

# 双掺 Mg:Fe:LN 中大入射角度对晶格衍射效率的影响

李 强 杨立森 施慧渊 王龙飞 武一洁

内蒙古师范大学物理与电子信息学院, 内蒙古 呼和浩特 010022

**摘要** 为了提高光诱导小周期光子晶格的衍射效率,采用双掺 Mg:Fe:LN 晶体写入一维光子晶格时,通过改变双光束之间的夹角,控制写入晶格的周期,记录不同写入角度衍射效率随时间的变化。实验结果表明:双掺 Mg:Fe:LN 晶体衍射效率在双光束夹角超过 24° 后急速下降,二次谐波引起的光强振荡增大了光子晶格的衍射效率,双光束夹角越大振荡出现的时间越快。

**关键词** 非线性光学; 双掺镁铁铌酸锂; 衍射效率; 入射角度

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.081901

## Influence of Large Incidence Angle on Diffraction Efficiency of Photonic Lattices in Double Doped Mg:Fe:LN Crystals

Li Qiang Yang Lisen Shi Huiyuan Wang Longfei Wu Yijie

Department of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University,  
Hohhot, Nei Monggol 010022, China

**Abstract** In order to improve the diffraction efficiency of light-induced little-period photonic lattices, the periods of written photonic lattice are controlled and the diffraction efficiency curve varying with writing time in different angles is recorded by changing the angle between two induced beams when writing one-dimensional photonic lattice in double doped Mg:Fe:LN crystal. The results show that the diffraction efficiency of double doped Mg:Fe:LN crystal drops sharply when the angle between two induced beam is more than 24°. The intensity oscillation caused by second harmonic increases the diffraction efficiency of photonic lattices. Greater angle between two induced beam makes shorter time of intensity oscillation.

**Key words** nonlinear optics; double doped Mg:Fe:LN; diffraction efficiency; incidence angle

**OCIS codes** 190.4400; 160.5298; 230.1950; 290.5825

## 1 引言

自光子晶体概念提出后,对其的研究就从未间断<sup>[1-5]</sup>。铌酸锂晶体具有特殊的结构,可以利用掺杂不同的元素来改变晶体的结构和它的光折变性能,实现多种器件的应用<sup>[6-10]</sup>。利用光辐照技术制作光子晶格并将其产业化的关键是找到制作大面积、小周期、折射率对比度大、衍射效率高的掺杂铌酸锂晶体和方法<sup>[11-13]</sup>。掺铁铌酸锂晶体(Fe:LN)制作光子晶格具有反应速度快、衍射效率高的优点,但是抗光损伤能力较弱,掺镁铌酸锂晶体(Mg:LN)具有抗光损伤性能。本文采用的镁铁双掺铌酸锂晶体(Mg:Fe:LN)提高了铌酸锂晶体的反应速度,同时也增强了晶体抗光损伤能力。在光路中采用两束相干光大入射角度辐照晶体,获得小周期晶格,但双光束角度过大时又使衍射效率过小。通过实验在保证衍射效率的前提下,找到了双光束写入的最大极限角度。

## 2 实验的理论依据

一维光折变光子晶格是晶体受到周期性光场辐照后产生的折射率周期性分布的光子晶格。制作一维

收稿日期: 2015-02-04; 收到修改稿日期: 2015-03-12; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2013MS0926)

作者简介: 李 强(1987—),男,硕士研究生,主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: yutou.leon@qq.com

导师简介: 杨立森(1953—),男,教授,硕士生导师,主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: ylisen@imnu.edu.cn

光子晶格时两束相干光之间的夹角  $2\theta$  与条纹间距的关系为

$$\Delta x = \lambda / (\sin \theta_1 + \sin \theta_2), \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为两束光线与法线间的夹角, 实验中放置晶体时调整角度使  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 。由(1)式可以看出: 双光束夹角越大, 干涉条纹间距越小, 写入的晶格周期越小; 双光束夹角越小, 条纹间距越大。衍射效率与晶格周期的关系为<sup>[14]</sup>

$$\eta = \frac{1}{2} \exp(-\alpha L / \cos 2\theta) [1 - \cos(\Gamma' L)], \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为晶体吸收系数,  $\Gamma' = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda \cos \theta} \cos \varphi$  为相位耦合系数, 由于晶体是局域响应介质, 所以空间相位移  $\varphi = 0$  或  $\varphi = \pi$ ,  $\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_1$ ,  $E_1$  为当外场为 0 时空间电荷场的一阶分量<sup>[15]</sup>,

$$E_1 = E_q \sqrt{\frac{E_{ph}^2 + E_D^2}{[(N_A/N_D)E_{ph}]^2 + (E_D + E_q)^2}}, \quad (3)$$

