

基于相位共轭的动态体全息衍射特性的 实时非破坏性测量*

任立勇,王韩毅,姚保利,王英利,雷铭

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710068)

摘 要:基于相位共轭技术,提出了一种动态体全息衍射特性的实时测量方法.在光学系统设计中,通过调整使得物光和参考光较强,而与参考光共轭的再现光非常弱(约为参考光的 1/1 000),借助非常微弱的共轭再现光实现了动态体全息的非破坏性实时测量.三束光的强度和偏振态可通过 1/4 波片、偏振片和衰减片进行调节和组合,可记录光强调制型或偏振态调制型体全息.本方法适合于光致折射率变化和光致变色材料体全息的测量.

关键词:动态体全息;相位共轭;衍射;实时测量;非破坏性

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)06-1018-5

0 引言

体全息或体光栅以其紧凑性、高密度性和快速并行访问等特性在信息海量存储、衍射光学和集成光学领域有着巨大的潜力^[1-3].两束偏振态平行的物光和参考光相干辐照光敏材料时,会产生光强度调制的体全息;而当两束偏振态正交的物光和参考光相干辐照光敏材料时,它们干涉合成光的光强分布是均匀的,但偏振态是调制的,从而会引起材料的光致各向异性,并记录下具有偏振态调制的体全息^[4].

体全息最显著的特点是它的时间和空间动态特性^[5-7],即:物光和参考光记录全息光栅的同时又被实时实地的光栅自衍射,形成干涉光场的重新分布,该光场模式又会参与后继光栅的记录.在全息读出时,读出光和衍射光也会干涉而再次记录光栅.这种动态过程同时包括了耦合光束之间的能量相互转移和位相的相对变化.为了反映动态体全息光栅的强弱,传统的办法是在体全息记录过程中,每隔一定的时间间隔,挡住物光只让参考光通过全息记录介质,从而测得衍射效率^[8-11].根据体全息光栅的衍射效率公式^[12]可计算光栅的折射率调制度.

许多测量体全息衍射效率的研究中都采用了上述方法.但这种办法存在两个明显的缺点:1)周期性地切断物光,而用较强的均匀参考光来读取所存储的物光信息会导致全息图的部分擦除.较强的参考光与其衍射光之间还会产生强的干涉而产生新的全息,该光栅与已记录光栅相会竞争和叠加,而且这

种对光路强制性的外界干预会产生较大的随机噪音,破坏了原有全息的正常记录进程;2)对于体全息记录灵敏度较高的全息记录介质,全息光栅的建立和读出擦除速度都较快(秒量级),但由于对光路的切断/打开频率不可能很高(每次测量时,衍射达到饱和都需要一定的时间),因而这种办法不能准确反映全息光栅建立过程的细节.

为了克服动态体全息上述测量方法的缺点,本文基于光相位共轭技术,提出了动态体全息的实时非破坏性测量方法和光学系统.相位共轭方法,即四波混频,在光折变光栅应用研究中已有不少报道,例如消除全息记录中的相位畸变^[13],自泵浦相位共轭器^[14].本文提出在光学系统设计中,通过调整使得物光和参考光较强,而与参考光共轭的再现光非常弱(约为参考光的 1/1 000),从而消除了读出破坏效应的实时动态全息的相位共轭读出方法.通过对物光、参考光和再现读出光的强度和偏振态的调节和组合,实现了光强调制型或偏振态调制型体全息的记录和测量.本方法具有无干扰、实时、调节方便、噪音小等优点,适合于光致折射率变化和光致变色材料体全息的测量.

1 测量原理和装置

图 1 是动态体全息衍射效率的非破坏性实时测量系统的结构示意图.如图 1,激光器的输出光经过偏振片变成线偏振光.全息的记录时间由快门来控制.全息记录光被两个分束镜分成三束光,分别提供物光、参考光和探测光.以物光路为例,旋转 1/4 波片,使得其快轴与入射光偏振透光方向夹角为顺时针 45°或逆时针 45°,从而将线偏振光变成右旋圆偏光或左旋圆偏光;旋转衰减片得到不同强度

*国家自然科学基金(60337020 和 60278026)资助
Tel:029-88887602 Email:renliy@opt.ac.cn
收稿日期:2006-02-23

