

# 光强变化对双中心非挥发光折变局域体光栅的影响

王 欣

(南京理工大学大学物理实验中心, 江苏 南京 210094)

**摘要** 为研究局域体光栅的光折变形成机制及衍射特性,以双中心非挥发全息记录方案为基础,将带运输模型与二维耦合波理论相结合,采用数值模拟的方法,研究紫外敏化光强和记录红光总光强的变化对  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  晶体中局域体光栅的影响,并给出定影结束时平均折射率调制、衍射光波振幅及衍射效率的模拟结果。研究发现:记录红光总光强不变时,平均折射率调制随紫外敏化光强增加而增加,而紫外敏化光强的改变对衍射波振幅的分布影响不大,衍射效率随紫外敏化光强度的增大先增大后减小,存在最佳紫外敏化光强,以获得 80% 以上的最高衍射效率。当紫外敏化光强不变时,随着记录红光总光强的增加,记录折射率光栅逐渐减弱,衍射波振幅分布变得越来越均匀,衍射效率逐渐降低。

**关键词** 全息; 局域体光栅; 带运输模型; 二维耦合波理论; 平均折射率调制; 衍射光强; 衍射效率

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0859

## Influence of Light Intensity Change on Two-Central Nonvolatile Crossed-Beam Photorefractive Gratings

Wang Xin

(Physics Experimental Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** Based on the two-center nonvolatile holographic recording method and the theory model combining band transport model with the two-dimensional coupled-wave equations, the numerical simulation method is used to study the photorefractive formation and diffractive properties of the crossed-beam photorefractive gratings. The influence of the intensity change of sensitizing ultraviolet (UV) light and the total intensity change of the recording red light on nonvolatile crossed-beam photorefractive gratings in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals is investigated. And the results, including the average refractive index modulation, the spatial distribution of the diffracted intensity and the diffracted efficiency at the fixing end, are obtained. When the UV light intensity increases under fixed red light intensity, the average refractive index modulation increases accordingly, the spatial distribution of the diffracted intensity is almost unchanged and the diffraction efficiency increases firstly and then decreases. There is an optimal intensity for the sensitizing UV light to achieve the maximum diffraction efficiency (higher than 80%). When the intensity of the sensitizing UV light is fixed, with increasing recording red light intensity, the index grating recorded wears off, the spatial distribution of the diffracted intensity is more and more homogeneous, and the diffraction efficiency decreases.

**Key words** holography; crossed-beam photorefractive gratings; band transport model; two-dimensional coupled-wave theory; average index modulation; diffracted intensity; diffraction efficiency

## 1 引 言

局域体光栅是指在体光栅材料中由有限宽度相干光束记录形成的具有有限边界结构的体全息光栅<sup>[1]</sup>。光折变材料中的局域体光栅在光学领域有着很大的应用前景,它可以用于数据存储、三维集成光学及成像光

学等<sup>[2~4]</sup>,有关其衍射特性的研究已经引起国际上的广泛关注<sup>[5~9]</sup>,但是对其光折变记录形成机制研究很少涉及。文献<sup>[10]</sup>考虑光栅的时间特性研究动态局域体光栅,但没有考虑记录材料的动态光折变特性。文献<sup>[11]</sup>以单掺杂晶体材料的物质波方程为基础,将空间

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-10-09

基金项目: 南京理工大学科研启动基金项目(AB41928)资助课题。

作者简介: 王 欣(1978—),女,讲师,博士,主要从事局域体光栅动态形成机制和衍射特性等方面的研究工作。

E-mail: wangxin@mail.siom.ac.cn

电荷场的解析解带入到两维双光束耦合波方程中,研究动态局域体光栅的性能。但是,对于双掺杂的晶体材料中光折变局域体光栅<sup>[12,13]</sup>,由于不能得到简化的空间电荷场解析解,以上的方法并不能适用。为得到较强的光折变光栅和固定衍射效率,人们以一维有限厚度的光折变体光栅为基础提出了双中心记录参量的优化方案<sup>[14]</sup>,但并没有涉及双中心非挥发记录形成的光折变局域体光栅的形成和衍射问题。