其中,  $E_D = \frac{k_B T k}{q}$ , 为扩散场 ( $k_B$  为玻耳兹曼常量,  $k$  为光栅波矢,  $q$  为载流子电荷),  $E_q = \frac{q N_A (N_A - N_D)}{\epsilon k N_D}$ , 为极限场,  $E_{ph} = \frac{k \alpha I}{\sigma}$ , 为光生电场 ( $k$  为格拉斯常数,  $I$  为光强,  $\sigma$  为光电导和暗电导之和),  $N_D$  为施主浓度,  $N_A$  为受主浓度, 折射率  $n_0 = 2.2$ , 介电系数  $\epsilon = 78\epsilon_0$ ,  $T = 300$  K, 晶体厚度  $L = 4.75$  mm, 电光系数  $r_{33} = 31$  pm/V, 激光波长  $\lambda = 488$  nm。由(2)式可以得出, 在波长  $\lambda$  等条件固定的情况下, 衍射效率与双光束夹角  $2\theta$  有关。

### 3 实验装置及实验方法

实验装置和光路如图 1 所示。实验采用波长  $\lambda$  为 488 nm 的半导体激光器。实验晶体为双掺 Mg:Fe:LN 晶体 [Fe: 0.03%(质量分数), Mg: 2.0 mol], 尺寸为 20.7 mm×10.25 mm×4.75 mm。

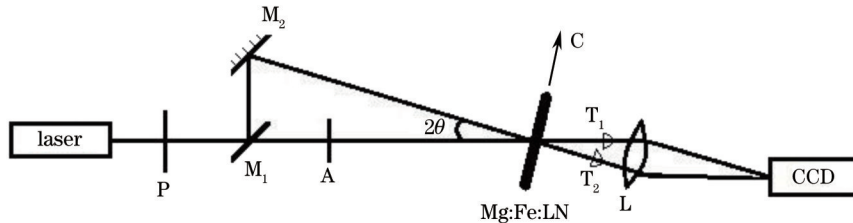


图 1 衍射效率测量光路

Fig.1 Optical path of diffraction efficiency

由激光器发出的束光通过半波片 P, 调整光束的偏振方向, 再经过分光镜  $M_1$  分成了两束相干光, 一束光直接透过  $M_1$  照射到晶体上, 另一束光经反光镜  $M_2$  后反射与第一束光在晶体中相交, 两束光之间的夹角为  $2\theta$ 。A 为可调节衰减片, 可调节第一束光强使到达晶体前表面的两束光功率相等, 每束光功率为  $150 \mu\text{W}$ , 使用分光仪作为晶体底座, 可准确测出两束光的夹角  $2\theta$ , 放置晶体时使其 c 轴垂直于两束光夹角的角平分线。  $T_1$  和  $T_2$  为功率探测器 (不固定在光路内), 负责测量透射光和衍射光的功率大小。L 为焦距 70 mm 的成像透镜, 可将晶体中的干涉条纹成像在 CCD 上, CCD 与计算机连接, 通过计算机屏幕可直接观察写入晶格过程。实验开始时首先测量一束光透过晶体的光功率值并记录, 然后开始双光束辐照晶体, 辐照期间每隔一定时间挡住一束写入光, 用另一束写入光作为读出光, 观察有无晶格的写入及记录 Bragg 衍射

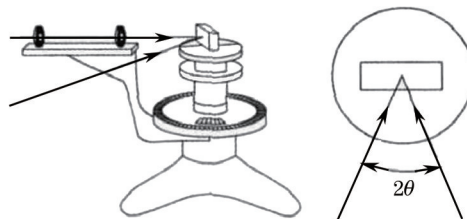


图 2 分光仪测双光束夹角

Fig.2 Two-beam angle measured by the spectrometer

光强  $I_d$  和透射光强  $I_t$  的大小随写入时间的变化。待衍射光强  $I_d$  最大时,说明写入的晶格最好,折射率对比度最高。然后逐次增加双光束之间的夹角,重复以上实验过程,分别绘制不同角度时衍射效率随时间变化曲线及衍射光  $I_d$  和透射光  $I_t$  随时间变化曲线。衍射效率计算公式为  $\eta = I_d/(I_d + I_t)$ 。实验采用分光仪作为晶体的支座(如图2所示),可准确地测量两光束之间的夹角  $2\theta$ 。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 不同写入角度时晶格周期的变化

