

文章编号: 0258-7025(2008)10-1538-04

LiNbO₃:Ce:Cu 晶体中全息图像的双色复用记录

孙砚宾 江竹青 李 熊 陶世荃

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

摘要 采用 365 nm 的门光束和 633 nm 的记录光, 在双掺杂 LiNbO₃:Ce:Cu 晶体中实现了全息图像的双色记录和无损读出。探讨了双色存储全息图的图像保真度, 采用信噪比(SNR)损失描述双色固定过程对全息图像的像质影响。利用角度寻址器件, 采用等时曝光时序, 实现了 50 幅全息图像的双色复用记录和固定, 并对其噪声的特点进行了初步分析。结果表明, 固定后 50 幅全息图像的信噪比损失平均值为 1.14; 50 幅全息图像的衍射效率基本相等, 平均衍射效率达 7.64×10^{-6} 。

关键词 全息; 角度复用存储; LiNbO₃:Ce:Cu 晶体; 图像保真度; 信噪比损失; 等时曝光时序

中图分类号 O 438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1538

Angle-Multiplexed Storage of Holographic Images in LiNbO₃:Ce:Cu Crystal

Sun Yanbin Jiang Zhuqing Li Xiong Tao Shiquan

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Two-color holographic image storage was performed experimentally in LiNbO₃:Ce:Cu crystal ($w(\text{Ce}): 0.085\%$, $w(\text{Cu}): 0.011\%$) with gating light at 365 nm and recording light at 633 nm, and the image fidelity of the hologram was analyzed. The loss of signal-to-noise ratio (SNR) (L_{SNR}) was used in comparing the noise performance of holograms before and after fixing. 50 angle-multiplexed holograms with almost equal diffraction efficiencies were multiplexed in a LiNbO₃:Ce:Cu crystal with equivalent exposure schedule. And their average L_{SNR} is 1.14, and the average efficiency reaches 7.64×10^{-6} .

Key words holography; angle-multiplexed storage; LiNbO₃:Ce:Cu crystal; image fidelity; loss of signal-to-noise ratio; exposure schedule

1 引 言

光折变晶体以其可擦写、易处理等特点成为一种重要的体全息存储材料, 但读取过程中读出光对全息图的擦除, 一直是实际应用中需要解决的关键问题^[1~3]。双色全息存储技术是解决光折变晶体全息存储易失性读出问题的有效方案之一, 并以其具有的实时、全光系统实现非易失性体全息存储的特点, 成为体全息固定技术的研究热点^[4~7]。双色体全息存储技术是在紫外光持续敏化条件下, 采用两束相干红光在双掺杂铌酸锂晶体中记录信息; 并且, 通过红光照射晶体的固定过程, 在深能级建立起对红光不敏感的全息电子光栅, 避免了读出时红光对

信息的擦除, 实现了非易性存储。

本文研究了体全息图像的双色全息存储技术, 在 LiNbO₃:Ce:Cu 晶体中实现了 50 幅图像的双色全息复用存储, 并对其噪声特点进行了初步分析。

2 实验装置及方法

双色存储实验使用的晶体是尺寸为 10.0 mm × 10.0 mm × 2.5 mm 的双掺杂 LiNbO₃:Ce:Cu 晶体 (掺杂质量分数 $w(\text{Ce}) = 0.085\%$, $w(\text{Cu}) = 0.011\%$), 其 c 轴沿一长边方向平行于抛光面, 为此采用透射型记录光路。实验光路如图 1 所示。

采用波长为 633 nm 的 He-Ne 激光器作为记录

收稿日期: 2007-10-10; 收到修改稿日期: 2008-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(60377003)和校博士启动基金资助项目。

作者简介: 孙砚宾(1975—), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事光学信息处理、全息学、光信息存储等方面的研究。

导师简介: 江竹青(1963—), 女, 湖南人, 教授, 主要从事光学信息处理、光学全息存储等方面的研究。

E-mail: zhqjiang@bjut.edu.cn (通信作者)