为了研究局域体光栅的光折变形成机制,将带运输模型与二维耦合波理论相结合,建立了描述双掺杂光折变晶体中非挥发局域体光栅的光折变动态形成机制的理论模型<sup>[15]</sup>。本文以该理论模型为基础,研究光强变化包括紫外敏化光强和记录红光总光强的变化对双掺杂 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体中非挥发记录形成局域体光栅的影响。研究结果对光折变局域体光栅的记录形成及其应用技术的发展具有指导意义

## 2 理论模型

图 1 是双掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中局域体光栅记录结构图。其中两记录红光的振幅分别为  $E_1$  和  $E_2$  (O 光),光束宽度分别为  $w_1$  和  $w_2$ ,晶体光轴  $\hat{c}$  沿着  $z$  方向,法向沿  $x$  方向。两记录光束晶体内的入射角均为  $\theta$ ,振幅  $E_1$  和  $E_2$  表示如下

$$E_j(\mathbf{r}) = A_j(x, z) \exp(-i\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{r}) \quad (j = 1, 2) \quad (1)$$

式中  $A_1$ ,  $A_2$  和  $\mathbf{K}_1$ ,  $\mathbf{K}_2$  分别为记录光束  $E_1$  和  $E_2$  的电场振幅和光波矢量。

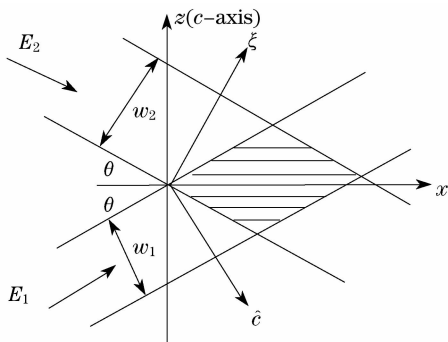


图 1 双掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中光折变局域体光栅记录结构  
Fig. 1 Recording geometry for crossed-beam photorefractive grating in two-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal

在局域体光栅的记录阶段,因载流子运输而产生的空间电荷场可以由两维双中心物质波方程得到。根据文献<sup>[15]</sup>中的理论模型,空间电荷场的复振幅可以表示为

$$E_{SC} = -\frac{ie}{\epsilon\epsilon_0 k_g} (N_{D1}^- + N_{S1}^- + N_{e1}) \quad (2)$$

其中,常量  $e$  和  $\epsilon$  分别为电荷电量和电导率, $\epsilon_0$  为真空电导率。 $k_g = 2k_0 n_0 \sin\theta$  为光栅波矢的大小, $k_0$  为记录光在真空中的波矢大小, $n_0$  为晶体内记录光的折射率。变量  $N_{D1}^-$ ,  $N_{S1}^-$  和  $N_{e1}$  分别为深浅中心及导带中的电子浓度的一阶傅里叶分量。记录阶段采用紫光为敏化光,其方向沿着  $x$  方向。根据线性电光效应,由空间电荷场而产生的折射率调制可表示为

$$n_1 \exp(i\varphi_E) = -\frac{n_0^3 \gamma_{13} E_{SC}}{2} \quad (3)$$

其中  $\varphi_E$  为空间电荷场的幅角,而  $\gamma_{13}$  为电光系数。

在整个局域体光栅的记录和定影阶段,衍射特性均由两维耦合波方程来描述。定义衍射效率为沿着  $\xi$  方向衍射能量与沿  $\xi$  和  $\eta$  方向衍射和透射总能量的比值,即

$$E_D = \frac{P_{out}^S}{P_{out}^R + P_{out}^S} \quad (4)$$

其中  $P_{out}^S = \int_0^{w_2} |A_2(\xi, w_1)|^2 d\xi \csc 2\theta$  和  $P_{out}^R = \int_0^{w_1} |A_1(w_2, \eta)|^2 d\eta \csc 2\theta$ 。坐标轴  $\xi$  和  $\eta$  方向分别与记录光波矢量  $\mathbf{K}_1$  和  $\mathbf{K}_2$  垂直(见图 1)。

