

具有线缺陷二维光折变光子晶格的制备研究

崔俊杰 杨立森 张宝光 陈宝东 付存宝 何冬梅

(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 利用交叉相位法采用波长为 532 nm 激光在自散焦光折变晶体 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中成功地制作了带有线缺陷的二维光折变光子晶格,晶格周期为 $12.8\ \mu\text{m}\times 12.8\ \mu\text{m}$,线缺陷宽度为 $32.6\ \mu\text{m}$ 。对其晶格线缺陷局域光的特性进行了详细的实验观测和初步的理论研究。实验结果表明,在折射率变化量仅有 $10^{-5}\sim 10^{-3}$ 的 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中,由于光折变光子晶格的存在,以及晶格带隙的作用,负折射率的线缺陷具有局域光和导光的作用。实验结果说明:在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中写入带有线缺陷的二维光折变光子晶格并把光波局域在缺陷内部是完全可行的。利用此性质,可以制作类似于光子晶体光纤的光学元件,对光通信的发展是非常重要的。

关键词 光折变光子晶格;局域;交叉相位法;线缺陷

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092912.3452

The Research of Fabricating Two-Dimensional Photorefractive Photonic Lattice within Linear-defect

Cui Junjie Yang Lisen Zhang Baoguang Chen Baodong Fu Cunbao He Dongmei

(Department of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China)

Abstract Utilizing the method of cross phase, the two-dimensional photorefractive photonic lattice with linear-defect is fabricated in self-defocusing photorefractive crystal by 532 nm laser. The lattice-spacing is $12.8\ \mu\text{m}\times 12.8\ \mu\text{m}$ and linear-defect width is about $32.6\ \mu\text{m}$. The result proves that it makes localizing and guiding the beam with linear-defect come true in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal, which minus refractive index is only $10^{-5}\sim 10^{-3}$ because the existence of photonic lattice and the effect of band-gap. The result indicates that it is feasible to fabricate two-dimensional photorefractive photonic lattice with linear-defect in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal and localize the beam in the linear-defect. Utilizing this property, it can make optical component which is similar to photonic crystal fibers. It is very important for optical communication's developing.

Key words photorefractive photonic lattice; localizing; the method of cross phase; linear-defect

1 引 言

光子晶格作为集成光学系统的重要元件,在未来的光通信发展中起着举足轻重的作用。制作光子晶格的传统方法如离子交换、离子注入、刻蚀以及薄膜沉积^[1]等存在工艺繁杂、制作成本高等缺点,且不利于材料内部制作光子晶格。近年来,随着光折变材料的出现,可以利用光辐照在光折变材料体内制作光子晶格,这被认为是一种直接、快速、低成本、高

效益的制作技术^[2~11]。掺铁铌酸锂($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$)晶体目前被公认为优质的光折变材料之一,在光存储、光放大、光开关和窄带滤波等方面有着广泛的应用前景^[12~15]。成功地在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入了(2+1)维光子晶格。虽然光子晶格具有光子带隙,但是光子晶格在应用上仍缺乏生机。如果在其中嵌入缺陷之后,可以在带隙中形成缺陷模,由于带隙的作用把光局域在缺陷内部,同时可以对光波的

收稿日期: 2008-11-12; 收到修改稿日期: 2009-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(60467002)和内蒙古师范大学研究生科研创新基金(YJS07022)资助课题。

作者简介: 崔俊杰(1981—),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: cuijunjie518@qq.com

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

传播方向和频率进行控制,使某一方向、某一频率的光波通过,而其他频率的光波不能通过,利用此特点已经成功地制作了带隙型光子晶体光纤^[16],对光通讯的发展起了重大的作用,因此研究缺陷局域光这一性质有着重要的意义。但是现在传统制作缺陷的方法,如高温烧结法^[17]:在氧化硅中以 2000 ℃ 的高温烧结而成的缺陷,此方法制作的缺陷虽然与邻近处的高低折射衬比度远远大于掺铁铌酸锂晶体,可以很容易地把光局域在缺陷的内部,但是此方法具有复杂、技术含量高且难以实现等缺点。陈志刚等^[18~20]曾经用光辐照的方法在光折变 SBN 晶体中制作了带有线缺陷的一维光折变光子晶格和带有点缺陷的二维光折变光子晶格,并且实现了缺陷对光波的局域作用。刘思敏等^[23,24]也曾经对缺陷模孤子进行了详细的研究。但是在 LiNbO₃:Fe 晶体中构造带有线缺陷的二维光折变光子晶格并通过外界条件控制缺陷处局域光波的强度,至今仍未见报道。