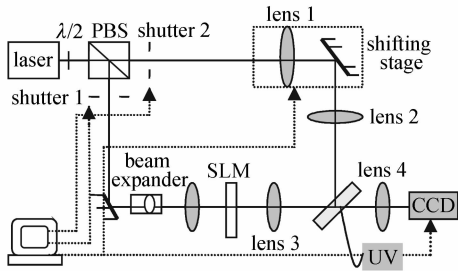


图1 实验光路图

Fig. 1 Experimental setup

光源,敏化光和门光束均为中心波长为365 nm,输出功率连续可调的非相干紫外光源。

记录光束经过偏振分束(PBS)棱镜被分成偏振态互相垂直的两束光,选择垂直偏振的反射光作为物光,水平偏振的透射光作为参考光,光路中的半波片用于调节参考光和物光束的强度比。垂直偏振的物光经过扩束准直后,照明输入图像。采用空间光调制器(SLM)输入图像,垂直偏振的物光经过 SLM 后变为水平偏振光。透镜3对原始图像进行傅里叶变换,晶体放置在透镜3的后焦面附近。参考光通过快门2后,经过角度复用器件照射到晶体上,与原始图像的频谱干涉,记录下图像的傅里叶变换全息图。

记录全息图时,快门1和快门2均打开。读出全息图时,关掉物光快门1,单束参考光经晶体后,衍射光沿原物光透射方向经过第二个傅里叶变换透镜4最终在CCD上成像,可用CCD采集图像或用光功率计测量衍射效率。采用固定在平移台上的反射镜、透镜1,2构成角度复用寻址单元。整个系统中,快门开闭、平台移动、功率计和CCD采集信号均由计算机控制完成。

3 双色存储全息图的图像保真度

体全息存储的再现像质量,是限制体全息存储器的存储容量以及决定其能否实用化的重要因素。常规体全息存储系统中存在诸如光学系统的固有噪声、复用存储引起的串扰噪声和散射噪声等各种噪声源,使存储图像的信噪比(SNR)降低,影响图像的保真度,进而会降低光折变晶体存储器的存储容量。因此对于双色固定存储系统,应考虑此过程对全息图像的保真度的影响。

采用信噪比来描述二值图像的像质^[8]

$$\text{SNR} = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (1)$$

式中 I_1 和 I_0 分别为再现图像中亮像元和暗像元的平均光强, σ_1 和 σ_0 分别为亮像元和暗像元的标准

差。对于单幅全息图像,信噪比可反映出图像像质的好坏程度。

如果需要衡量双色存储过程中噪声造成的像质下降,可以采用信噪比损失来描述^[5]

$$L_{\text{SNR}} = 10 \times \lg\left(\frac{\text{SNR}_0}{\text{SNR}_f}\right), \quad (2)$$

式中 SNR_0 为记录后直接再现全息图的信噪比, SNR_f 为固定后(物光照射晶体一定的时间以后)再现全息图的信噪比。 L_{SNR} 越小,双色存储过程引起的全息图像质衰减越少。

4 实验

4.1 紫外光对散射噪声的贡献

在进行双色存储时,紫外光可增加晶体对红光的吸收,从而使晶体对红光更加敏感。实验研究发现适当的预敏化可提高饱和衍射效率、固定效率、记录灵敏度,但对红光吸收的增强,必将引入相应的噪声。图2为在记录之前,预敏化前、后物光分别经过晶体的直透图,其预敏化光强为30 mW/cm²。采用信噪比损失系数描述预敏化光照射晶体30 min前后的信噪比变化,实验得到的信噪比损失系数 $L_{\text{SNR}} = 0.92$ 。通过预敏化前、后物光直透图的比较,可见, LiNbO₃:Ce:Cu 晶体在预敏化过程中导致的图像噪声增强是可以接受的。所以,在进行双色图像存储的实验设计时,正是通过预敏化过程提高记录灵敏度。

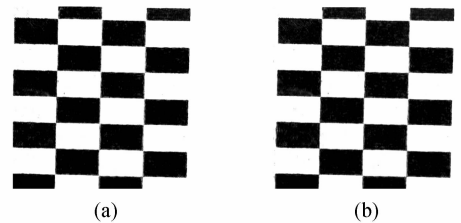


图2 预敏化前(a)及预敏化30 min后(b)的物光直透像
Fig. 2 Images transmitted directly from the crystal with illumination of a signal beam before pre-exposure (a) and after pre-exposure for 30 min (b)

