

# LiNbO<sub>3</sub> 中光折变全息的热固定特性\*

刘 波 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

徐良瑛

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

**摘 要** 带输运模型方程和耦合波方程结合起来研究 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中体全息记录和热固定的特性。发现在一边记录一边固定时, 同时存在的离子光栅通过减小耦合增益而影响了电子光栅的写入, 且得到的固定后折射率光栅随深度的改变较小, 这与记录完固定有非常大的区别。两种热固定方法得到的折射率光栅的衍射效率大小将主要决定于入射记录光的初始光强比。该模型同时显示对于高掺杂浓度的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的热固定, 在其显影过程中, 由于导带电子有很大的弛豫率, 因而无法擦除其中的电子光栅, 这样得到的折射率光栅将只有很低的衍射效率。一系列的实验同时也证实了这一结论。

**关键词** 光折变全息, 热固定, 耦合波。

## 1 引 言

近年来光折变材料应用于光学数据存储为光学领域的一研究热点<sup>[1]</sup>。其中 LiNbO<sub>3</sub> 晶体由于其易生长和较好的光折变性能而得以广泛的研究。折射率光栅(体全息)可以通过干涉的方法而记录于光折变晶体内, 但是在读出信息的过程中同时也对记录的全息有一定的擦除。已提出了多种方法避免这种擦除而长时间地保存已记录的信息<sup>[2, 3]</sup>, 其中热固定为应用得最为广泛的一种。在热固定中, 通常有两种方法, 第一种称之为记录后热固定法, 第二种方法称之为同时记录热固定法, 两种方法得到的衍射效率差别决定于记录的体系结构。但是具有较低的初始光强调制度的记录光(这里作者设定参考光强大于信号光强, 下同此)同时记录热固定得到的折射率光栅的衍射效率将低于记录后热固定法, 两种方法得到的衍射效率的大小取决于光折变晶体的耦合增益和记录光的初始光强调制度。

对于固定过程中光折变的理论分析已有很多报道<sup>[4, 5]</sup>, 但耦合的影响都未考虑。本文首先从理论上研究考虑耦合影响时的光折变全息热固定的特性。该模型同时显示对于高掺杂浓度的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的热固定, 在其显影过程中, 由于导带电子具有很大的弛豫率, 因而无法擦除电子光栅, 这样得到的折射率光栅将只有很低的衍射效率。最后给出一系列的实验验证。

\* 国家自然科学基金(项目号 69577021)和上海应用物理中心资助课题。

收稿日期: 1997-06-26; 收到修改稿日期: 1998-05-11

## 2 理论分析

### 2.1 完整的带输运方程及耦合法方程

在研究光折变机制方面, Kukhtarev 的带输运模型<sup>[6]</sup>已被广泛地接受和认可。该模型认为晶体内的施主(受主)心在光照下被电离并释放出电子(空穴)。如果光强是调制的, 电子和电离的施主的密度分布也将是调制的。由浓度梯度引起的扩散, 外加电场导致的漂移和光生伏特电流使导带中的这些载流子移动, 从而在晶体内部形成内部电场。在本文的模型中, 热激发离子在导带中的动力学方程也被加以考虑, 完整的带输运方程如下:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{\partial N_d^+}{\partial t} + \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} [e\mu_e n_e E + \mu_e k_B T \frac{\partial n_e}{\partial x} + e s L_{ph} I (N_d - N_d^+)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_d^+}{\partial t} = (sI + \beta)(N_d - N_d^+) - \gamma_e N_d^+ n_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = - \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} (e\mu_i n_i E - \mu_i k_B T \frac{\partial n_i}{\partial x}) \quad (3)$$

$$\epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial x} = e(N_d^+ - N_a + n_i - n_{i0} - n_e) \quad (4)$$

式中  $(sI + \beta)(N_d - N_d^+)$  为载流子的产生速率,  $\gamma_e n_e N_d^+$  为载流子被俘获速率,  $s$  为光电离横截面系数,  $\beta$  为热激发载流子系数,  $\gamma_e$  为载流子被俘获系数,  $n_e$  和  $N_d^+$  分别为载流子和势阱浓度,  $N_d$  为施主密度,  $n_i$  为离子密度,  $N_a$  为电离的施主密度,  $n_{i0}$  为离子的平均浓度,  $E$  为晶体内部的总电场强度,  $\mu_e$  和  $\mu_i$  分别为电子和离子的迁移率,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数,  $\epsilon$  为晶体的有效介电常数,  $e$  为基本电子的电荷,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $L_{ph}$  为光伏特长度。

