

文章编号:1001-9014(2005)04-0269-04

对不同组份 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 非挥发全息存储的研究

申岩^{1,2}, 张国权^{1,2}, 付博^{1,2}, 徐庆君^{1,2}, 许京军^{1,2}

(1. 南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300071; 2. 南开大学泰达学院应用物理学院, 天津 300457)

摘要:以双中心模型为基础,研究了同成份和近化学比掺铁铌酸锂晶体在稳态情况下的非挥发双色二步全息存储性能.通过比较在相同记录条件下同成份(锂的摩尔浓度为48.5%)与近化学比(锂的摩尔浓度为49.5%)掺铁铌酸锂的总空间电荷场的大小可以看到,在连续光所能达到的光强范围内,近化学比 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 的总空间电荷场明显大于同成份 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 的总空间电荷场.但是在高光强下,同成份与近化学比 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 都可以达到 10^6 V/m 量级的光致空间电荷场.

关键词: $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$; 全息存储; 空间电荷场

中图分类号: TB39; O484 **文献标识码:** A

STUDIES ON NONVOLATILE HOLOGRAPHIC RECORDING FOR $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ WITH DIFFERENT STOICHIOMETRY

SHEN Yan^{1,2}, ZHANG Guo-Quan^{1,2}, FU Bo^{1,2}, XU Qing-Jun^{1,2}

(1. Photonics Center, College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. TEDA Applied Physics School, Nankai University, Tianjin 300457, China)

Abstract: The steady-state nonvolatile two-step, two-color holographic recording performance for both the congruent and the near-stoichiometric $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ was studied theoretically based on the two-center model. It is shown that the nonvolatile two-step, two-color holography performance in the near-stoichiometric $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ is much better than that in the congruent $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ within the intensity range reachable by the continuous-wave lights. In addition, it is shown that a light-induced space charge field of the order of 10^6 V/m is achievable in both the near-stoichiometric and the congruent $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ with high intensities.

Key words: $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$; holographic recording; space charge field

引言

近年来,铌酸钾晶体的理论和实验研究引起了学者的广泛关注^[1,2],其中用光折变材料实现非挥发双色二步全息存储已被广为研究^[3-7].早期的研究工作是用高强度激光脉冲研究同成份 LiNbO_3 和 LiTaO_3 的非挥发双色二步全息存储性能^[8,9]. Bai 等人^[3]用低光强连续光证明了在非挥发双色二步全息存储中在 LiNbO_3 晶体里有着浅能级中心.该浅能级中心是由于从 Fe^{2+} 中心和/或偶极子 $\text{Nb}_L^{4+} \text{Nb}_B^{4+}$ 中心激发的电子被本征缺陷 Nb_L^{5+} 所俘获从而形成小极化子 Nb_L^{4+} ^[4,5]. Berben 等人^[10]通过研究小极化子的暗衰减

证实了在深能级 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 与浅能级 $\text{Nb}_L^{4+}/\text{Nb}_L^{5+}$ 之间确实存在直接电子交换过程.事实上, Jermann 和 Otten^[11]曾利用一种双中心模型来解释在高光强下光致折射率与光强的变化之间的关系,在模型中提到了在深浅能级之间电子的直接交换所引起的隧穿效应.

本文中,我们以双中心模型为基础,从理论上研究了稳态低光强连续光条件下晶体不同组份对双色二步全息存储性能所产生的影响.并证实了近化学比 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 的双色二步非挥发全息存储性能远优于同成份 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$.

1 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体的电子输运过程

依据带输运模型,描述 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 双色二步全

收稿日期:2004-09-03,修回日期:2005-01-06

Received date: 2004-09-03, revised date: 2005-01-06

基金项目:教育部优秀青年教师资助计划项目(2002-350),教育部留学回国人员启动基金(2003-406),教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(704012),“863”计划项目(2001AA313030)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助

作者简介:申岩(1978-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要从事光折变效应的理论研究.