4.2 物光对散射噪声的贡献

在 LiNbO₃:Ce:Cu 晶体中记录一幅全息图,然后用物光照射晶体,每隔一段时间采集读出晶体中的全息图像,考察其像质变化。采用(2)式计算物光照射前后读出的全息图像的 L_{SNR} ,从而分析读出图像的像质变化,定量算出散射噪声对图像像质的影响。实验中,记录光强为442 mW/cm²,物光光强为221 mW/cm²。图3(a)是在晶体中记录后直接读出的全息图,图3(b)给出了物光照射晶体30 min后读

出的全息图像,经计算得到物光照射前后读出的全息图像的 $L_{\text{SNR}} = 3.03$,可见, $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ 晶体采用 633 nm 的光进行大规模存储记录时,物光引入的散射噪声是一个不可忽视的问题。

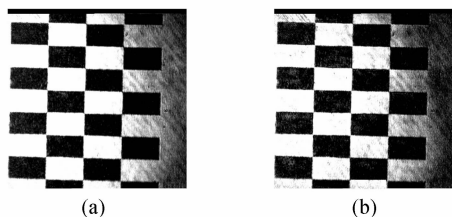


图 3 记录后(a)及物光照射 30 min 后(b)读出的全息图
Fig. 3 Holograms read out from a $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ crystal right after recording (a) and after the crystal being exposed to signal beam for 30 min (b)

4.3 图像的双色全息复用存储

对于双色复用存储的曝光时序问题从两个方面进行分析,一是在记录过程中,随着浅层原始电子数和动态范围的消耗,虽然每幅全息图都进行了等时的曝光,但后续记录的全息图的衍射效率依次降低。但与此同时,记录过程中紫外光作为门光束一直存在,所以记录时门光束对先写入的全息图的擦除时间长,擦除程度严重;而对后续全息图的擦除时间是依次减少的,因此如果能选取合适的曝光时间,利用等时曝光可实现等衍射效率的全息复用。

在 $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ 晶体中进行了 50 幅图像的双色复用存储,相邻全息图的角度间隔为 0.23° ,预敏化光强为 $30 \text{ mW}/\text{cm}^2$,敏化时间 30 min,每幅全息图等时曝光 20 s,记录光强约为 $200 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。实验中物光束在 SLM 上的直径为 7 mm,记录在晶体中的傅里叶变换全息图的尺寸与后离焦程度有关。CCD 采集到的全息图像如图 4 所示,50 幅全息图全部成功读出。

采用信噪比损失系数描述双色记录完成后并使用读出光照射晶体 45 min 后再现全息图的像质变化。根据(2)式,单束红光照射前后,再现全息图的信噪比损失系数 L_{SNR} 定义为

$$L_{\text{SNR}} = 10 \times \lg\left(\frac{\text{SNR}_{t_0}}{\text{SNR}_{t_1}}\right), \quad (3)$$

式中 SNR_{t_0} 为记录后未经读出擦除时直接再现全息图的信噪比, SNR_{t_1} 为读出光照射 45 min 后再现全息图的信噪比。由(2)式可知, L_{SNR} 越小,表示双色存储后红光读出时引起的全息图像质衰减越少。通过数据处理,得出 50 幅全息图读出前后的平均信噪比损失系数 $L_{\text{SNR}} = 1.14$,结果表明,记录后读出光

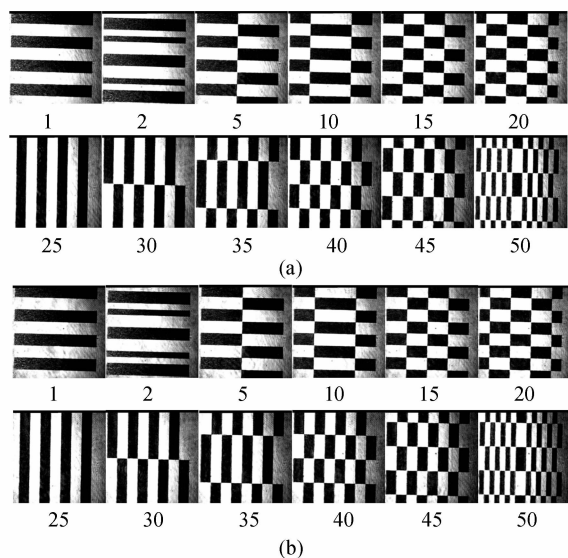


图 4 双色复用全息存储 50 幅全息图像。(a) 记录后直接读出;(b) 固定 45 min 后读出(单束物光照射)
Fig. 4 50-angle-multiplexed holographic images of two-color storage. (a) at the end of recording time; (b) after 45-minute readout of (a) (exposure by one red beam)