按照 Yarev 的近似<sup>[4]</sup>可得到如下的一组描述光折变效应的动力学方程

$$\partial N_{d1}^+ / \partial t = C_1 N_{d1}^+ + C_2 n_{i1} + C_3 m \quad (5)$$

$$\partial n_{i1} / \partial t = - n_{i1} (\omega + D_i K^2 + i\mu_i K E_0) - N_{d1}^+ \omega \quad (6)$$

$$E_{sc} = (ie/\epsilon K) (N_{d1}^+ + n_{i1}) \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{-\omega \gamma_e N_a - (sI + \beta)(N_d/N_a)(D_e K^2 + i\mu_e K E_0) - iK s L_{ph} I_0 \gamma_e N_a}{\gamma_e N_a + D_e K^2 + i\mu_e K E_0} \\ C_2 &= \frac{-\omega \gamma_e N_a}{\gamma_e N_a + D_e K^2 + i\mu_e K E_0} \\ C_3 &= \left[ \frac{s I_0 D_e K^2 - iK s L_{ph} I_0 \gamma_e N_a}{\gamma_e N_a + D_e K^2 + i\mu_e K E_0} \right] (N_d - N_a) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $\omega = e\mu_e n_{e0}/\epsilon = e\mu_e(sI + \beta)(N_d - N_a)/\epsilon \gamma_e N_a$  为导带中电子的介电弛豫率,  $\omega = e\mu_i n_{i0}/\epsilon$  为导带中离子的介电弛豫率,  $D_e = \mu_e k_B T/e$  和  $D_i = \mu_i k_B T/e$  分别为电子和离子的扩散系数, 其中下标 1 表示一阶傅里叶分量近似。在以下的实验中, 以 LiNbO<sub>3</sub> 晶体用于存储和热固定, 在以后的分析中, 假设外加电场为零, 即  $E_0 = 0$ 。

由于线性电光效应的作用, 晶体内部的电场  $E_{sc}$  将使得晶体内部折射率发生相应的变化而产生一折射率光栅,

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_1 \exp(i\phi) \exp(-iKx) + c.c. \quad (9)$$

$$n_1 = -n_0^3 r_{eff} |E_{sc}| / 2 \quad (10)$$

$n_1$  为折射率光栅的幅度, 正比于电场  $E_{sc}$ 。  $r_{eff}$  为有效电光系数, 决定于晶体的结构。  $\phi$  为折射率光栅相对于光强条纹的相移。

## 2.2 常温下记录

当常温下记录一光折变光栅时, 离子的空间分布可看成是均匀的, 即  $n_{i1} = 0$ 。在稳态时, 使方程(5)的左边设为零, 得到

$$N_{d1}^+ = - (C_3/C_1) m \quad (11)$$

这样

$$E_{sc} = - (ie/\epsilon\epsilon_0 K) (C_3/C_1) m \quad (12)$$

将(12)式和(10)式代入耦合波方程中得到

$$dA_1/dz = - i(\pi n_p/\lambda \cos \theta) [\exp(-i\phi)] A_2^* A_2 A_1 - \alpha A_1/2 \quad (13)$$

$$dA_2/dz = - i(\pi n_p/\lambda \cos \theta) [\exp(i\phi)] A_1^* A_1 A_2 - \alpha A_2/2 \quad (14)$$