## 3 结果与讨论

下面给出双掺杂 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体中非挥发记录形成局域体光栅的数值模拟结果,并讨论光强变化对局域体光栅形成和衍射特性的影响。数值计算的边界条件是选取记录阶段两束记录光光强相等即  $A_1(0, \eta) = A_2(\xi, 0) = A_{10}$ ,固定阶段其中一束记录光强为零即  $A_1(0, \eta) = A_{10}$  和  $A_2(\xi, 0) = 0$ 。两记录红光的光束宽度  $w_1 = w_2 = 1.0$  mm,晶体外记录角为  $30^\circ$ ,其它有关参量的取值同文献<sup>[15]</sup>。

### 3.1 紫外敏化光强变化的影响

记录红光总光强为  $I_{L0} = 5000$  W/m<sup>2</sup>,紫外敏化光光强  $I_{H0}$  分别取  $I_{H0} = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $500$  W/m<sup>2</sup>,  $1000$  W/m<sup>2</sup> 和  $2500$  W/m<sup>2</sup>。图 2 是定影结束时刻平均折射率调制随紫外光强的变化,其中平均折射率的定义是光栅区域内折射率调制的空间平均值。可以看出平均折射率调制随敏化光强增加而增加,同时随着敏化光强的增加,折射率调制的增加趋于平缓,这说明当紫外敏化光强增加到一定值时平均折射率调制将趋于饱和。图 3 给出了光栅边界上衍射强度的分布曲线,该图表明紫外敏化光强的改变对衍射光波振幅的分布影响不大。

图 4 是固定结束时刻衍射效率随着紫外敏化光强变化曲线,可以看出随着紫外敏化光强度的增大,衍射效率先增大而后逐渐减小。这说明对于非挥发全息记录的局域体光栅来说,存在最佳的敏化光强使得衍射效率最大。对比图 2 和图 4,平均折射率调制与衍射效率随

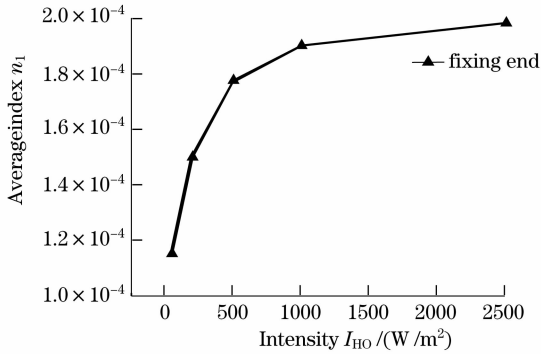


图 2 定影结束时刻平均折射率调制随紫外敏化光强的变化  
Fig. 2 Change of the average index modulation with the intensity of the sensitizing UV light at the fixing end

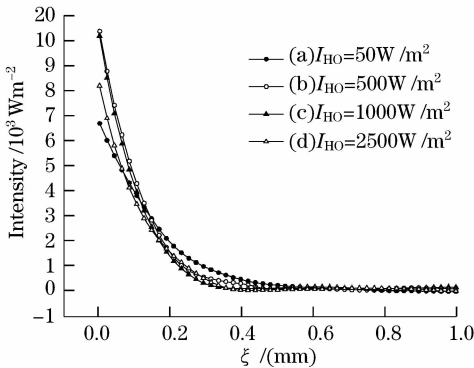


图 3 不同紫外敏化光强度,固定结束时刻光栅边界上衍射光强的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the diffracted intensity along the grating bound at the fixing end with different intensities of the sensitizing UV light

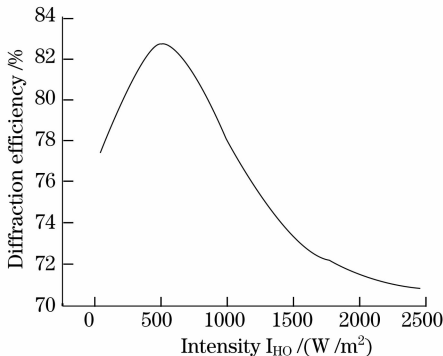


图 4 固定结束时刻衍射效率随紫外敏化光强的变化  
Fig. 4 Change of the diffraction efficiency with the intensity of the sensitizing UV light at the fixing end