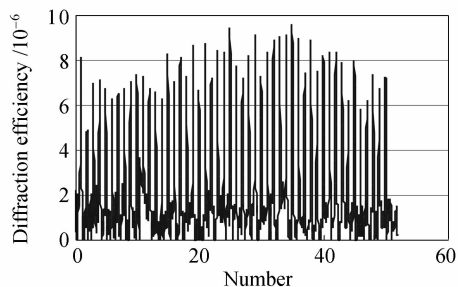


图 5 固定后 50 幅全息图的衍射效率
Fig. 5 Diffraction efficiency for 50-angle-multiplexed holograms after being fixed

持续照射晶体,对全息图像质的影响不大。

实验中撤掉 CCD 后,使用功率计测量 50 幅全息图经红光固定后的读出功率,可得到 50 幅全息图像的衍射效率,如图 5 所示。从图可见,再现的 50 幅全息图衍射效率基本均衡,50 幅全息图像的平均衍射效率为 7.64×10^{-6} 。

5 结 论

在 $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ 晶体中实现了图像的双色存储记录,对 $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ 晶体中进行图像双色全息存储时的噪声特点进行了初步分析,并对角度复用双色存储时的曝光特性进行了讨论。实验结果表明,对 $\text{LiNbO}_3:\text{Ce}:\text{Cu}$ 晶体的预敏化处理导致的图像噪声增强是可接受的;而采用 633 nm 的光进行

大规模存储记录时,物光引入的散射噪声却是不可忽视的。为此,需要依据晶体样品的噪声条件,确定全息图复用记录的曝光时间。采用等时曝光记录方案,成功实现了 50 幅图像的全息复用存储,固定后读出的衍射效率均衡,平均衍射效率为 7.64×10^{-6} 。

致谢 感谢南开大学光电材料研发中心孔勇发教授提供的晶体样品。

参 考 文 献

- 1 A. Adibi, K. Buse, D. Psaltis. Multilplexing holograms in LiNbO₃:Fe:Mn crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):652~654
- 2 Myeongkyu Lee, Shunji Takekawa, Yasunori Furukawa. Angle-multiplexed hologram storage in LiNbO₃:Tb:Fe [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1337~1339
- 3 Youwen Liu, Kenji Kitamura, Shunji Takekawa *et al.*. Two-color photorefractive holography in Mn-doped near-stoichiometric lithium niobate crystal [C]. *SPIE*, 2002, **4930**:333~337
- 4 Kenji Kitamura, Youwen Liu, Shunji Takekawa *et al.*. Intensity dependence of two-color holography performance in Te-doped near-stoichiometric LiNbO₃[C]. *SPIE*, 2002, **4930**:338~342
- 5 Liyong Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Dynamic characteristics of holographic recording and fixing in LiNbO₃:Ce:Cu crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4-6):363~369
- 6 Chai Zhifang, Liu De'an, Luan Zhu *et al.*. Characteristics of hologram readout in LiNbO₃:Fe:Ru crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1655~1660
柴志方,刘德安,栾竹等. 双掺杂 LiNbO₃:Fe:Ru 晶体的全息读出特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1655~1660
- 7 Li Xiong, Jiang Zhuqing, Sun Yanbin *et al.*. Optimized parameters for nonvolatile holographic recording in (Fe,Cu):LiNbO₃ crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11):1955~1959
李熊,江竹青,孙砚宾等. 用于双色全息存储(Fe,Cu):LiNbO₃晶体的参量优化计算[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11):1955~1959
- 8 Qin Mingyan, Tao Shiquan, Liu Guoqing *et al.*. Effect of scattering noise on the data fidelity of holograms recorded in photorefractive crystals [C]. *MRS Proceedings*, 2001, **674**:V2.6.1~2.6.7