其中  $n_p$  为等效折射率变化系数, 上面的方程组的解为

$$I_1(z) = I_1(0) \{ (1 + r^{-1}) / [1 + r^{-1} \exp(\gamma z)] \} \exp(-\alpha z) \quad (15)$$

$$I_2(z) = I_2(0) \{ (1 + r) / [1 + r \exp(-\gamma z)] \} \exp(-\alpha z) \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_p}{\lambda \cos \theta} \sin \phi =$$

$$\frac{\pi \epsilon n_0^3 r_{\text{eff}}}{\epsilon \epsilon_0 K \lambda \cos \theta} \left| \frac{(\gamma_e N_a K s L_{\text{ph}} I_0 + i s I_0 D_c K^2) (N_d - N_a)}{\omega_e \gamma_e N_a + (s I_0 + \beta) (N_d/N_a) D_c K^2 + i \gamma_e N_a K s L_{\text{ph}} I_0} \right| \sin \phi \quad (17)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{s I_0 D_c K^2}{\gamma_e N_a K s L_{\text{ph}} I_0} \right] - \arctan \left[ \frac{\gamma_e N_a K s L_{\text{ph}} I_0}{e \omega_e \gamma_e N_a + (s I_0 + \beta) (N_d/N_a) D_c K^2} \right] \quad (18)$$

$$r = I_1(0)/I_2(0) \quad (19)$$

从上面可看出, 相位漂移主要决定于晶体的光生伏特电流。对于纯净的或低掺杂浓度的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 载流子在导带中的移动主要由浓度梯度的扩散所引起, 在这种情况下,  $\phi$  接近于  $\pi/2$ , 耦合较强。相反, 对于高掺杂浓度的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 输运主要同光生伏特电流引起,  $\phi$  接近于零, 耦合减弱。注意:  $\gamma$  的符号取决于  $c$  轴的取向。(15)式、(16)式得到

$$m(z) = 2I_1(z)I_2(z)/[I_1^2(z) + I_2^2(z)] = \text{sech}[(\gamma z - \ln r)/2] \quad (20)$$

## 2.3 记录后热固定

完成上面的记录过程后, 在暗处加热晶体至一较高温度范围并保持一段时间使得离子充分中和晶体内的电子光栅。在这一过程中,  $N_{d1}^+$  被假设为保持不变。充分固定达到稳态后, 令(6)式的左边为零得到

$$n_{i1} = - [\omega/(\omega + D_i K^2)] N_{d1}^+ = \omega C_3 m(z) / [(\omega + D_i K^2) C_1] \quad (21)$$

然后冷却晶体至常温后, 用一束平面光波照射晶体以擦除晶体内部的电子光栅。这里设定擦除光波的强度等于记录时的平均光强  $I_0$ 。这样系数  $C_1$  和  $C_2$  在该过程中和记录时相同。在擦除过程中, 离子光栅对于光照是稳定的, 因此  $n_{i1}$  保持不变, 当到达稳态时, (5)式的左边为零, 于是得到

$$N_{d1}^+ = - \omega C_2 C_3 m(z) / [(\omega + D_i K^2) C_1^2] \quad (22)$$

晶体内部电场  $E_{sc}$  可表示为

$$E_{sc} = \frac{ie}{\epsilon \epsilon_0 K} \frac{\omega (C_1 - C_2) C_3 m(z)}{(\omega - D_i K^2) C_1^2} \quad (23)$$

最后可得到厚度为  $d$  的固定后的光栅的衍射效率为

$$\eta = \sin^2 \left[ \int_0^d \frac{\pi n_0^3}{\lambda \cos \theta} r_{\text{eff}} E_{sc} dz \right] \quad (24)$$

注意对于高掺杂浓度的晶体, 其导带中电子的弛豫速率  $\omega_e \gamma_e N_a$  远远高于电子的扩散项  $(sI_0 + \beta) D_e K^2 N_d / N_a$  和光生放大电流项  $K s L_{ph} I_0 \gamma_e N_a$ , 因此  $C_1$  非常接近  $C_2$ , 这样从(23) 式可看出, 电子光栅  $N_{d1}^+$  无法擦除, 从而总的电场强度很小使得最后的衍射效率几乎为零, 说明对于高掺杂的  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 其记录的全息无法被热固定。

## 2.4 同时记录热固定

在这种情况下, 当两束记录光记录信息时, 离子光栅和电子光栅同时产生并增强。在稳态时, (5) 式和(6) 式的左边均为零, 于是得到

$$n_{i1} = \frac{C_3 \omega}{(C_1 - C_2) \omega + D_i K^2 C_1} m \quad (25)$$

$$N_{d1}^+ = - \frac{(\omega + D_i K^2) C_3}{(C_1 - C_2) \omega + D_i K^2 C_1} m \quad (26)$$

$$E_{sc} = - \frac{ie}{\epsilon K} \frac{D_i K^2 C_3}{(C_1 - C_2) \omega + D_i K^2 C_1} m \quad (27)$$