息存储的电子输运过程的速率方程, 电流连续性方程和泊松方程可表示如下:

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (S_{UD}I_U + \beta_D + S_{DS}I_U N_S^+)(N_D - N_D^+) - \gamma_D N_D^+ n_e - \gamma_{DS} N_D^+ (N_S - N_S^+), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_S^+}{\partial t} = (S_{US}I_U + S_{RS}I_R + \beta_S + \gamma_{DS} N_D^+)(N_S - N_S^+) - \gamma_S N_S^+ n_e - S_{DS} I_U N_S^+ (N_D - N_D^+), \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (S_{UD}I_U + \beta_D)(N_D - N_D^+) - \gamma_D N_D^+ n_e + (S_{US}I_U + S_{RS}I_R + \beta_S)(N_S - N_S^+) - \gamma_S N_S^+ n_e + \frac{1}{e} \nabla \cdot J, \quad (3)$$

$$J = e\mu n_e E + k_B T \mu \nabla n_e + G_{UD} S_{UD} (N_D - N_D^+) I_U + G_{RS} S_{RS} (N_S - N_S^+) I_R + G_{US} S_{US} (N_S - N_S^+) I_U, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} (N_D^+ + N_S^+ - n_e - N_A). \quad (5)$$

这里, N_D , N_S 和 N_A 分别表示 Fe 和 Nb_{Li} 的总的数密度及保持晶体在暗条件下电中性的不动的补偿电荷. N_D^+ , N_S^+ 和 n_e 分别表示 Fe^{3+} , Nb_{Li}^{5+} 和导带电子的数密度. S_{UD} 和 S_{US} 是在泵浦光作用下的吸收截面, 与电子从 Fe^{2+} 和 Nb_{Li}^{4+} 中心被激发到导带有关. S_{RS} 是在记录光作用下的吸收截面, 与电子从 Nb_{Li}^{4+} 中心被激发到导带有关. β_S 和 β_D 是电子从 Nb_{Li}^{4+} 和 Fe^{2+} 中心被激发到导带的热激发速率. γ_S 和 γ_D 分别是电子从导带到 Nb_{Li}^{5+} 和 Fe^{3+} 中心的俘获系数. S_{DS} 和 γ_{DS} 是电子在 Fe^{2+}/Fe^{3+} 和 $Nb_{Li}^{4+}/Nb_{Li}^{5+}$ 之间直接进行交换过程中的在泵浦光激发下的吸收截面和电子俘获系数. μ , k_B , T , E , J 和 ϵ 是迁移率、玻尔兹曼系数、晶体的绝对温度、电场、电流及相对介电常数. G_{RS} 和 G_{US} 分别是 Nb_{Li}^{4+} 在记录光波段和泵浦光波段的 Glass 系数, G_{UD} 是 Fe^{2+} 在泵浦光波段的 Glass 系数. I_R 和 I_U 是记录光和泵浦光光强. 我们用 532nm 和 1064nm 的激光作为泵浦光和记录光, 选用参数值与 Adibi 等人^[7] 一致, 数据如表 1 所列.

在非挥发双色二步全息存储过程中, 是用一束均匀的泵浦光和一束调制度为 m 的正弦调制记录光辐照晶体, 对于很小的光调制度 ($m \ll 1$), N_D^+ , N_S^+ , n_e 和 E 经过线性化处理, 用下标“0”和“1”分别表示 $\exp(iqx)$ 的零阶项和一阶项. 由此, 即可得到描述零阶项和一阶项的两套方程组. 在稳态情况下这两套方程组能够得到解析解. 由于在能达到的连续光强度范围内 n_{e1} 比 N_{D1}^+ 和 N_{S1}^+ 小得多, 因此, 忽

表 1 同成份和近化学比 $LiNbO_3:Fe$ 实现双色二步全息存储所涉及到的全部参量的单位, 意义和取值

Table 1 Units, meanings, and values of all quantities involved in the two-step, two-color holographic recording in the congruent and the near-stoichiometric $LiNbO_3:Fe$