本文主要采用交叉相位法,在 LiNbO₃:Fe 晶体中构造了带有线缺陷宽为 32.6 μm 的 12.8 μm × 12.8 μm 二维光折变光子晶格,并对线缺陷局域光的特性进行了分析。

2 实验过程与分析

2.1 实验过程

采用光束呈高斯分布的 YAG 激光器(波长为 532 nm,中心光强值约 40 mW)作为辐照光源辐照在 LiNbO₃:Fe 晶体 *x y* 表面上且光束沿 *z* 方向传播。LiNbO₃:Fe 晶体(Fe 的质量分数为 0.03%,尺寸为 *x* × *y* × *z* = 27 mm × 20 mm × 4 mm)的 *c* 轴平行于 *x* 轴。

在图 1 中,上半部分为制作光折变光子晶格的

辐照光路^[25],YAG 激光器发出的激光经过偏振片 P,经过扩束和准直后,通过四孔菱形振幅掩膜 Mask₂[图 2(a)]得到四束相干光,然后将其经过透镜 L₂,再由分束棱镜 BS 把相干光辐照到晶体 *c* 轴上,成像的写入和读出图样[图 2(b)和(c)];下半部分为制作缺陷的辐照光路^[25],以同样的 YAG 激光器做为辐照光束,经过偏振片 P 和扩束准直并经过 15 孔直线型振幅掩膜 Mask₁[如图 3(a)],得到并排 15 束相干光,通过分束棱镜 BS 和透镜 L₁ 将 15 束相干光辐照在晶体 *c* 轴上,成像的写入和读出图样[图 3(b)和(c)]。然后将晶体置于两透镜(L₁ 和 L₂)的公共焦点上,并使两列光在晶体的前表面聚焦且保证两列光束在通过分束棱镜 BS 后成一线(保证探测光束与写入光束平行且共线),再将两列光束同时辐照在晶体的同一点上,最后通过透镜 L₃ 将晶体后表面的像成像在 CCD 上,CCD 输出经计算机(PC)处理后,可在 PC 屏幕上直接观察到晶体的实时变化。经过一段时间后,如图 1 所示,从中引出 M₁,M₂,M₃,M₄ 组成读出光路,并适当旋转反射镜 M₄ 的角度,使读出光束以布拉格角度进行读出。

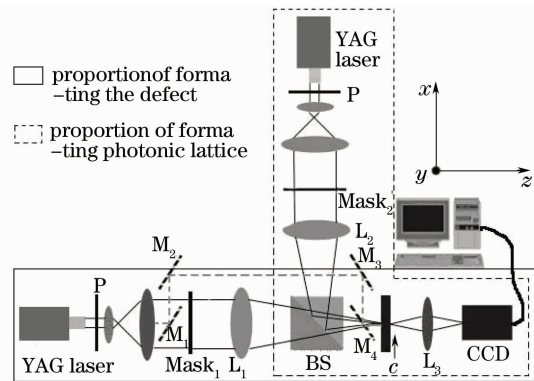


图 1 交叉相位法的实验装置

Fig. 1 The experimental setup of the method of cross phase

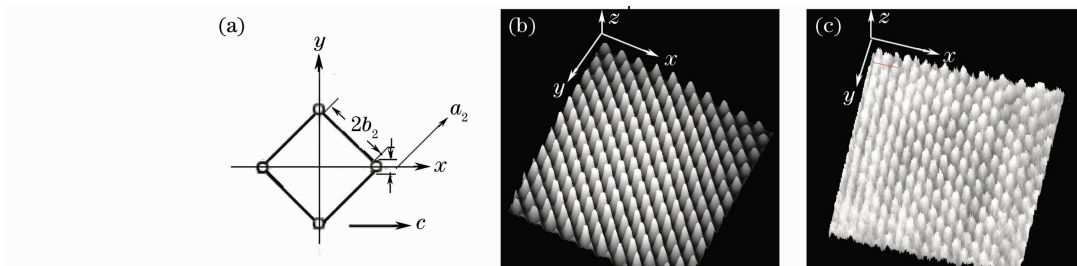


图 2 制作光子晶格的掩膜及其相应的写入和读出图。(a)四孔掩膜 Mask₂;