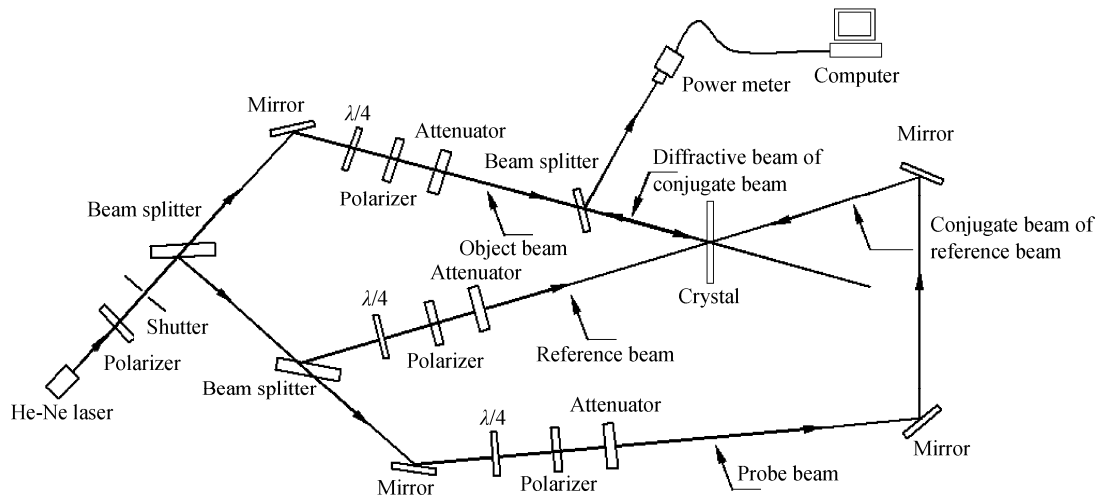


图1 基于相位共轭技术的实时动态体全息衍射效率测量系统结构

Fig. 1 Schematic diagram for real-time non-destructive diffraction testing for dynamic volume holograms based on phase conjugate technique

或功率的光;如需要线偏振光,就需要插入偏振片,通过旋转偏振片可得到竖直线偏振光或水平线偏振光.参考光与探测光的调节办法与上述物光完全相同.总之,通过调节 $1/4$ 波片、偏振片和衰减片,可以得到物光、参考光和探测光具有不同偏振态和不同强度组合下的情况.这三束光中的任意一束光均可调节为竖直偏振、水平偏振、左旋圆偏振和右旋圆偏振中的某一种偏振态.当物光和参考光偏振态相同时,将产生光强调制诱导的折射率体全息;当物光和参考光偏振态正交时,将产生偏振态调制的折射率体全息.调节全反镜使探测光恰恰变成参考光的共轭光.为了实现非破坏性测量体全息的衍射效率,可将再现共轭光的强度调节为参考光的 $1/1000$.调节使物光和参考光对称入射在全息记录介质上.调节全息记录介质,使得物光、参考光和共轭光在全息记录介质内部完好重合.再现共轭光经全息记录介质后的衍射光经由分束镜反射到光功率计,光功率计通过RS-232接口与计算机互相通信,完成数据的自动实时采集.

2 实验样品及测量结果

近年来,Buse等人^[8]提出了在双掺杂 LiNbO_3 (LN)晶体中采用双色光实现永久体全息记录的方案.其核心思想为:在LN晶体中同时掺入Mn和Fe分别作为深杂质中心和浅杂质中心,采用长波长光(如红光)和短波长光(如紫外光)分别作为记录光和敏化光.记录阶段采用调制的双红光记录,同时加均匀紫外光敏化,读出阶段仅选择其中一束红光读出.经过充分读出后,浅中心的电子被转移到深中心.由于深中心的电子对红光不敏感,从而实现了电子光栅被固定在深中心的永久全息记录.该技术以其原理简单、易于实现、全光性等优点迅速得到了研究者的广泛关注,而且多种双掺杂LN晶体已被报道^[6-11].

为了检验上述测量方法和系统的可靠性,对两种双掺杂 LiNbO_3 光折变晶体进行了动态体全息的记录和实时非破坏性测量实验.样品参量如表1.