同成份晶体中与 Fe 有关材料参数						
量 (单位)	$N_D(m^{-3})$	$N_D^+(m^{-3})$	$S_{UD}(m^2/J)$	$\gamma_D(m^3/V)$	$G_{UD}(mJ/V)$	
数值	1.2×10^{25}	-	1.0×10^{-5}	1.66×10^{-14}	-3.5×10^{-28}	
文献	-	-	[11]	[11]	[11]	
同成份晶体中与 Nb_{Li} 有关材料参数						
量 (单位)	$N_S(m^{-3})$	$N_S^+(m^{-3})$	$S_{US}(m^2/J)$	$S_{RS}(m^2/J)$	$G_{US}(mJ/V)$	$G_{RS}(mJ/V)$
数值	1.0×10^{26}	-	5.0×10^{-5}	5.4×10^{-5}	-4.24×10^{-28}	-5.9×10^{-28}
文献	[11]	-	[11]	[7]	[11]	[7]
同成份晶体中与 Fe 和 Nb_{Li} 有关材料参数及其它参数						
量 (单位)	$S_{DS}(m^2/J)$	$\gamma_{DS}(m^3/V)$	$\mu(m^2/Vs)$	ϵ	m	$q(m^{-1})$
数值	3.22×10^{-30}	1.14×10^{-21}	7.5×10^{-5}	28	0.1	2.9×10^6
文献	[11]	[11]	[11]	[11]	-	-
近化学比晶体中与同成份晶体不一样的材料参数						
量 (单位)	$N_A^+(m^{-3})$	$S_{DS}^*(m^2/J)$	$\gamma_{DS}^*(m^3/s)$	$N_A^*(m^{-3})$		
数值	2.04×10^{25}	2.17×10^{-30}	1.14×10^{-24}	3.12×10^{25}		
文献	-	-	-	-		

略了导带电子对总空间电荷场的影响.

以上述理论为基础, 通过变化连续光光强, 数值计算了 $LiNbO_3:Fe$ 晶体中的浅能级空间电荷场 $E_{S1} = -ieN_{S1}^+/(q\epsilon\epsilon_0)$, 深能级空间电荷场 $E_{D1} = -ieN_{D1}^+/(q\epsilon\epsilon_0)$ 和总的空间电荷场 $E_1 = E_{D1} + E_{S1}$. 需要指出的是, 由于在 $LiNbO_3:Fe$ 双色二步全息存储中没有外加电场, 所以 E_0 设为零. 通过数值计算可知, 在稳态情况下如果 γ_S 的值比 γ_D 的值小得多, 那么它对空间电荷场的影响就可忽略不计. N_D^+ 的值在暗条件下是由晶体的氧化还原状态决定的, 这里设为 $0.9N_D$, 基本上与事实相一致. 我们还假定缺陷 Nb_{Li} 在暗状态下被电离, 晶体的暗电导忽略不计, 因此为了保持晶体在暗条件下的电中性, 设定 $N_A = N_D^+ + N_S$. 此外, 热激发速率可忽略不计. 由于篇幅的关系, 这里就不给出详细的总空间电荷场的解析式.

2 不同组份 $LiNbO_3:Fe$ 非挥发双色二步全息存储性能

Berben 等人^[10] 提出在暗条件下小极化子的寿命是由电子直接从 Nb_{Li}^{4+} 离子被 Fe^{3+} 离子俘获所决定的, 并且这个俘获速率主要受 Nb_{Li}^{4+} 中心与 Fe^{3+} 中心之间的距离影响. 对于双中心模型, 参数 γ_{DS} 描述

的就是电子直接从 Nb_{Li}⁴⁺ 中心被 Fe³⁺ 中心俘获,在一定 Fe³⁺ 浓度下,γ_{DS}主要由 Nb_{Li}⁴⁺ 中心的浓度决定.我们知道, LiNbO₃ 晶体的 Nb_{Li}⁵⁺ 浓度依赖于晶体组份^[12],所以,γ_{DS}的大小是与晶体组份有关的.

