

文章编号: 0258-7025(2006)07-0918-04

LiNbO₃:Fe 晶体中飞秒二波耦合光栅 衍射自增强现象

王铁铮, 吴 强, 王振华, 张心正, 许京军

(南开大学泰达学院应用物理学院超快光子学实验室, 天津 300457)

摘要 在超快二波耦合配置下的 LiNbO₃:Fe 晶体中写入了体相位栅,通过一定的脉冲写入方法进行飞秒脉冲写入光栅的衍射自增强实验,在双光写入饱和后进行单写入光照射,产生了持续 1 h 的衍射自增强,同时又发现在光栅写入未饱和的时候改为单光写入也产生了衍射自增强现象,持续 2 h。随后从光调制角度分析了该自增强现象的理论原因:脉冲衍射光和写入光共同作用,提高了二者耦合程度,写入了新光栅,从而加强原光栅,导致衍射效率提高,从而证明飞秒脉冲写入光栅的读出擦除可抑制,这对提高光全息记录的读出质量有正面意义。

关键词 非线性光学;自增强;飞秒二波耦合;衍射效率

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Diffraction Self-Enhancement by Two Wave Mixing of Femtosecond Pulse in LiNbO₃:Fe

WANG Tie-zheng, WU Qiang, WANG Zhen-hua, ZHANG Xin-zheng, XU Jing-jun

(Ultrafast Photonics Laboratory of Applied Physics School of TEDA College, Nankai University, Tianjin 300457, China)

Abstract Writing a grating by femtosecond coherent pulses, there was an erasure of grating during the reading process, so it is important for research a self-enhancement method to restrain the erasure. In the configuration of femtosecond two waves mixing, two pulses wrote a grating in a LiNbO₃:Fe, there was a self-enhancement effect by using a special method that controlled the sequence of femtosecond pulse's writing: after the two pulse's writing, single pulse wrote the old grating which made the self-enhancement continue 1 h. At the same time the other self-enhancement effect had been found when the grating was unsaturated and the input two pulses changed to a single pulse, and this self-enhancement continued 2 h. Then the research on the relationship between the writing ultrafast pulse and the writing time had been done, finally the reason analysis had been done with the modulation of femtosecond pulse. This study showed that the diffracted pulse light interacting with writing pulse increased the level of mixing, then a new grating had been written, which boosted up the old one, so that diffraction efficiency increased. The experiment proved that the grating erasure written by femtosecond pulse can be restrained, which was good news for a reading effect of hologram writing.

Key words nonlinear optics; self-enhancement; two wave mixing of femtosecond pulse; diffraction efficiency

1 引 言

LiNbO₃ 晶体具有优良的电光特性和较大的光

学非线性效应,在光存储、光学参量振荡器、倍频器、光开关等方面有着广泛的应用前景^[1~6]。在光存储领域,由于 LiNbO₃ 晶体良好的动态特性和敏感度

收稿日期:2005-10-21;收到修改稿日期:2006-02-24

基金项目:教育部重大项目培育资金(704012),国际合作重点项目(2005DFA10170),基金委重点项目(10334010),南开大学科研启动经费(J02020),长江学者和创新团队发展计划,国家自然科学基金(60208003)资助课题。

作者简介:王铁铮(1981—),男,黑龙江人,南开大学光学硕士研究生,主要从事超快二波抽运探测研究。E-mail:lanbowtj@mail.nankai.edu.cn

导师简介:许京军(1966—),男,辽宁人,教授,主要从事弱光非线性光学、光子微结构、光电材料与器件、量子材料与器件等方面的研究。E-mail:jjxu@nankai.edu.cn

而受到了广泛的关注和研究,然而在全息存储读出过程中由于读出光的擦除效应影响了存储结果,而衍射自增强可明显地抑制读出光的擦除。

1973年,T. K. Gaylord等在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中写入的全息光栅中发现了光折变晶体的衍射自增强现象^[7],而后 M. Reinfeldt 和 A. Ozols 等又在具有 F 中心的碱卤晶体和非晶态的 As_2S_3 中发现了自增强效应^[8,9],R. Grzymala 等在重铬酸盐凝胶及聚合物中发现了自增强现象^[10]。通常自增强现象被分为三类:1) 由于衍射波记录下的全息作用的相干自增强,2) 非相干光反衬或透射至全息增强从而产生的非相干自增强,3) 热激发弛豫自增强^[9]。