使用第3节所述实验装置,在双掺镁铁铌酸锂晶体中写入光子晶格,入射光夹角分别在  $2\theta = 20^\circ, 24^\circ, 28^\circ, 32^\circ$  时,CCD观察到的一维光子晶格的晶格周期如图3所示。

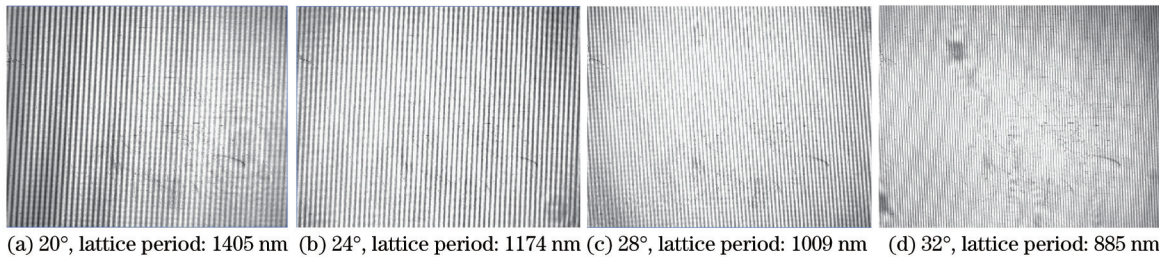


图3 不同夹角写入一维光子晶格图像

Fig.3 One-dimensional photonic crystal lattice images with different written angles

对比图3中的各实验图像可以清楚地看到:随着双光束的夹角增大,写入的一维光子晶格变密,晶格周期变小。实验观察到的图像与之前(1)式的理论推导相符。

### 4.2 不同写入角度时衍射光强的变化

图4为不同角度时光强随时间变化曲线图,  $I_s = I_d + I_t$ 。由4组光强随时间变化图像可以看出:图4(a)中入射光夹角  $2\theta = 20^\circ$ ,从开始辐照到75 min内,透射光  $I_t$  减小,衍射光  $I_d$  增强,说明光子晶格正在写入,75~125 min 两光强基本变化不大,这说明光子晶格已基本写成,125 min 以后两光强交替增强,但两光强之和  $I_s$  基本不变,这是因为有二次谐波的出现;图4(b)中入射光夹角  $2\theta = 24^\circ$ ,  $I_t$ 、 $I_d$  经过一段时间辐照后,同样存在上过程的两光交替增强或减弱的现象;图4(a)和图4(b)两图中,  $I_t$ 、 $I_d$  存在光强值相等的情况,这说明衍射效率达到50%;图4(c)中入射光夹角  $2\theta = 28^\circ$ ,  $I_t$  随时间减少,  $I_d$  随时间增加,但始终  $I_t > I_d$ ,说明有光子晶格的写入,但是衍射效率太低,达不到应用器件的要求;图4(d)中入射光夹角  $2\theta = 32^\circ$ ,  $I_t$  始终远大于  $I_d$ ,说明入射光夹角在  $32^\circ$  时已经很难写入光子晶格。