依据锂空位模型^[12], LiNbO₃ 晶体的化学式为 [Li_{1-5x}Nb_x□_{4x}]NbO₃. 如果用摩尔比 $y = [\text{Li}] / ([\text{Li}] + [\text{Nb}])$ 来描述晶体组份,那么越大的 y 表示晶体组份越趋近于化学比.同成份 LiNbO₃ 的摩尔比 y_c 为 48.5%,晶体中 Nb_{Li}⁵⁺ 的浓度和 x_c 的值分别是 $1.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 和 9.8×10^{-3} ^[11,12]. 由锂空位模型,用表达式 $N_s = (1 - 2y) \times 1.0 \times 10^{26} / (5x_c)$ 可以得到不同晶体组份 y 的 Nb_{Li}⁵⁺ 中心的浓度.下面通过对小极化子 Nb_{Li}⁴⁺ 和双色二步全息存储灵敏度的估算来粗略估计近化学比 LiNbO₃:Fe 晶体中的参数 γ_{DS}^{*} 和 S_{DS}^{*} 的值.(下面用带有符号“*”的参数来表示近化学比 LiNbO₃:Fe 晶体中的参数,以示与同成份的参数相区分).按照 Berben 等人^[10]的结论,光致 Nb_{Li}⁴⁺ 中心的暗衰减主要是由电子由 Nb_{Li}⁴⁺ 中心到 Fe³⁺ 中心的直接俘获所决定的.因此, Nb_{Li}⁴⁺ 中心的暗衰减动力学可描述为

$$\frac{\partial(N_s - N_s^*)}{\partial t} = -\gamma_{DS} N_D^+ (N_s - N_s^*). \quad (6)$$

可以看到,在暗衰减过程中 N_D^+ 和 $(N_s - N_s^*)$ 都有所改变,俘获系数 γ_{DS} 也是有所改变的.因为双色二步全息存储中 γ_{DS} 取的是稳态值,所以在计算中也用它的稳态值.γ_{DS} 的值与小极化子的暗衰减时间常数 τ 密切相关,τ 与 γ_{DS} N_{DS}⁺ 成反比例,这里 N_{DS}⁺ 是稳态 Fe³⁺ 中心的浓度.假定晶体在暗条件下,近化学比和同成份 LiNbO₃:Fe 晶体里 Fe³⁺ 中心的浓度是相同的.在这种情况下,稳态下近化学比和同成份 LiNbO₃:Fe 晶体里的 Fe³⁺ 中心的浓度在我们计算中用到的记录光和泵浦光强度范围内是基本相同的.实验结果证实小极化子 Nb_{Li}⁴⁺ 在近化学比 LiNbO₃:Fe 里的暗衰减时间常数(从 ms 到 s)比在同成份中(从 μs 到 ms)大得多^[4,5,10].所以有理由设近化学比 LiNbO₃:Fe 的 γ_{DS}^{*} 值为 $1.14 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$,这符合近化学比的 τ 比同成份的大 3 个量级的事实.

双色二步全息存储灵敏度 S 定义为 $(\partial t \sqrt{\eta} / \partial I)$ _{I=0} / (I_RL),它与稳态时 LiNbO₃:Fe 中 Nb_{Li}⁴⁺ 中心的浓度成正比^[3-5],其中 η 是衍射效率, L 是晶体厚度.我们知道在连续光范围内近化学比 LiNbO₃:Fe 晶体的灵敏度 S^{*} 比同成份的大 2 个量级多^[4,5].再

由式(1)和式(2),得到

$$\begin{aligned} \frac{S^*}{S} &= \frac{N_s^* - N_{s0}^*}{N_s - N_{s0}} \\ &= \frac{[\gamma_s^* N_{s0}^* (S_{UD}^* I_{U0} + S_{DS}^* N_{s0}^* I_{U0}) + \gamma_D^* N_{D0}^* S_{DS}^* N_{s0}^* I_{U0}] (N_D^* - N_{D0}^*)}{[\gamma_D^* (S_{US}^* I_{U0} + S_{RS}^* I_{R0} + \gamma_{DS}^* N_{D0}^*) + \gamma_{DS}^* N_{D0}^*] N_{D0}^*} \\ &\quad \times \frac{[\gamma_D (S_{US} I_{U0} + S_{RS} I_{R0} + \gamma_{DS} N_{D0}^*) + \gamma_s N_{s0}^* \gamma_{DS}] N_{D0}^*}{[\gamma_s N_{s0}^* (S_{UD} I_{U0} + S_{DS} N_{s0}^* I_{U0}) + \gamma_D N_{D0}^* S_{DS} I_{U0}] (N_D - N_{D0}^*)} \end{aligned} \quad (7)$$