产生衍射自增强的方法有原参考光显影法等^[11],本文采用飞秒二波耦合配置,用超快脉冲光($\lambda = 400 \text{ nm}$)在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中记录光栅,并采用连续激光($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)实时记录晶体内部光栅的写入过程、擦除过程,研究了在不同的写入条件下,飞秒二波耦合光栅自增强的特点,并从调制角度给出了理论解释。

2 实验结果与分析

在实验中采用了实时监测二波抽运探测光路^[12],实验样品为 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体(Fe 掺杂质量分数为 0.015%,晶体尺寸为 $25 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$)。光路如图 1 所示:超快脉冲光($\lambda = 800 \text{ nm}$, 150 fs)经过 BBO 晶体倍频得到蓝光(400 nm),通过滤波镜滤掉红光得到写光栅需要的蓝光超快脉冲,再经分束镜分成两路相干光,这两束光入射到晶体上写入光栅。实验中采用精密平移台调节其中一路光的延迟,监视脉冲相干记录结果时用 CCD 光栅成像法^[13]。

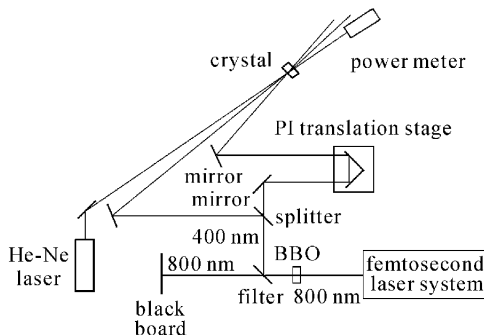


图1 飞秒二波耦合光路图

Fig. 1 Configuration graph of the femtosecond mixing experiment

先粗调两路写入光程相等,然后通过 PI 延迟台移动微调其中一路光的光程,在图 1 中放晶体的地方放置一个 CCD 镜头代替晶体,把相干像成在 CCD 表面上,写入的光栅在 CCD 上的成像如图 2 所示,得到了清晰的相干像,此时可将待测晶体放在 CCD 位置进行光栅记录。

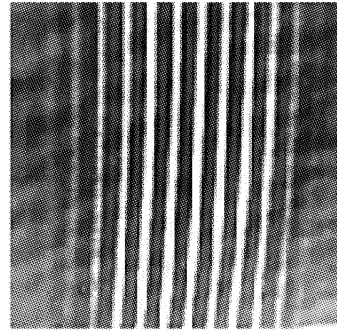


图2 相干条纹图像

Fig. 2 Graph of interference stripe

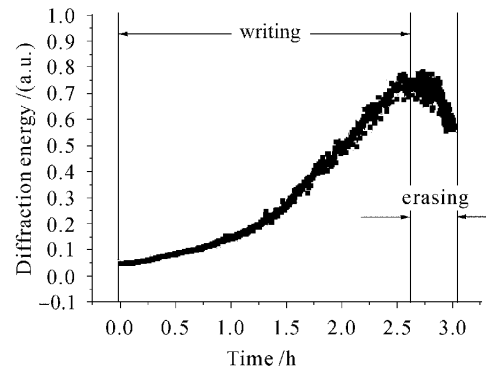


图3 飞秒脉冲作用下的写入与读出光擦除

Fig. 3 Erasing with reading beam as femtosecond pulses written

首先,用两束波长 400 nm 的紫光以夹角 9.8° 入射到 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体写入光栅,用 He-Ne 激光以布拉格角读出光栅,得到衍射效率-时间曲线如图 3 所示,在监视写入的前 2.75 h ,光栅的衍射强度逐渐上升,在 2.75 h 处光栅达到饱和,此时,关闭两束写入光,用 He-Ne 激光继续以布拉格角度照射晶体中的光栅,则光栅衰减,衍射效率开始迅速下降。