敏化光强的变化趋势不同,这可能是由于光折变局域体光栅的空间非均匀性所致。

### 3.2 记录红光总光强变化的影响

固定紫外敏化光强  $I_{H0}$  为  $100 \text{ W/m}^2$ ,记录红光的总光强  $I_{L0}$  分别取  $I_{L0} = 500 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2, 2500 \text{ W/m}^2$  和  $8000 \text{ W/m}^2$ 。图 5 给出了固定结束时刻平均折射率调制随记录红光总光强的变化,该图表明记录折射率光栅随着记录红光总光强的增加逐渐减弱,这可能是由于较强的红光对浅能级离子具有较强的漂白作用从而削弱了稳态电荷场所致<sup>[16]</sup>。图 6 所示为固定结束时刻光栅边界上衍射光强分布曲线,从图中可以看出随着记录光强的增加,衍射波振幅分布变得越来越均匀。图 7 为固定结束时刻衍射效率随记录光强的变化曲线,图中显示衍射效率随着记录光强的增加而逐渐降低。因此,对于非挥发全息记录的局域体光栅,适当的降低记录红光的光强,有利于提高衍射效率。

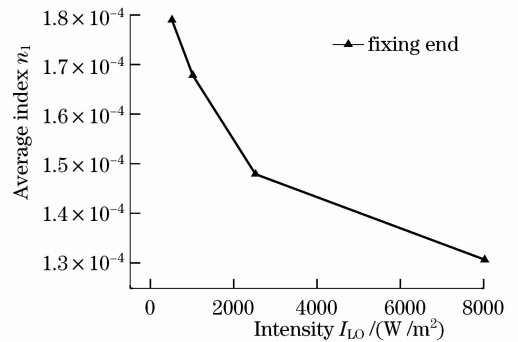


图 5 固定结束时刻平均折射率调制随记录红光总光强的变化

Fig. 5 Change of the average index modulation with the total intensity of the recording red light at the fixing end

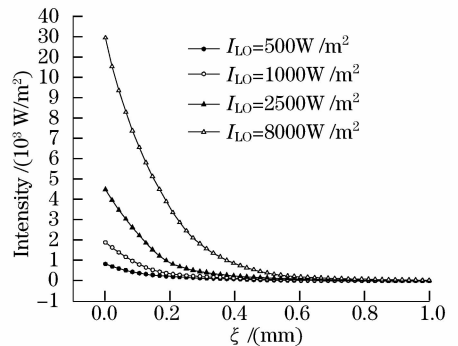


图 6 不同记录红光总光强,固定结束时刻光栅边界上衍射光强的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the diffracted intensity along the grating bound at the fixing end with different total intensities of the recording red light

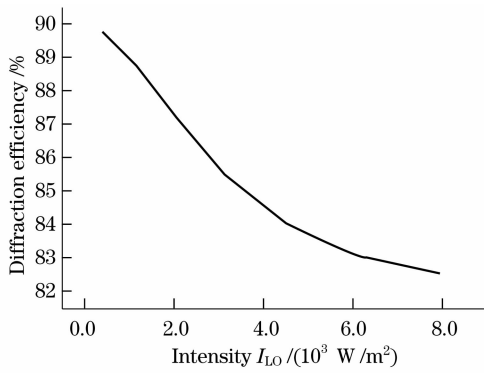


图 7 固定结束时刻衍射效率随着记录红光总光强的变化

Fig. 7 Change of the diffraction efficiency with the intensity of the total intensity of the recording red light at the fixing end