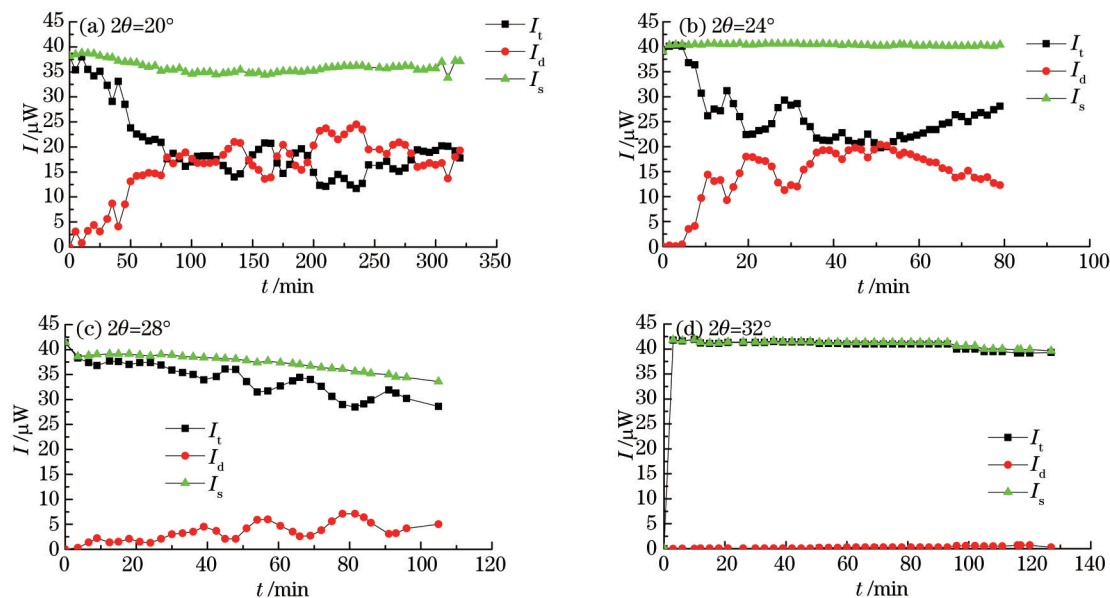


图4 不同角度时光强随时间变化曲线

Fig.4 Light intensity curve varying with time in different angles

### 4.3 不同写入角度时衍射效率随时间变化曲线的对比

图5为不同写入角时衍射效率随时间的变化曲线图,由图可知:图5(a)中入射光夹角 $2\theta=20^\circ$ ,衍射效率随写入时间增强,125 min后出现振荡,二次谐波的产生使写入的条纹出现分裂,衍射效率下降,待条纹完全分裂为两条时,衍射效率又上升,最高达到67.68%,在一段时间内随着光辐照的进行条纹的分裂会反复发生,衍射效率伴随着二次、三次及高次谐波的出现也反复振荡<sup>[16-18]</sup>;图5(b)中入射光夹角 $2\theta=24^\circ$ ,37 min后出现振荡,随后衍射效率在振荡的同时有所上升,最高达到50.75%;图5(c)中入射光夹角 $2\theta=28^\circ$ ,6 min出现振荡,最高衍射效率19.94%;图5(d)中入射光夹角 $2\theta=32^\circ$ ,衍射效率很小,随着时间衍射效率逐步增加,但依然很难达到理想值,最大衍射效率仅为1.75%。

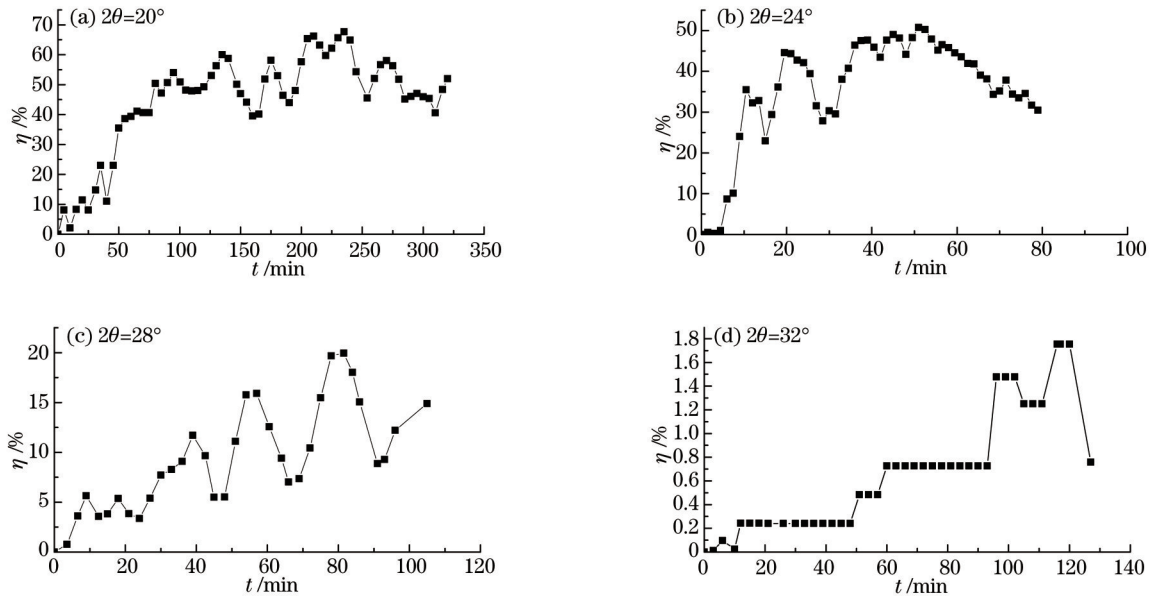


图5 不同写入角度时衍射效率随时间的变化曲线

Fig.5 Diffraction efficiency curve varying with writing time in different angles

从以上分析可看出:随着入射光角度的增大,一维光子晶格的衍射效率逐渐减小,当入射角度超过 $24^\circ$ 时,晶格衍射效率很难达到50%;二次谐波引起的振荡可加大衍射效率;写入角度越大出现振荡的时间越短。

