12): 540~542
- [3] Bai Y S, Kachru R. Nonvolatile holographic storage with two-step recording in lithium niobate using cw lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(14) 2944~2947
- [4] Hesselink L, Orlov S S, Liu A *et al.*. Photorefractive material for nonvolatile volume holographic data storage. *Science*, 1998, **282**(5391): 1089~1094
- [5] Guenther H, Wittmann G, Macfarlane R M *et al.*. Intensity dependence and white-light gating of two-color photorefractive gratings in LiNbO₃. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17): 1305~1307
- [6] Guenther H, Macfarlane R, Furukawa Y *et al.*. Two-color holography in reduced near-stoichiometric lithium niobate. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(32): 7611~7623
- [7] Buse K, Adibi A, Psaltis D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals. *Nature*, 1998, **393**(7): 665~668
- [8] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Multiplexing holograms in LiNbO₃:Fe:Mn crystals. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 652

~655

- [9] Moser C, Schupp B, Psaltis D. Localized holographic recording in doubly doped lithium niobate. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(3): 162~164
- [10] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Sensitivity improvement in two-center holographic recording. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 539~541
- [11] 刘友文, 刘立人, 周常河等. 光色效应双掺杂(Fe, Mn):LiNbO₃的光折变全息存储. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1437~1438
- [12] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Effect of annealing in two-center holographic recording. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(25): 3767~3769
- [13] Liu Y, Liu L, Zhou C *et al.*. Prescription for optimizing holograms in LiNbO₃:Fe:Mn. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(8): 551~553
- [14] Liu D, Liu L, Liu Y *et al.*. Self-enhanced nonvolatile holographic storage in LiNbO₃:Fe:Mn crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(19): 2764~2766
- [15] Liu Y, Liu L, Zhou C *et al.*. Nonvolatile photorefractive holograms in LiNbO₃:Cu:Ce crystals. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(12): 908~910
- [16] Liu Y, Liu L, Xu L *et al.*. Experimental study of non-volatile holographic storage in doubly- and triply-doped lithium niobate crystals. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1): 47~52
- [17] Yue X, Adibi A, Hudson T *et al.*. Role of cerium in lithium niobate for holographic recording. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(9): 4051~4055
- [18] McMillen D K, Hudson T D, Wagner J *et al.*. Analysis of twelve specially doped lithium niobate crystals. *Proc. SPIE*, 1997, **3137**: 39~49

Effect of Intensity on Properties of Nonvolatile Holographic Recording in (Cu,Ce):LiNbO₃ Crystal

Liu Youwen¹⁾ Liu Liren¹⁾ Liu De'an¹⁾ Zhou Changhe¹⁾ Xu Liangying²⁾

(1), Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(2), Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

(Received 22 December 2000 ; revised 28 March 2001)

Abstract : The effect of intensity on the recording sensitivity and saturation diffraction efficiency was studied experimentally in holographic recording of (Cu,Ce):LiNbO₃ crystal by use of a red beam for recording and a blue for sensitizing. The sensitizing light increases the recording sensitivity, and the saturation behavior will appear with enough high intensity of sensitizing light. The recording light increases the recording slope defined as the initial time derivative of the square root of the diffraction efficiency by sublinear relation $I_r^x (x < 1)$ and thus the recording light decreases the recording sensitivity. Dependences of the saturation diffraction efficiency on the intensities of the recording and sensitizing light show that there is the maximum saturation diffraction efficiency.

Key words : photorefractive effect ; non-volatile holographic recording ; sensitivity ; diffraction efficiency ; (Cu,Ce):LiNbO₃ crystal