(b)放入晶体 *t*=0; (c)放入晶体 *t*=40 min 读出图

Fig. 2 The mask of fabricating photonic lattice and the corresponding writing and readout image. (a) four-core mask; Mask₂; (b)input crystal *t*=0; (c) input crystal *t*=40 min the image of readout

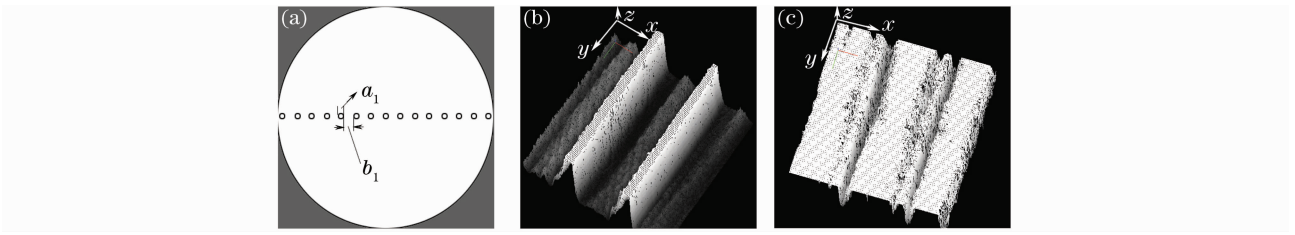


图3 制作线缺陷的掩膜及其相应的写入和读出图。(a)15孔掩膜 Mask₁;
(b)放入晶体 $t=0$;(c)放入晶体 $t=40$ min 读出图

Fig. 3 The mask,f fabricating linear-defect and the corresponding writing and readout image. (a) fifteen-core mask; Mask₁; (b) input crystal $t=0$; (c) input crystal $t=40$ min the image of readout

2.2 实验结果

在实验中,采用非常偏振光(e光)对 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体进行辐照,即晶体光轴(c 轴或沿 x 轴方向)垂直于辐照光束的传播方向(z 轴),辐照光束的偏振方向与晶体的光轴平行。控制实验因素,选择 Mask₁ 和 Mask₂ 的孔直径和孔间距分别为 $a_1=0.5$ mm, $b_1=2.4$ mm 以及 $a_2=0.6$ mm, $b_2=8.8$ mm,控制探测光束的光强与写入光束的光强比为 $I_1:I_2=4:1$,再选择辐照时间 $t=40$ min,并以布拉格角度 $\alpha=0.57^\circ$ 读出。图4(a)、(b)分别展示了在两列光束同时辐照晶体 0 和 40 min 时晶体的后面光强分布情况,而图4(c)则是其相应地读出情况。图4

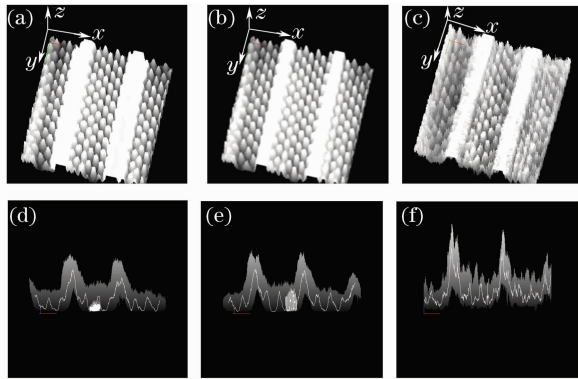


图4 辐照光束透射 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体后不同时间的实时图(a)放入晶体 $t=0$;(b)放入晶体 $t=40$ min;(c)放入晶体 $t=40$ min 读出图和对应的光强分布剖面图(d)放入晶体 $t=0$;(e)放入晶体 $t=40$ min;(f)放入晶体 $t=40$ min 读出图

Fig. 4 Real-time image of the transmission after irradiating $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal with irradiation beam (a)input crystal $t=0$; (b) input crystal $t=40$ min; (c) input crystal $t=40$ min the image of readout and the corresponding distributed section image of beam intensity at (d) input crystal $t=0$; (e) input crystal $t=40$ min; (f) input crystal $t=40$ min the image of readout