从上面的推导同样得到

$$m(z) = \text{sech} \left[ \frac{\gamma z - \ln r}{2} \right] \quad (28)$$

$$\gamma = \frac{un_o r_{\text{eff}}}{\lambda \cos \theta} |E_{sc}| \sin \phi \quad (29)$$

注意: 上面方程中, 导带中离子的扩散项  $D_i K^2$  远远小于其弛豫速率  $\omega$ , 因此从(26) 式和(11) 式可看出电子光栅强度  $N_{d1}^+$  高于在常温下记录所得到的电子光栅, 但是由于离子光栅的存在而中和了该电子光栅, 最后得到的总电场强度  $E_{sc}$  很小[见(27) 式]。这样耦合增益  $\gamma$  远远小于常温下记录[见(28) 式], 于是得到的电子光栅随  $z$  方向的变化很小, 数值比较一致。其擦除显影过程同上。注意: 此时温度为  $T_r$ , 不同于记录固定时, 这里可用  $C_1^1$  和  $C_2^1$  来表示此时的参数  $C_1$  和  $C_2$ 。最后得到

$$N_{d1}^+ = - \frac{C_2^1}{C_1^1} n_{i1} = - \frac{C_2^1 C_3 \omega}{C_1^1 [(C_1 - C_2) \omega + D_i K^2 C_1]} m \quad (30)$$

$$E_{sc} = \frac{ie}{\epsilon K} \frac{(C_1^1 - C_2^1) C_3 \omega}{C_1^1 [(C_1 - C_2) \omega + D_i K^2 C_1]} \quad (31)$$

通过(24) 式可求得固定后光栅的衍射效率。

对比(31) 式和(23) 式, 可看出同时记录热固定得到的固定后电场强度最大值大于记录后固定所得到的。

## 3 在 $\text{LiNbO}_3$ 中的热固定

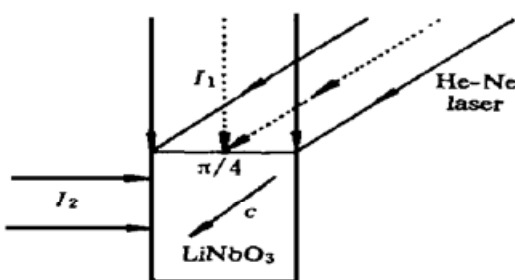


Fig. 1 Experimental setup

通过上面得到的方程数值模拟  $\text{LiNbO}_3$  中的热固定。相关的参数在表 1 中给出。注意在表 1 中, 施主浓度是相对于低掺杂的样品。设定常温为  $T_r = 300$  K, 热固定温度  $T_e = 400$  K。晶体有效电光系数决定于晶体的结构安排。对于图 1 的结构,

$$r_{\text{eff}} = 1/2(n_e^4 r_{33} - n_o^4 r_{13}) = 299 \text{ pm/V.}$$

$\text{LiNbO}_3$  晶体的  $n_o = 2.286$ ,  $n_e = 2.2$ ,  $r_{13} = 9.6 \text{ pm/}$