表1 两种双掺杂 LiNbO_3 晶体的特性

材料	掺杂浓度	尺寸	退火条件
		$x \times y \times z / \text{mm}^3$	(650°C , 空气中)
LN : Ce : Cu	0.085 wt. % Ce_2O_3 ($N_{\text{Ce}} = 1.44 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$)	$10 \times 20 \times 2$	2 h
	0.011 wt. % CuO ($N_{\text{Cu}} = 3.82 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)		
LN : Fe : Mn	0.15 wt. % Fe_2O_3 ($N_{\text{Fe}} = 5.21 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$)	$10 \times 20 \times 5$	2 h
	0.01 wt. % MnO ($N_{\text{Mn}} = 3.90 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)		

两种晶体样品的光轴取向均沿着宽度方向(x 轴),所有表面都进行了光学抛光.记录光和探测光由He-Ne激光器(MellesGriot公司,功率为35 mW,消光比为500:1 竖直偏振,基模 $\text{TEM}_{00} > 95\%$,光斑直径为1.24 mm)提供,波长为633 nm.半导体激光器发射的405 nm 紫外激光,沿两记录光的角

平分线垂直辐照全息记录区域敏化晶体.采用相干公司的Ultima LabMaster 双通道光功率计(波长范围为 $0.4 \sim 1.06 \mu\text{m}$,分辨率为1 nW,数据采样最小间隔为0.1 s),一个探头测衍射光功率,另一个探头用来监测激光器输出功率,二者之比可消除光源的起伏.通过RS-232接口与计算机互相通信,实现实

时数据采集. 衍射效率为衍射光与再现共轭光的功率之比.

图2给出了LN:Fe:Mn晶体体全息记录过程中衍射效率的时间演化测量结果,实验中物光和参考光功率均为8 mW,夹角为 30° ,再现共轭光功率为 $8 \mu\text{W}$,三束光均为竖直偏振光,数据采集间隔为3 s.可以看出,全息记录过程中,衍射效率平稳单调地增加直到饱和,噪音非常小.

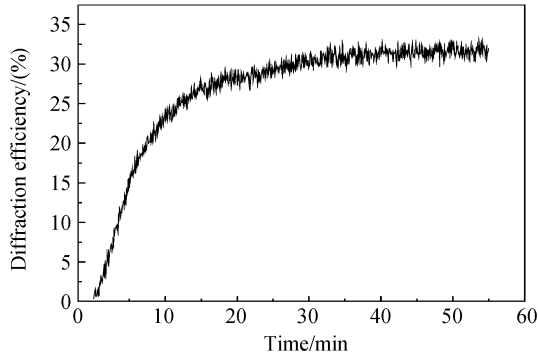


图2 LiNbO₃:Fe:Mn晶体体全息记录过程中衍射效率的时间演化

Fig. 2 Time evolution of diffraction efficiency during volume holographic recording in the LN:Fe:Mn crystal

图3给出了LN:Ce:Cu晶体体全息记录过程中衍射效率的时间演化测量结果.实验中物光和参考光功率均为8 mW,夹角为 30° ,再现共轭光功率为 $8 \mu\text{W}$,两束记录光均为竖直偏振光,数据采集间隔为3 s.图中同时给出了探测光为竖直偏振光(寻常光)和水平偏振光(非常光)的测量结果.从图可以看出,采用水平偏振光探测时,衍射效率约为竖直偏振光探测结果的3倍.其理论分析如下:

根据线性电光效应,折射率调制度 Δn 可表示为^[15]

$$\begin{cases} \Delta n_s = \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E_{SC} & (\text{竖下偏振光}) \\ \Delta n_p = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_{SC} & (\text{水平偏振光}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, n_o , n_e , γ_{13} 和 γ_{33} 分别为竖直偏振光和水平偏振光的折射率和电光系数, E_{SC} 为空间电荷场.根据Kogelnik体光栅的衍射理论,衍射效率 η 可表示为^[13]

$$\begin{cases} \eta_s = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n_s d}{\lambda \cos \theta} \right) & (\text{竖直偏振光}) \\ \eta_p = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n_p d}{\lambda \cos \theta} \cos(2\theta) \right) & (\text{水平偏振光}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, d 是全息厚度, λ 是波长, 2θ 是物光和参考光间的夹角.