(d)、(e)、(f) 则是与(a)、(b)、(c)相对应的光强分布剖面图。从图中可以看出,用交叉相位法并且满足以上的实验因素时,就可以在晶体内构造带有线缺陷的光折变光子晶格,并且可以利用布拉格反射作用将光波局域于缺陷的内部。

3 理论分析

根据缺陷模^[18~26]理论,如果负缺陷具有适当的深度且满足相位匹配条件时,此时就可以把光波局域在缺陷内部。在实验中,探测光束和写入光束彼此不相干但偏振方向相同,所以它们之间通过相互相位调制而相互作用。写入的光感应光子晶格 $\Delta n \approx -4.0 \times 10^{-5}$ ^[27],属于浅阵列,所以写入光束主要激发的是第一布洛赫带。因为 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体是自聚焦晶体,所以在探测光束和写入光束的共同作用下,在探测光束辐照区域感应出一个负缺陷,且负缺陷和探测光束自动满足相位匹配条件。在实验中,写入光束和探测光束的共同辐照区域折射率是降低的,即 $\Delta n < 0$,读出时该区域应该为暗,如图3(c)所示。

从理论上进行计算^[28]:从 $t=0$ 将两列光束同时辐照在晶体的同一点上,在两列光波共同辐照的区域可以认为是两列光波叠加的区域,其光强分布为

$$I = I_1 + I_2, \quad (1)$$

式中 I_1 为探测光束的光强, I_2 为写入光束的光强, I 为叠加后的总光强。其中

$$I_1(x, y) = \left[\sum_{n=0}^7 \cos(n\pi v_x b_1) \right]^2, \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = [\cos(2\pi v_x 2b_2) + \cos(2\pi v_y 2b_2)]^2, \quad (3)$$

式中 $v_x = x/\lambda f$, $v_y = y/\lambda f$, v_x, v_y 为频率。利用公式^[24]

$$\nabla^2 \varphi_0 + \nabla \varphi_0 \nabla \ln(1 + I) = \frac{\partial \ln(1 + I)}{\partial x}, \quad (4)$$

$$E_{\text{ph}} = -\nabla \varphi, \quad (5)$$

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{\text{eff}} E_{\text{ph}} \frac{\partial \varphi_0}{\partial x}, \quad (6)$$

式中 $\varphi_0 = \frac{\varphi}{E_{\text{ph}}}$, E_{ph} 为光生伏打场的强度, φ 和 φ_0 均为电势。求解(4)式~(6)式得到折射率分布,如

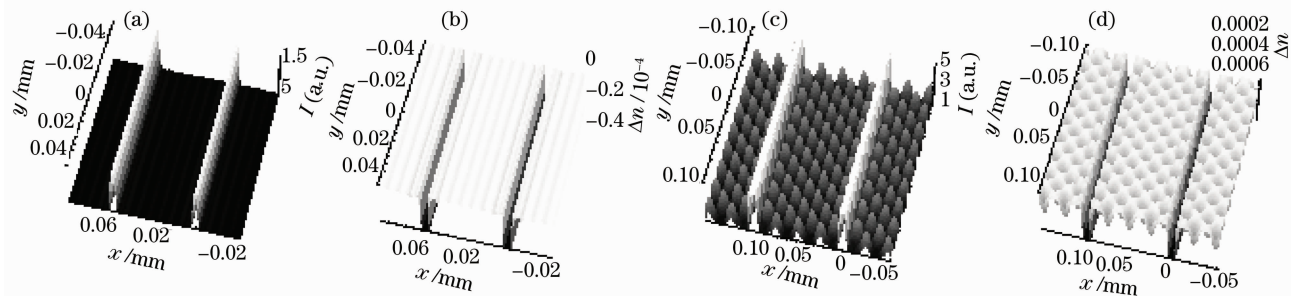


图5 写入线缺陷光子晶格的辐照光强图和读出时折射率分布图

Fig. 5 Beam intensity distributed image of writing photonic lattice with linear-defect and refractive index distributed image