V,  $r_{33} = 31 \text{ pm/V}$ 。

Table 1. The used LiNbO<sub>3</sub> parameters in calculation

parameter	value	reference	parameter	value	reference
$S / (\text{m}^2/\text{W} \cdot \text{s})$	$3 \times 10^{-4}$	7	$\epsilon$	29	11
$\beta / (1/\text{s})$	0.05	7	$I_0 / (\text{W}/\text{m}^2)$	5000	
$\gamma_e / (\text{m}^3/\text{s})$	$10^{-15}$		$D_e / (\text{m}^2/\text{s}) (300\text{K})$	$2.86 \times 10^{-8}$	
$L_{\text{ph}} / \text{m}$	$5 \times 10^{-10}$		$D_e / (\text{m}^2/\text{s}) (400\text{K})$	$1.97 \times 10^{-7}$	
$N_d / (1/\text{m}^3)$	$1 \times 10^{22}$		$D_i / (\text{m}^2/\text{s})$	$1.15 \times 10^{-19}$	
$N_a / (1/\text{m}^3)$	$2 \times 10^{21}$		$\omega_e / (1/\text{s}) (300\text{K})$	4.25	
$n_{\text{io}} / (1/\text{m}^3)$	$5 \times 10^{24}$	8	$\omega_e / (1/\text{s}) (300\text{K})$	22	
$\mu_e / (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}) (300\text{K})$	$1.1 \times 10^{-6}$	9	$\omega_r / (1/\text{s})$	$1.04 \times 10^{-2}$	
$\mu_e / (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}) (400\text{K})$	$5.71 \times 10^{-6}$	9	$d / \text{mm}$	10	
$\mu_l / (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	$3.33 \times 10^{-15}$	10			

### 3.1 记录后热固定

从上面的方程求得  $D_e K^2 = 4.13 \times 10^6/\text{s}$ ,  $D_i K^2 = 1.66 \times 10^{-6}/\text{s}$ ,  $C_1 = 7.59 - i1.32 \times 10^{-3}/\text{s}$ ,  $C_2 = 0.196/\text{s}$ ,  $C_3 = 1.18 \times 10^{22} - i1.1 \times 10^{20}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ 。从  $C_1$  中看出, 光伏特电流项相对于扩散项很小, 因此  $\phi \approx \pi/2$ 。从(24) 式得到耦合增益  $\gamma = 0.54 \times 10^3/\text{m}$ 。热固定并显影后的电场分布为  $|E_{\text{sc}}(z)| = 2.58 \times 10^4 m(z) \text{ V/m}$ 。这样可给出不同初始光强比  $r$  的折射率光栅分布曲线(如图 2 所示实线)。从(23) 式得到的固定后的光栅衍射效率, 对于不同  $r$  的衍射效率如图 3 曲线 a 所示。

### 3.2 同时记录热固定

这种情况下,  $T = T_e = 400 \text{ K}$ ,  $D_e K^2 = 2.854 \times 10^6/\text{s}$ ,  $C_1 = 7.89 - i1.99 \times 10^{-3}/\text{s}$ ,  $C_2 = 0.154/\text{s}$ ,  $C_3 = 1.19 \times 10^{22} - i1.59 \times 10^{19} 1/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ 。在显影时,  $T = T_r = 300 \text{ K}$ , 这样  $C_1^1 = -7.59 - i1.32 \times 10^{-3}/\text{s}$ ,  $C_2^1 = -0.196/\text{s}$ 。同上可得到  $\gamma = 8.49/\text{m}$ ,  $|E_{\text{sc}}(z)| = 2.36 \times 10^4 m(z) \text{ V/m}$ 。不同初始光强比  $r$  的折射率光栅分布, 如图 2 的虚线所示, 对于不同  $r$  热固定后的光栅衍射效率如图 3 的曲线 b 所示。

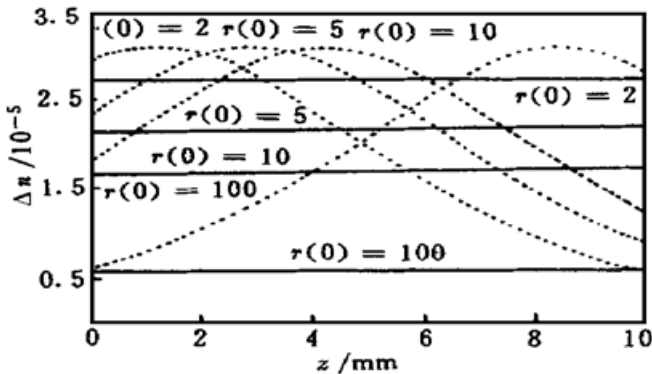


Fig. 2 Initial intensity ratio dependence envelopes of the fixed index gratings by post-fixing (solid line) and simultaneous-fixing (dash line)