## 5 结 论

光学微结构器件中对光子晶格的晶格周期和衍射效率有较高要求,光子晶格周期过小会导致衍射效率急剧下降,同时也不方便晶格的观察及应用。实验结果表明:在保证衍射效率50%以上的小周期晶格制作中要求双光束入射光夹角应不大于 $24^\circ$ ,并且发现二次谐波引起的光强振荡可加大晶格衍射效率,双光束写入角度越大出现振荡的时间越短。

### 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(17): 2295-2298.
- 2 Nan Zhu, Zhaohong Liu, Ru Guo, *et al.*. A method of easy fabrication of 2D light-induced nonlinear photonic lattices in self-defocusing LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal[J]. Optical Materials, 2007, 30(4): 527-531.
- 3 Liu Qineng. Complete picture of forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 65-68.  
刘启能. 一维光子晶体禁带的全貌结构[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 65-68.
- 4 Wentao Jin, Yuanmei Gao. Optically induced two-dimensional photonic quasicrystal lattices in iron-doped lithium niobate crystal with an amplitude mask[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101: 141104.
- 5 Liu Simin, Chen Xiaohu, Wang Dayun, *et al.*. Photonic crystal fibers and waveguides[J]. Physics, 2001, 30(11): 675-680.  
刘思敏, 陈晓虎, 汪大云, 等. 光子晶体光纤和波导[J]. 物理, 2001, 30(11): 675-680.

- 6 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486–2489.
- 7 Xiong Gangqiang, Wang Jiaxian, Zhang Juncheng, *et al.*. The analysis of the influence factors of photonic absolute band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3523–3526.  
熊刚强, 王加贤, 张峻诚, 等. 二维光子晶体绝对带隙影响因素的分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3523–3526.
- 8 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123002.  
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123002.
- 9 Yun Maojin, Liang Jian, Ren Liyong, *et al.*. Design and optimization of slow light photonic bandgap fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406005.  
云茂金, 梁健, 任立勇, 等. 带隙型光子晶体光纤慢光特性的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406005.
- 10 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei, *et al.*. Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1016003.  
杨辉, 王智勇, 张伟, 等. 基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1016003.
- 11 Yang lisen, Liu Simin, Zhang Guangyin, *et al.*. Experimental study of a faster responsive effect of light induced refractive index change[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(2): 461–467.  
杨立森, 刘思敏, 张光寅, 等. 快速响应的光致折射率改变效应的实验研究[J]. *物理学报*, 2004, 53(2): 461–467.
- 12 Li Qiang, Yang Lisen, Shi Huiyuan, *et al.*. Experimental research of structure photonic lattices in double doped Mg:Fe:LN crystals[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(6): 29–33.  
李强, 杨立森, 施慧渊, 等. 双掺Mg:Fe:LN晶体中构造光子晶格的实验研究[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(6): 29–33.
- 13 Li Yonghui, Yang Lisen, Lu Wenting, *et al.*. Photonic crystal lattice band gap broadening and its theoretical simulation[J]. *Journal of Hebei Normal University*, 2013, 37(2): 143–148.  
李永辉, 杨立森, 逯文婷, 等. 光子晶格带隙展宽及理论模拟[J]. *河北师范大学学报*, 2013, 37(2): 143–148.
- 14 Wu Yijie, Yang Lisen, Wang Longfei, *et al.*. Relationship between writing lattice period and diffraction efficiency in lithium niobate crystals[J]. *Study on Optical Communications*, 2014, 1: 49–52.  
武一洁, 杨立森, 王龙飞, 等. 铌酸锂晶体中写入晶格周期与衍射效率的关系[J]. *光通信研究*, 2014, 1: 49–52.
- 15 Geoffrey W Burr, Demetri Psaltis. Effect of the oxidation state of LiNbO<sub>3</sub>:Fe on the diffraction efficiency of multiple holograms[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(12): 893–895.
- 16 Yang Lisen, Chen Yuhe, Lu Gailing, *et al.*. Generation of spacial second-harmonic in photorefractive photonic lattice[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 3966–3971.  
杨立森, 陈玉和, 陆改玲, 等. 光折变光子晶格中空间二次谐波的产生[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 3966–3971.
- 17 Wang Longfei, Yang Lisen, Wu Yijie, *et al.*. The Influence of special Second-harmonic generation for structure in photonic lattice[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 071901.  
王龙飞, 杨立森, 武一洁, 等. 空间二次谐波产生对光子晶格结构的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 071901.
- 18 Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. *Photorefractive Nonlinear Optics and Its Application*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 87–105.  
刘思敏, 郭儒, 许京军. *光折变非线性光学及其应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 87–105.

栏目编辑: 史敏