将以上的理论模拟结果与实验进行对比,可以看出,在写入光束和探测光束共同辐照区域的折射率是降低的,即 $\Delta n < 0$ 。但是在实验中发现,虽然两列光束同时写入的共同区域 $\Delta n < 0$,但是读出时线缺陷处光波的强度却大于邻近晶格处,如图 4(c),这是因为在探测光束的辐照区域激发出一个恰当深度的缺陷,把光波局域在缺陷内部。

在光辐照初期,缺陷的深度很浅,它对光波的俘获能力很小,缺陷处的光波能量也较小;随着辐照时间的增加,晶体的折射率变化量由自散焦线性变化转变为自散焦非线性变化。正是由于自散焦非线性而使得缺陷处光波的宽度进一步加宽,缺陷处的光波能量向邻近的晶格转移,探测光束产生了分立衍射现象;随着辐照时间的进一步增加,光子晶格中负缺陷的深度逐渐增加,同时负缺陷的传播常数也在

降低,最终进入第一和第二传播带之间的带隙中。此时,探测光束的分立衍射现象由于反复地布拉格反射也越来越弱,邻近晶格中光波的能量向线缺陷处转移,线缺陷处光波的强度逐渐增强,光波被线缺陷逐渐俘获,如图 4(b)。当线缺陷达到最佳深度时,线缺陷处光波的强度达到最大值,此时线缺陷对光波的局域作用达到最强,然后以 M_1 入射使其以布拉格角度 ($\alpha = 0.57^\circ$) 读出,发现实验结果达到最佳,如图 4(c)。从图 4(c)中可以看出,当 $t = 40 \text{ min}$ 时,晶格中光波的大部分能量都被转移到了线缺陷处,线缺陷处光波的强度达到最大,证明了线缺陷达到了最佳深度。此时,如果辐照时间继续增加,线缺陷的深度也会继续增加,但是线缺陷处的光强由强逐渐变弱,光波的能量向临近的晶格转移,最终使得线缺陷局域光的现象消失,如图 6(a)所示,这是因

降低,最终进入第一和第二传播带之间的带隙中。此时,探测光束的分立衍射现象由于反复地布拉格反射也越来越弱,邻近晶格中光波的能量向线缺陷处转移,线缺陷处光波的强度逐渐增强,光波被线缺陷逐渐俘获,如图 4(b)。当线缺陷达到最佳深度时,线缺陷处光波的强度达到最大值,此时线缺陷对光波的局域作用达到最强,然后以 M_1 入射使其以布拉格角度 ($\alpha = 0.57^\circ$) 读出,发现实验结果达到最佳,如图 4(c)。从图 4(c)中可以看出,当 $t = 40 \text{ min}$ 时,晶格中光波的大部分能量都被转移到了线缺陷处,线缺陷处光波的强度达到最大,证明了线缺陷达到了最佳深度。此时,如果辐照时间继续增加,线缺陷的深度也会继续增加,但是线缺陷处的光强由强逐渐变弱,光波的能量向临近的晶格转移,最终使得线缺陷局域光的现象消失,如图 6(a)所示,这是因

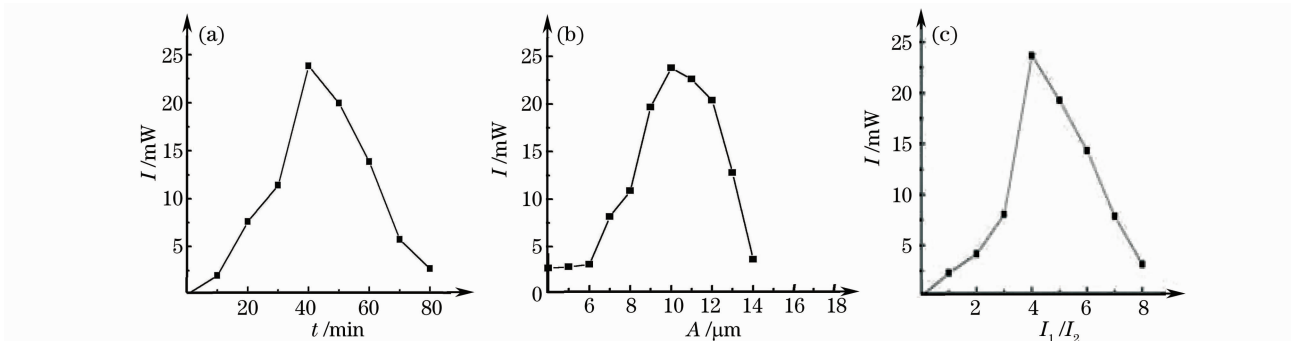


图6 不同实验因素与缺陷处光强的曲线图。(a)辐照时间与线缺陷处光强图;
(b)晶格间距与线缺陷处光强图;(c)写入光强比与线缺陷处光强

Fig. 6 The graphs of different experimental factors and the beam intensity of linear-defect. (a) irradiation time and the beam intensity of linear-defect; (b) lattice-spacing and the beam intensity of linear-defect; (c) beam intensity ratio and the beam intensity of linear-defect