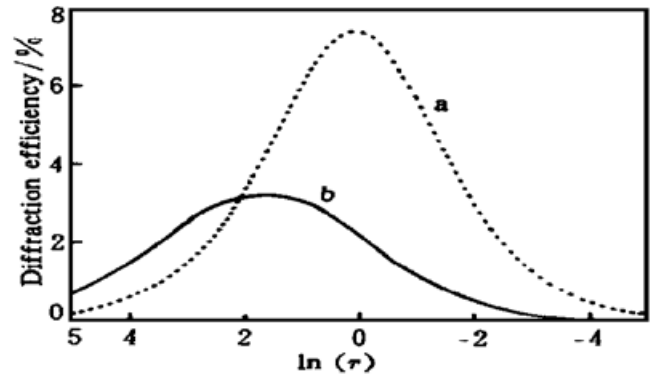


Fig. 3 Initial intensity ratio dependence diffraction efficiency of the fixed index gratings. a: post-fixing, b: simultaneous-fixing

图 2 显示出光栅强度几乎不随  $z$  发生改变, 但记录后热固定得到的光栅强度变化很大。其因为在同时记录固定时, 同时存在的离子光栅中和了电子光栅, 减小了耦合增益, 使得光强调制度几乎不随  $z$  改变。

众所周知,同时记录固定得到的固定后电场强度最大值大于记录后固定所得到的。由于耦合作用,光栅强度随 $z$ 的增大而变小,因此当具有较大初始光强调制度时,同时记录固定得到的光栅衍射效率远远高于记录后固定所得到的;当具有较小初始光强调制度( $r$ 较大)时,对于同时记录固定,沿 $z$ 方向上各点处光栅强度均保持较小值;而对于记录后固定,光栅强度随 $z$ 的增大而变大,因此对于具有较小初始光强调制度,同时记录固定得到的光栅衍射效率将反而会低于记录后固定所得到的。注意:对于 $I_1(0) < I_2(0)$ ,即能量由弱光向强光耦合时,记录后固定得到的光栅强度随 $z$ 的增大而变小,这样同时记录固定得到的光栅衍射效率将会高于记录后固定所得到的。

### 3.3 对于高掺杂浓度的样品

设定 $N_d = 10^{25}/\text{m}^3$ ,  $N_a = 2 \times 10^{24}/\text{m}^3$ 。得到 $C_1 = -4.32 - i0.0139/\text{s}$ ,  $C_2 = -4.17/\text{s}$ ,  $C_3 = 2.4 \times 10^{23} - i1.11 \times 10^{23}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 。从这些数值中,可以看出 $C_1$ 约等于 $C_2$ ,因此从(23)式和(31)式看出,固定显影后的电场很小,衍射效率接近于零。其原因是无法擦除电子光栅[见(15)式和(30)式]。

## 4 实 验

在实验中,取一块Fe的掺杂质量分数为0.0001的LiNbO<sub>3</sub>晶体作样品,其外形尺寸为3 cm × 3 cm × 1 cm。 $c$ 轴方向和前表面成45°夹角。一台波长为514 nm的Ar<sup>+</sup>激光器光波分成两束,分别从晶体两相邻表面垂直入射(见图1)。它们的偏振方向均垂直于入射面。一束波长为632.8 nm的He-Ne光作为实时探测光,其光强为2 mW。衍射光波由另一光电探测器接受。对于记录后固定,首先在常温下记录一光栅(记录足够长的时间,本文选定为2 min),

然后在炉子中加热晶体至127°C并保持25 min。冷却至常温后用一束平面光波照射晶体足够长的时间(5 min),最后用He-Ne光探测光栅的衍射效率。对于同时记录固定,在127°C下记录光栅25 min,然后同上。

在实验中,选取一组不同光强比的记录光,它们的总光强均为5000 W/m<sup>2</sup>,显影光的光强也为5000 W/m<sup>2</sup>。图4为实验结果。从图中可看出,结果和理论预测较为相似。实际上,由于热激发电子,电子光栅强度会衰减,以及参数选取有一定的偏差,最后得到的衍射效率小于理论值。