## 4 结 论

本文以双中心非挥发全息记录为基础,将带运输模型与两维耦合波理论相结合,研究紫外敏化光光强和记录红光总光强的改变对双掺杂光折变晶体  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  中局域体光栅形成和衍射特性的影响。研究发现当记录红光的总光强不变时,衍射效率随着紫外敏化光强度的增加先增大后减小,存在最佳的紫外光敏化光强,以获取最高衍射效率。当紫外敏化光光强不变时,衍射效率随着记录红光总光强的增加而逐渐降低。研究结果有助于加深对有限体积光折变体光栅例如  $90^\circ$  记录光折变体光栅等形成机制的认识,对于开展光折变局域体光栅的纵深研究以及拓展基于光折变局域体光栅的光学器件与系统的应用具有指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 R. P. Kenan. Diffraction efficiency for crossed-beam gratings away from bragg incidence [J]. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1978, **68**(10): 1440~1440
- 2 Liu Liren. Miniaturized integration of three-dimensional optical systems [J]. *World science and technology investigation and evolvement*, 2002, **24**(5): 27~32  
刘立人. 光学系统的微小化三维集成 [J]. *世界科技研究进展*, 2002, **24**(5): 27~32
- 3 Zhou Changhe, Liu Liren. Microstructure Optics [J]. *World science and technology investigation and evolvement*, 2002, **22**(5): 56~59  
周常河, 刘立人. 微结构光学 [J]. *世界科技研究与进展*, 2000, **22**(5): 56~59
- 4 Liu Qiuping, He Xingdao, Zhou Xiaochun. Correction of refractive index distribution volume hologram grating recorded linearly [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1037~1040

- 刘秋平, 何兴道, 周小春. 体全息光栅线性记录折射率分布的修正 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1037~1040
- 5 A. Y. Hamad, J. P. Wicksted. Volume grating produced by intersecting Gaussian beams in an absorbing medium; a Bragg diffraction model [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **138**: 354~364
- 6 Wang Chunhua, Liu Liren, Yan Aimin *et al.*. Diffraction properties of local volume holographic grating read by an ultrashort pulsed laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1558~1564  
王春花, 刘立人, 闫爱民 等. 超短脉冲激光光束被局域体全息光栅衍射的性质分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1558~1564
- 7 Zhou Yu, Liu Liren, Yan Aimin *et al.*. Analyses and enhancement of diffraction efficiency in  $90^\circ$  holographic recording geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 395~399  
周煜, 刘立人, 闫爱民 等.  $90^\circ$  全息记录衍射效率分析与提高 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 395~399
- 8 Zhou Yu, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Vectorial analyses and recording direction optimization in two-center holographic recording [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 230~237  
周煜, 刘立人, 刘德安 等. 双中心全息记录的矢量分析与记录方向优化 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 230~237
- 9 Chen Shouman, Shi Shunxiang, Dong Hongzhou. Evolution of gaussian beams in photorefractive crystal biased spatial modulation electric field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 166~170  
陈守满, 石顺祥, 董洪舟. 高斯光束在外加空间调制电场的衍射变晶体中的演化 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 166~170
- 10 W. Królkowski, M. Cronin-Colomb. Photorefractive wave mixing with finite beams [J]. *Optics. Commun.*, 1992, **89**: 88~98
- 11 C. W. Tarn. Gaussian-beam profile deformation via anisotropic photorefractive gratings formed by diffusive, photovoltaic, and drift mechanisms: a system transfer function approach [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(1): 229~236
- 12 Buse K, Adibi A, Psaltis D. Non-volatile holographic storage in double doped lithium niobite crystals [J]. *Nature*, 1998, **393**(18): 665~668
- 13 Wang Xin, Yan Aimin, Liu De'an *et al.*. Formation and diffraction characteristics of local volume photorefractive holographic gratings in two doped  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 361~365  
王欣, 闫爱民, 刘德安 等. 双掺杂  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  晶体局域光折变体全息形成及衍射特性研究 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 361~365
- 14 Zhifang Chai, Déan Liu, Aimin Yan *et al.*. Effect of absorption on the diffraction efficiency in  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  crystal with 90° recording geometry [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**: 711~716
- 15 Xin Wang, Aimin Yan, Liren Liu *et al.*. Effect of Recording Conditions on Crossed-beam Photorefractive Gratings in Doubly Doped  $\text{LiNbO}_3$  Crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5942~5949
- 16 Liu Youwen, Liu Liren, Li Jianlang *et al.*. Steady-state space-charge field in double doped  $\text{LiNbO}_3$  crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1631~1634  
刘有文, 刘立人, 李建郎 等. 双掺杂  $\text{LiNbO}_3$  晶体中的稳态电荷场 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1631~1634