将晶体退火,重新做实验。保持光路配置不变,做自增强实验,结果如图 4 所示,写入光栅 2.75 h 后光栅饱和,此时关掉一束写入的紫光,用另一束继续照射晶体,并保持 He-Ne 激光继续以布拉格角度读出。此时发现一个持续了约 45 min 左右的持续缓慢自增强过程,然后光栅衍射效率又开始下降,发现擦除速度比上一个实验缓慢得多,说明单写入光有抑

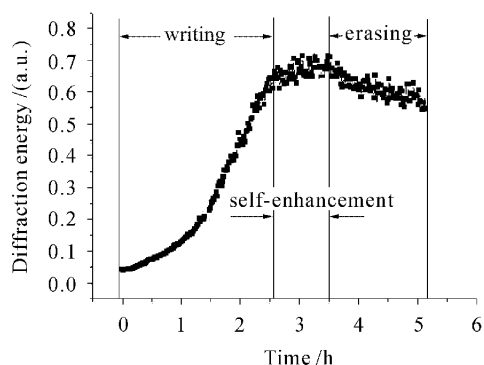


图4 飞秒光脉冲下的光栅写入-自增强-擦除全过程
Fig. 4 Progress of writing-self-enhancement-erasing as femtosecond pulses written

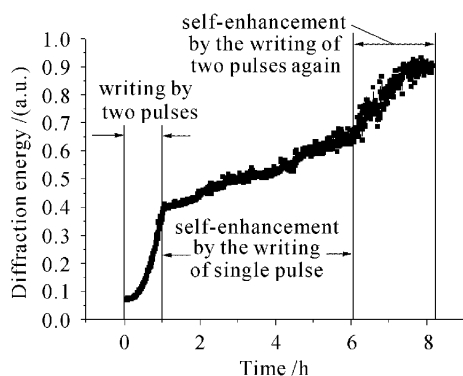


图5 飞秒光脉冲作用下的写入:单写入光作用下光栅自增强;双写入光作用下光栅再次自增强现象
Fig. 5 Progress of writing: self-enhancement with the single pulse; self-enhancement with two pulses writing again as femtosecond pulses written

制读出光的擦除作用的能力。

再重新实验,在写入 30 min 后挡住一束写入光,让另一束写入光和读出光继续照射晶体,此时光栅衍射持续增强,但速度比挡掉一束写入光之前慢了许多,此过程进行了 5 h 左右,如图 5 所示,在第 6.2 h 写光栅再次达到饱和。此时重新引入被挡住的那束写入光以原来的角度入射晶体,发现光栅衍射效率又开始上升,2 h 后光栅再度饱和。

写入光与其衍射光之间有 $\pi/2$ 的相位差,则衍射光沿着传播的反方向退后 $\pi/2$ 时,便与写入光同相位。当关掉一束写入脉冲后,另一束写入光与其衍射光的干涉条纹与原来两写入光的干涉条纹相重叠,彼此加强,因而产生新相位栅与原光栅同相位,即加强了原光栅,使衍射光增强,产生了自增强效应。

另外由于 LiNbO_3 晶体属于无对称中心晶体,

在光辐照下会在内部形成很强的光生伏特电场,在此电场作用下,光栅会沿 c 轴发生运动^[14]。写入光是频率 $f = 1000$ Hz 的飞秒脉冲光,相当于一个调制光,可以用余弦函数调制振幅做飞秒脉冲光的电矢量表达式,设飞秒写入光和其自衍射光的表达式分别为^[14]

$$\mathbf{E}_1 = E_{10} \cos\left(\frac{\omega}{2}t\right) \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_0 t)], \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_{20} \cos\left(\frac{\omega}{2}t\right) \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_0 t)], \quad (2)$$

其中 ω_0 为入射光频率, $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ 为入射光和衍射光的波矢量, $\omega = 2\pi f$ 。两光相干的光强为

$$I = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^* \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2), \quad (3)$$

把(1),(2)式代入(3)式计算整理出来 I 的简化结果包含

$$I_1 = I_0 \{1 + \exp(i\alpha t) + m[\kappa + \exp[i(\nu + \alpha t)]] + \exp[i(-\nu + \alpha t)]\}$$

和

$$I_2 = I_0 \{1 + \exp(-i\alpha t) + m[\kappa + \exp[i(\nu - \alpha t)]] + \exp[i(-\nu - \alpha t)]\}$$