为线缺陷已经不在最佳深度。若改变其它实验因素(如掩膜孔间距、入射光强比),不能使线缺陷及时达到一定的深度,同样线缺陷局域光的现象也会消失,如图 6(b)和(c)。

因此认为,在写入光束与探测光束的共同作用下,在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中制作了带有线缺陷的二维光折变光子晶格,被激发的缺陷具有恰当的深度,缺陷内的光束通过反复的布拉格反射被局域在缺陷内部。

4 结 论

本文采用交叉相位法在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中构造了带有线缺陷的二维光折变光子晶格,并对其实验条件进行了讨论。被激发的线缺陷具有恰当的深度,光波被俘获在缺陷中。若改变其中任何一个实验条件,缺陷处被局域光波的强度都会改变,甚至不可能把光波局域在缺陷内部,因此可以通过改变实验条件来控制缺陷处被局域光波的强度。

从理论上对被辐照后的晶体中的折射率分布进行了模拟,从理论和实验的角度证明了,在探测光束和写入光束共同辐照区域的折射率是降低的,即 $\Delta n < 0$, $\Delta n \approx -4.0 \times 10^{-5}$ 。但是从实验中发现,在读出时折射率降低的线缺陷区域光波的强度比邻近晶格的光波的强度要强。因此可以证明,在折射率对比度较低的 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中构造的二维光折变光子晶格可以在其中嵌入线缺陷,并且通过反复的布拉格反射将光波局域在线缺陷内部。利用这一性质,人们可以用来制作类似于光子晶体光纤的光学元件,对光通信的发展起到了至关重要的作用。