因为LN晶体对于633 nm波长而言,其水平偏振光的电光系数($\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12}$ m/V)是竖直偏振光的电光系数($\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12}$ m/V)的3倍多,

由式(1),(2)可以解释图3中两种偏振态探测光读出时衍射效率的差异.

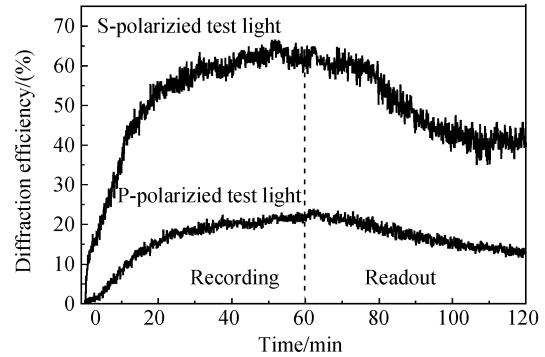


图3 LiNbO₃:Ce:Cu晶体体全息记录和固定过程中衍射效率的时间演化

Fig. 3 Time evolution of diffraction efficiency during volume holographic recording and fixing in the LN:Ce:Cu crystal

3 讨论

该相位共轭动态体全息实时非破坏性测量系统具有如下明显的优点:

1)实现无干扰、无损伤、实时连续检测.通过调节 $1/4$ 波片、偏振片和衰减片可使共轭光的功率仅为物光和参考光功率的 $1/1000$,这相当于用一个非常微弱的光来读全息,从而可以忽略全息的读出擦除效应.采用相位共轭技术,在全息记录的同时,共轭光可实时反映衍射光的变化,不需要周期性地切断物光,从而可进行连续的体全息.

2)响应速度快.光功率计通过RS-232接口与计算机互相通信,完成数据的自动实时采集.这种实时测量的响应速度可以很快,它取决于光功率探测器的响应速度.针对不同全息记录介质灵敏度的高低和衍射效率的变化快慢,可设定合适的数据采样点时间间隔,从而反映动态体全息衍射的细节.

3)测量范围广,调节方便.通过调节 $1/4$ 波片、偏振片和衰减片可使物光、参考光和探测光具有不同的功率及偏振态,可以人为地记录光强调制诱导的折射率体全息或偏振态调制诱导的折射率体全息.该技术能方便地研究全息记录材料对光功率及偏振态的依赖关系,适用于光致折射率变化和光致变色全息记录材料.

4)稳定性高,重复性好.由于不需要周期性地切断物光,可大幅度降低对光路强制性的外界干预所产生的随机噪音.

4 结论

采用光共轭技术,在体全息建立过程中,借助非常微弱的共轭再现光实现了动态体全息的非破坏性

实时测量. 通过计算机与探测器间的通信完成衍射光功率的实时数据采集. 该测量系统通过 $1/4$ 波片、偏振片和衰减片的调节和组合, 可获得物光、参考光和再现探测光的强度和偏振态的任意组合, 从而可记录光强调制型或偏振态调制型体全息. 本测量技术具有设计新颖、结构简单、调节方便、运行可靠、稳定性高、重复性好、噪音小、响应速度快、实时性和全自动化等优点. 本文仅给出了光折变动态体全息记录的实验结果, 事实上, 对光致折射率变化和光致变色全息记录材料来说, 该方法具有普适性.