两种成分,式中 $I_0 = |E_{10}|^2 + |E_{20}|^2$, $m = \mathbf{E}_{10} \cdot \mathbf{E}_{20} / (|E_{10}|^2 + |E_{20}|^2)$, $\nu = \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}$, $\kappa = \exp(\nu) + \exp(-\nu)$ 。

这两种成分的光强变化形成的光栅条纹,分别沿着光轴与逆光轴运动,其中与光栅运动方向一致的条纹,在共振状态下,作为驱动力,克服了空间电荷场的衰减,使入射光与其衍射光耦合程度提高。从而加强了原光栅,提高了衍射效率。当干涉条纹与光栅同步运动时,理论上能够使衍射效率提高 25 倍^[14]。

3 结 论

超快光栅自增强效应有重要的意义。它增强了全息超快光栅的写入,用于超快全息记录时,可以降低读出过程中光对全息光栅的擦除效应。

参 考 文 献

- Xu Xinguang, Xu Guibao, Hu Dawei *et al.*. Photorefractive holographic storage properties in Ce:Fe-doped LiNbO_3 crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7):947~952
许心光,许贵宝,胡大伟等. 掺 Ce, Fe 系列 LiNbO_3 晶体光折变效应光存储特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(7):947~952
- G. A. Rakuljic. Prescription for long-lifetime, high-diffraction-efficiency fixed holograms in Fe-doped LiNbO_3 [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(11):825~827
- A. Yariv, S. S. Orlov, G. A. Rakuljic. Holographic storage dynamics in lithium niobate: theory and experiment [J]. *J.*

- Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(11):2513~2523
- 4 Yu Jian, Ni Wenjun, Li Shichen *et al.*. Quasi-phase-matched frequency doubling blue light generation in LiNbO_3 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3):410~413
于建,倪文俊,李世忱等. 准相位匹配 LiNbO_3 蓝光倍频器的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(3):410~413
- 5 Li Chun, An Yuying, Zeng Xiaodong. LiNbO_3 electrooptic tuning optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):172~174
李春,安毓英,曾晓东. LiNbO_3 电光调谐光学参变振荡器[J]. 光学学报, 2004, **24**(2):172~174
- 6 Y. P. Yang, K. Buse, D. Psaltis. Photorefractive recording in $\text{LiNbO}_3:\text{Mn}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3):158~160
- 7 T. K. Gaylord, T. A. Rabson, F. K. Tittle *et al.*. Self-enhancement of LiNbO_3 holograms [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(2):896~897
- 8 M. Reinfelde, O. Salminen, P. Ketolainen. Relaxation of elementary holographic gratings in As_2S_3 films at low diffraction efficiencies [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(15):1085~1086
- 9 A. Ozols, O. Salminen. Relaxational self-enhancement of holographic gratings in amorphous As_2S_3 films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(7):3326~3334
- 10 Roma Grzymala, Tuula Keinonen. Self-enhancement of holographic gratings in dichromated gelatin and polyvinyl alcohol films [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(28):6623~6626
- 11 Song Xuehua, Tao Shiquan, Jiang Zhuqing *et al.*. Study on thermal fixing process of holograms in photorefractive crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):59~62
宋雪华,陶世荃,江竹青等. 光折变晶体中全息图的热固定过程研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1):59~62
- 12 Wu Qiang. Study on nonlinear optical effects with weak light and their applications [D]. Tianjin: Nankai University, 2005, **4**:60~75
吴强. 若干弱光非线性光学效应及其应用的研究[D]. 天津:南开大学, 2005, **4**:60~75
- 13 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Yang Shaozhuang *et al.*. Experimental study on beam parameter measurement system by using area array CCD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):993~996
高雪松,高春清,杨绍状等. 面阵 CCD 激光束参量测量系统及其实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(7):993~996
- 14 Xu Jingjun, Liu Simin, Wu Yuanqing *et al.*. Optical self-enhancement effect and the improvement of the refraction efficiency [J]. *Acta Physica Sinica*, 1991, **40**(9):1443~1447
许京军,刘思敏,武原庆等. $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中调制双光束耦合衍射效率的测定[J]. 物理学报, 1991, **40**(9):1443~1447