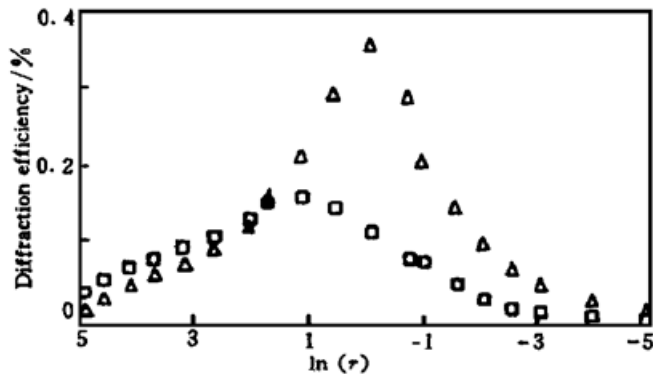


Fig. 4 Experimental results of initial intensity ratio dependence diffraction efficiency of the fixed index gratings. □: posting-fixing, △: simultaneous-fixing

**结 论** 本文结合带输运方程和耦合波方程来研究热固定的一些特性。从耦合的角度分析了两种热固定方法的差异,记录后固定和同时记录固定所得到的光栅衍射效率的大小取决于初始光强比以及晶体的耦合增益。理论显示后一种方法得到的光栅衍射效率并不总是高于前者。对于小的初始光强比的记录光,前者得到的将高于后者。同时理论还显示,由于无法的显影中擦除电子光栅,因此对于高掺杂浓度的LiNbO<sub>3</sub>晶体,固定后的衍射效率极低,这和以前的报道相同。

## 参 考 文 献

- [1] Psaltis D, Barbastathis G, Pu A. holographic memory. *Sci. Am.*, 1995, **273**(1) : 70~ 76
- [2] Amodei J J, Phillips W, Staebler D L. Improved electrooptic materials and fixing technology for holographic recording. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(2) : 390~ 396
- [3] Staebler D L, Burke W J, Phillips W *et al.*. Multiple storage and erasure of fixing holograms in Fe-doped  $\text{LiNbO}_3$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(1) : 182~ 184
- [4] Yariv A, Orlov S S, Rakuljic G A. Holographic storage dynamics in  $\text{LiNbO}_3$  and experiment. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13**(11) : 2512~ 2523
- [5] Carrassosa M, Agullo-Lopez F. Theoretical modeling of fixing and developing of holographic grating in  $\text{LiNbO}_3$ . *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(11) : 2317~ 2322
- [6] Kukhtarev N K. Kinetics of hologram recording and erasure in electrooptic crystal. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1976, **2**(2) : 438~ 440
- [7] Meyer M, Wurfel P, Munser R *et al.*. Kinetics of fixing of phase holograms in  $\text{LiNbO}_3$ . *Phys. Status Solidi (A)*, 1979, **53**(1) : 171~ 180
- [8] Muller R. Determination of H concentration in  $\text{LiNbO}_3$  by photorefractive fixing. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(34) : 3212~ 3214
- [9] Kukhtarev N V. Holographic storage in electro-optic crystals, I steady state. *Ferroelectrics*, 1979, **22**(3) : 949~ 960
- [10] Josch W, Munser R, Ruppel *et al.*. The photovoltaic effect and charge transport in  $\text{LiNbO}_3$ . *Ferroelectrics*, 1977, **21**(2) : 623~ 625
- [11] Kratzig E, Orlovski R. Light induced charge transport in doped  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{TiTaO}_3$ . *Ferroelectrics*, 1980, **27**(1) : 241~ 244

## Characters of Recording and Thermal Fixing in Lithium Niobate

Liu Bo      Liu liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Xu Liangying

(Shanghai Institute of Silicate, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

(Received 26 June 1997; revised 11 May 1998)

**Abstract** A theoretical model, in which the band transport equations and the coupled wave equations are both considered, to describe the characters of recording and thermal fixing in  $\text{LiNbO}_3$  is presented. It is found that in simultaneous-fixing, the existing ionic grating affect the writing of the electronics grating by reducing the coupling gain and the grating envelope of the fixed index grating by simultaneous fixing is quite uniform inside the photorefractive crystal with comparison to by post-fixing. The resulting diffraction efficiency of the fixed volume grating is mainly dependent on the initial intensity modulation of the two writing beams. The model also shows that fixing in a high doped material, at its developing stage, the electric grating can not be erased which resulting in low diffraction efficiency. A set of experimental demonstration are presented.

**Key words** photorefractive holography, thermal fixing, coupled wave.