参 考 文 献

- 1 R. G. Hunsperger. *Integrated Optics Theory and Technology* [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1982. 38~44
- 2 K. Miura, J. Qiu, H. Inouye *et al.*. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultra short pulse laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 3329~3331
- 3 Ji Xuanmang, Wang Jinlai, Liu Jinsong. Evolution of gauss beam in biased centrosymmetric photorefractive media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1798~1804
吉选芒,王金来,刘劲松. 高斯光束在有外电场的中心对称光折变材料中的演化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1798~1804
- 4 M. P. Joshi, H. E. Pudavar, J. Swiatkiewicz *et al.*. Three-dimensional optical circuitry using two-photon-assisted polymerization[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(2): 170~172
- 5 O. Matoba, T. Inujima, T. Shimura *et al.*. Segmented photorefractive waveguides in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(7): 2006~2012
- 6 Liu Youwen, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Effect of intensity on properties of nonvolatile holographic recording in $(\text{Cu}, \text{Ce}):\text{LiNbO}_3$ Crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1186~1189
刘友文,刘立人,刘德安等. 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 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1186~1189
- 7 Liu Hongmei, Yan Xiaona. Wavelength demultiplexing scheme implemented by single volume grating in photorefractive LiNbO_3 Crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1893~1897
刘红梅,阎晓娜. 光折变 LiNbO_3 晶体中单光栅实现波长解复用方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1893~1897
- 8 Yang Dexing, Zhao Jianlin, Zhang Peng *et al.*. The index changes of waveguides fabricated by light irradiation in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(5): 1179~1183
杨德兴,赵建林,张鹏等. $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中光写入波导时折射率的变化规律[J]. *物理学报*, 2003, **52**(5): 1179~1183
- 9 Zhao Honge, Liu Simin, Wang Dayun. Influence of light intensity on photorefractive properties in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ and $(\text{Fe}, \text{Tb}):\text{LiNbO}_3$ crystals[J]. *Acta. Optica. Sinica*, 2003, **23**(10): 1176~1180
赵红娥,刘思敏,汪大云. $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 和 $(\text{Fe}, \text{Tb}):\text{LiNbO}_3$ 晶体中入射光强对光折变性质的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1176~1180
- 10 Ren Liyong, Liu Liren, Liu Dean. Effect of microcosmic optical parameters of doubly doped LiNbO_3 on Diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 941~946
任立勇,刘立人,刘德安. 双掺杂 LiNbO_3 微观光学参量对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 941~946
- 11 Zhang Guoquan, Zhang Wanlin, Sun Qian *et al.*. The competition between the protons and the thermally excited electrons in photorefractive $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 597~601
张国权,张万林,孙 菁. 光折变 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中质子与热激发电子之间的竞争[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 597~601
- 12 O. Matoba, K. Itoh, Y. Ichioka. Array of photorefractive waveguides for massively parallel optical interconnections in lithium niobate[J]. *Opt Lett.*, 1996, **21**(2): 122~124
- 13 O. Matoba, K. Kuroda, K. Itoh. Fabrication of a two-dimensional array of photorefractive waveguides in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ using non-diffracting checkered pattern[J]. *Opt Commun.*, 1998, **145**(6): 150~154
- 14 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699
张文富,方 强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699
- 15 Yang Xudong, Xu Xinguang, Shao Yaopeng *et al.*. Photovoltaic effect in doped photorefractive LiNbO_3 crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 398~401
杨旭东,许心光,邵耀鹏等. 掺杂光折变 LiNbO_3 晶体光伏效应特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 398~401
- 16 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 17 Ning Xuefeng, Yan Kezhu. *The research of band-gap structure in one-dimensional photonic crystal and the numerical research of defect mode* [D]. Shandong: Qufu Normal University, 2005. 10~16
宁学峰,闫珂柱. 一维光子晶体带隙结构及其缺陷模的数值研究 [D]. 山东:曲阜师范大学, 2005. 10~16
- 18 Francesco Fedele, Yang Jianke, Chen Zhigang. Defect modes in one-dimensional photonic lattices[J]. *Opt Lett.*, 2005, **30**(12): 1506~1508
- 19 Francesco Fedele, Yang Jianke, Chen Zhigang. Properties of defect modes in one-dimensional optically induced photonic lattices [J]. *Stud. Appl. Math.*, 2005, **115**(2): 279~301
- 20 Dragomir Neshev, Yuri S. Kivshar, Hector Martin *et al.*

- Soliton stripes in two-dimensional nonlinear photonic lattices[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 486~488
- 21 Igor Makasyuk, Chen Zhigang, Yang Jianke. Band-gap guidance in optically induced photonic lattices with a negative defect[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(22): 223903
- 22 Chen Zhigang, Hector Martin, Eugenia D. Eugenieva *et al.*. Anisotropic enhancement of discrete diffraction and formation of two-dimensional discrete-soliton trains[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 2004, **92**(14): 143902
- 23 Song Tao, Liu Simin, Guo Ru *et al.*. Observation of composite gap solitons in optically induced nonlinear lattices in LiNbO₃:Fe crystal[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1924~1932
- 24 Qi Xinyuan, Liu Simin, Guo Ru *et al.*. Defect solitons in optically induced one-dimensional photonic lattices in LiNbO₃:Fe crystal[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **27**(2): 387~390
- 25 Yang Lisen, Chen Xiaohu, Liu Simin *et al.*. Fabrication of photorefractive waveguides array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1200~1204
- 杨立森, 陈小虎, 刘思敏 等. (2+1) 维光折变波导阵列的制作[J]. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1200~1204
- 26 Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. *Application and Photorefractive Nonlinear Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2004. 2~85
- 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. 2~85
- 27 Yang Lisen, Wu Ruixiang, Lu Gailing *et al.*. Experimental research of refractive index modulation degree about optically induced photonic lattices[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1530~1533
- 杨立森, 武瑞祥, 陆改玲 等. 光诱导光子晶格折射率调制度的实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(11): 1530~1533
- 28 Xu Honglai, Zhao Jianlin. *Experimental investigations on photo-written 3-D waveguides in iron-doped lithium niobate crystals* [D]. Shanxi: Xibei Industry University, 2006. 16~29
- 徐宏来, 赵建林. 掺铁铌酸锂晶体中光写入三维波导的实验研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2006. 16~29