对于摩尔比 y_s^* 为 49.5% 的近化学比 LiNbO₃:Fe 晶体,得到 N_s^* (总的 Nb_{Li} 浓度) 的值为 $2.04 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$. 假定近化学比晶体除了 N_A^* , γ_{DS}^{*}, S_{DS}^{*}, N_S^{*} 和 N_S⁺ 这 5 个参数以外其他的参数值都与同成份晶体的相应参数数值一样,并且保持记录灵敏度比例 S^{*}/S 为 100,由此我们得到在记录光和泵浦光光强分别是 $I_{R0} = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 和 $I_{U0} = 1.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 条件下的 S_{DS}^{*} 值.在计算的过程中,近化学比晶体里 N_{s0}⁺ 和 N_{D0}⁺ 近似等于 N_S^{*} 和 N_D⁺ = 0.9 N_D^{*},所以 N_A^{*} 等于 N_S^{*} + N_D⁺.

在图 1 中比较组份为 49.5% 的近化学比和同成份 LiNbO₃:Fe 晶体的双色二步全息存储性能.其中近化学比和同成份 LiNbO₃:Fe 晶体分别用实线与虚线表示.图 1(a) 描述的是当 I_R 为 $5.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 条件下, |E₁| 随 I_U 的变化而变化的情况.可以看到,近化学比和同成份晶体的 |E₁| 开始时都保持不变,而当 I_U 分别大于 $1.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 和 10^6 W/m^2 时,近化学比和同成份晶体的 |E₁| 分别开始迅速下降.这是由于由泵浦光的增强导致的空间电荷场内部两个相互竞争作用机制所造成的:泵浦光光强的增加导致了小极化子浓度的增长,因此 |E_{S1}|, |E_{D1}| 和 |E₁| 随之增加.另一方面,泵浦光又部分地抹除了 Fe²⁺/Fe³⁺ 能级和 Nb_{Li}⁴⁺/Nb_{Li}⁵⁺ 能级上的光栅,这种抹除效应在高光强条件下变得尤为明显.此外,我们还看到近化学比 LiNbO₃:Fe 晶体中的 |E₁| 明显地比同成份的大出很多,这与实验中报道的结果相一致^[4,5].图 1(b) 表示的是当把泵浦光光强固定在 $1.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, |E₁| 随 I_R 是如何变化的.从图中可以看到近化学比和同成份晶体的 |E₁| 的最大值基本是一样的,而在近化学比晶体中 |E₁| 的最大值相对应的记录光强比同成份中相应的记录光强小很多.从全息数据存储应用的角度来看,在低光强连续光范围内,近化学比晶体比同成份晶体有着更好的全息存储性能.这个结论被图 1(c) 进一步证实,在图 1(c) 中我们把 I_R/I_U 的比例定为 5,然后观察 |E₁| 随 I_R

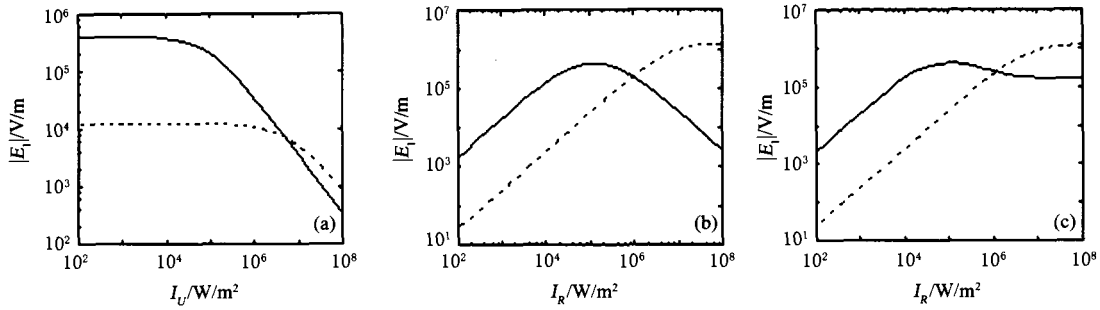


图1 近化学比和同成份 LiNbO₃:Fe 晶体的双色二步全息存储性能的比较 (a)图描述的是当 I_R 为 5.0 × 10⁴ W/m² 条件下, |E₁| 随 I_U 的变化情况 (b)图是当 I_U 为 1.0 × 10⁴ W/m², |E₁| 随 I_R 的变化情况 (c)图是把 I_R/I_U 的比例定为 5, |E₁| 随 I_R 的变化情况