参考文献

- [1] HEANUE J, BASHAW M, HESSELINK L. Volume holographic storage and retrieval of digital data[J]. *Science*, 1994, **265**: 749-752.
- [2] YAN Ai-min, LIU Li-ren, LIU De-an. Design and application of volume holographic grating lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 280-283.
闫爱民, 刘立人, 刘德安. 体全息光栅透镜的设计和应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 280-283.
- [3] WANG Er-hu, ZHAO Jian-lin, LI Ji-feng, et al. Fabrication and application of photorefractive multiple volume gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1229-1232.
王二虎, 赵建林, 李继锋, 等. 光折变多重体光栅的制作及应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1229-1232.
- [4] SU W, SUN C, KUKHTAREV N, et al. Polarization-multiplex volume holograms in LiNbO_3 with 90-deg geometry[J]. *Opt Eng*, 2003, **42**(1): 9-10.
- [5] JEGANATHAN M, BASHAW M C, HESSELINK L. Evolution and propagation of grating envelopes during erasure in bulk photorefractive media[J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**(7): 1370-1383.
- [6] REN L Y, LIU L R, LIU D A, et al. Recording and fixing dynamics of nonvolatile photorefractive holograms in LiNbO_3 : Fe : Mn crystals[J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, **20**(10): 2162-2173.
- [7] LIM K, TAK S, LEE S, et al. Grating formation and decay in photochromic Mn, Ce : LiNbO_3 [J]. *J Luminescence*, 2001, **94-95**: 73-78.
- [8] BUSE K, ADIBI A, PSALTIS D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals[J]. *Nature*, 1998, **393**(18): 665-668.
- [9] YANG C H, ZHAO Y Q, WANG R, et al. Studies of photorefractive crystals of double-doped Ce, Fe : LiNbO_3 [J]. *Opt Commun*, 2000, **175**(1-3): 247-252.
- [10] LIU You-wen, LIU Li-ren, LIU De-an, et al. Realization of non-volatile holographic storage in LiNbO_3 : Cu : Ce crystals with two illumination schemes[J]. *Chin J Lasers*, 2001, **28**(12): 1099-1102.
刘友文, 刘立人, 刘德安, 等. 用两种照明方法在 LiNbO_3 : Cu : Ce 晶体中实现非挥发性全息存储[J]. 中国激光, 2001, **28**(12): 1099-1102.
- [11] REN Li-yong, LIU Li-ren, LIU De-an, et al. Optimal switching from recording to fixing for high diffraction from a LiNbO_3 : Ce : Cu photorefractive nonvolatile hologram[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(2): 186-188.
- [12] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell Syst Tech J*, 1969, **48**(9): 2909-2947.
- [13] WANG Ying-li, YAO Bao-li, CHEN Yi, et al. Phase aberration correction using conjugated wave reconstruction in holography of photochromic material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1529-1531.
王英利, 姚保利, 陈懿, 等. 共轭读出方法消除全息记录中的相位畸变[J]. 光子学报, 2003, **32**(12): 1529-1531.
- [14] WANG F, LIU L R, LI G Q. Self-pumped forward and backward phase conjugator with Cu-doped KNSBN crystal: caused by scattering-oscillation-amplification[J]. *Opt Commun*, 1997, **134**(1-6): 195-198.
- [15] MANILOFF E, JOHNSON K, WAGNER K. Dynamic energy transfer and transient fringe dislocations in photorefractive lithium niobate[J]. *J Opt Soc Am B*, 1992, **9**(9): 1673-1684.

Real-time Non-destructive Measurement of Diffraction Characteristic of Dynamic Volume Holograms Based on Phase Conjugate

REN Li-yong, WANG Han-yi, YAO Bao-li, WANG Ying-li, LEI Ming

(*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*)

Received date: 2006-02-03

Abstract: Based on the phase conjugate technique, a real-time measurement technique was proposed to test the diffraction of the dynamic volume holograms. In the optical system, the object wave and the reference wave are adjusted much stronger than the probe beam propagating along the counter-direction of the reference wave (this phase-conjugate probe beam is about 1/1 000 of the reference beam). Thus the real-time and non-destructive testing of the dynamic holograms can be obtained by measuring the phase-conjugate wave of the object wave, which overcomes the readout erasing effect compared to the conventional technique by directly reading holograms with the reference beam via blocking object beam from time to time. Since the intensity and the polarization of each beam can be adjusted and combined among them by using the quarter-wave plate, polarizer and attenuator, the intensity-modulation or polarization-modulation volume hologram can respectively be recorded and tested. This technique fits for the photorefractive or photochromic holographic materials.

Key words: Dynamic volume grating; Phase conjugate; Diffraction; Real-time measurement; Non-destructivity



REN Li-yong was born in 1971 in Shaanxi province. He graduated from Physics Department of Northwest University in 1995. He respectively received the M. S. degree in Optics from Physics Department of Northwest University in 2000 and the Ph. D. degree in Optical Engineering from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2004. He joined the State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, where he is now an associate professor. His research interests are optical holography, nonlinear optics, special fiber and applications, optoelectronics and photonics.