Fig.1 Comparison of the two-step, two-color holography performance between the near-stoichiometric and the congruent LiNbO₃:Fe. The curves in (a) describe the dependence of |E₁| on I_U with I_R = 5.0 × 10⁴ W/m², the curves in (b) are the I_R-dependence of |E₁| with I_U set to be 1.0 × 10⁴ W/m², and those in (c) are the results for the case with a fixed intensity ratio I_R/I_U of 5

的变化. 我们知道, |E₁| 几乎与在稳态情况下小极化子的浓度成正比^[3,5]. 产生上面结果的本质原因是, 近化学比晶体中从 Nb_{Li}⁴⁺ 中心到 Fe³⁺ 中心的直接电子俘获速率比同成份的小得多, 而近化学比晶体由泵浦光产生的从 Fe²⁺ 中心直接到 Nb_{Li}⁵⁺ 中心的光激发速率几乎与同成份的是一样的. 因此, 近化学比晶体的光致小极化子的浓度达到最大值时的泵浦光和记录光光强与同成份相比小得多.

3 结语

我们理论上研究了近化学比和同成份的 LiNbO₃:Fe 晶体的双色二步全息存储性能. 从在相同记录条件下同成份 (锂的摩尔浓度为 48.5%) 与近化学比 (锂的摩尔浓度为 49.5%) 掺铁铌酸锂的总空间电荷场的大小相比可以看到, 在连续光所能达到的光强范围内, 近化学比 LiNbO₃:Fe 的总空间电荷场明显大于同成份 LiNbO₃:Fe 的总空间电荷场.

REFERENCES

[1] CHEN Yun-Lin, LUO Yong-Feng, GUO Juan, *et al.* Theoretical research of quasi-phase-matched all-optical wavelength conversion in LiNbO₃ waveguides [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈云琳, 罗勇锋, 郭娟, 等. 准相位匹配 LiNbO₃ 波导全光波长变换的理论研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5): 367—370.
 [2] YAO Jiang-Hong, CHEN Ya-Hui, DENG Hao-Liang, *et al.* Study on periodical polarization characteristics of near-stoi-

chiometric MgO-doped LiNbO₃ crystal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姚江宏, 陈亚辉, 邓浩亮, 等. 近化学计量掺镁铌酸锂晶体周期极化特性研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(1): 35—39.
 [3] Bai Y S, Kachru R. Nonvolatile holographic storage with two-step recording in lithium niobate using cw Lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(15): 2944—2947.
 [4] Hesselink L, Orlov S S, Liu A, *et al.* Photorefractive materials for nonvolatile volume holographic data storage [J]. *Science*, 1998, **282**(6): 1089—1094.
 [5] Guenther H, Macfarlane R, Furukawa Y, *et al.* Two-color holography in reduced near-stoichiometric lithium niobate [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(32): 7611—7623.
 [6] Zhang G, Tomita Y, Xu W, *et al.* Nonvolatile two-color holography in indium-doped lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(22): 3508—3510.
 [7] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Theoretical analysis of two-step holographic recording with high-intensity pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **63**: 023813-1—023813-17.
 [8] Linde D von der, Glass A M, Rodgers K F. Multiphoton photorefractive processes for optical storage in LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(3): 155—157.
 [9] Vormann H, Kratzig E. Two step excitation in LiTaO₃:Fe for optical data storage [J]. *Solid Stat. Commun.*, 1984, **49**: 843—847.
 [10] Berben D, Buse K, Wevering S. *et al.* Lifetime of small polarons in iron-doped lithium niobate crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(3): 1034—1041.
 [11] Jermann F, Otten J. Light-induced charge transport in LiNbO₃:Fe at high light intensities [J]. *J. Opt. Soc. Am B*, 1993, **10**(11): 2085—2092.
 [12] Iyi N, Kitamura K, Izumi F, *et al.* Comparative study of defect structures in lithium niobate with different compositions [J]. *J. Sol. Stat. Chem.*, 1992, **101**(2): 340—352.