

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0094 - 04

# LiNbO<sub>3</sub>:Fe 和 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体非挥发全息存储的理论研究

申 岩<sup>1,2,3</sup>, 孙秀冬<sup>2</sup>, 贾宝申<sup>4</sup>, 赵业权<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 基础与交叉科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2 哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150006;

3 南开大学 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457;

4 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**以双中心模型为基础,理论研究了连续光条件下近化学比 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 和 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体在稳态情况下的非挥发双色二步全息存储性能.通过考虑在深、浅能级中心之间所有可能的电子交换过程,从理论上证实了在低光强范围内 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体比 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体有着更大的空间电荷场、更高的记录灵敏度和动态范围.

**关键词:**非线性光学;全息存储;空间电荷场

**中图分类号:**O438.1 **文献标识码:**A

## THEORETICAL STUDY OF NONVOLATILE HOLOGRAPHIC STORAGE FOR LiNbO<sub>3</sub>:Fe AND LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn

SHEN Yan<sup>1,2,3</sup>, SUN Xiu-Dong<sup>2</sup>, JIA Bao-Shen<sup>4</sup>, ZHAO Ye-Quan<sup>4</sup>

(1. The Academy of Fundamental and Interdisciplinary Sciences, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2 Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China;

3 The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China;

4. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The steady-state nonvolatile two-step, two-color holographic storage performance for both LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn and LiNbO<sub>3</sub>:Fe was investigated theoretically based on the two-center model. By considering all the possible electron transfer processes between the deep-trap and the shallow-trap centers, LiNbO<sub>3</sub>:Fe was confirmed theoretically to be of bigger space-charge field, higher recording sensitivity, and larger dynamic range than LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn in the low intensity region.

**Key words:** nonlinear optics; holographic storage; space charge field

### 引言

光折变材料在实现全息数据存储方面有着高存储密度、快速数据传输等优越性能.近年来,用这种材料实现非挥发双色二步全息存储已经被广为研究<sup>[1-7]</sup>. Bai 等人<sup>[1]</sup>用低光强连续光证明了在非挥发全息存储中 LiNbO<sub>3</sub> 晶体里有中间能级. Adibi 等人在用双中心模型研究 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体非挥发全息存储性能的基础之上又利用此模型研究了 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体全息存储性能<sup>[2]</sup>.

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 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体和近化学比 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体的非挥发全息存储性能.结果表明,低光强条件下, LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体有比 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体更大的空间电荷场、更高的记录灵敏度和更大的动态范围.

### 1 理论分析

在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn 晶体中, Mn<sup>2+</sup>/Mn<sup>3+</sup> 离子和 Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> 离子中心在双中心模型中分别作为深能

收稿日期: 2009 - 03 - 03, 修回日期: 2009 - 10 - 14

Received date: 2009 - 03 - 03, revised date: 2009 - 10 - 14

基金项目: 国家自然科学基金 (60308005, 60108001, 10334010); 黑龙江省博士后科研启动基金; 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划; 哈尔滨工业大学科研创新基金和南开大学弱光非线性光子学教育部重点实验室基金资助项目

作者简介: 申 岩 (1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 讲师, 博士, 主要从事光折变理论方面的研究

级和浅能级中心.而在LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中,作为深浅能级中心的分别为Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>和Nb<sub>Li</sub><sup>4+</sup>/Nb<sub>Li</sub><sup>5+</sup>.下列方程描述在晶体中全息存储的电子输运过程:

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (S_{UD} I_U + D + S_{DS} I_U N_S^+) (N_D - N_D^+) - D N_D^+ n_e - D_S N_D^+ (N_S - N_S^+) \quad (1)$$

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

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

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

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

存储过程中,用一束均匀的泵浦光和一束空间调制度为  $m$  的正弦调制记录光辐照晶体,

$$I_U = I_{U0} \quad (6)$$

$$I_R = I_{R0} (1 + m \operatorname{Re}(\exp(iqx))) \quad (7)$$

其中,  $q=2/\Lambda$ ,  $\Lambda$  是光栅间距.下角标“0”和“1”分别表示它的零阶项和  $\exp(iqx)$  的一阶项.把各物理量带入方程式(1)~(5)中,得到零阶项和一阶项的两套方程组.稳态情况下,一阶项的量  $N_{D1}^+$  和  $N_{S1}^+$  能够得到.因此可知晶体总空间电荷场的解析表达式为  $E_1 = E_{D1} + E_{S1}$ <sup>[4]</sup>.

## 2 空间电荷场的比较

比较发现,LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体中表征泵浦光在深能级上的激发能力参数  $G_{UD} S_{UD}$  和浅能级上俘获导带电子能力参数  $S$  值均比近化学比LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中相应参数的值大一个量级左右<sup>[2,3]</sup>,因此有理由设定LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体中参数  $S_{DS}$  值比近化学比LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中相应参数值大一个量级,为  $S_{DS} = 3.22 \times 10^{-29} \text{ m}^5/\text{J}$ .同样,由于LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体中表征深能级上俘获导带电子能力参数  $D$  与近化学比LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体相同参数值相比大15倍<sup>[2,3]</sup>,因此假定LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体中表征深能级上俘获浅能级电子能力参数  $D_S$  值也相应增大15倍,为  $D_S = 1.7 \times 10^{-20} \text{ m}^3/\text{s}$ .

图1为LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn(实线)和近化学比LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体(虚线)的空间电荷场.图1(a)是当  $I_U$

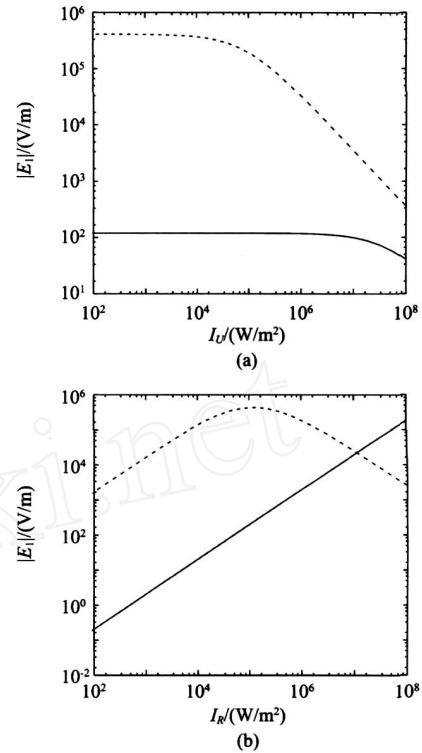


图1 近化学比LNbO<sub>3</sub>:Fe(虚线)和LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn(实线)的空间电荷场在各种实验条件下的情况

Fig 1 The space charge fields at various experimental conditions for the near-stoichiometric LNbO<sub>3</sub>:Fe (dashed curves) and the LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn (solid curves)

为  $5.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  条件下,  $|E_1|$  随  $I_U$  的变化情况. 可以看到,LNbO<sub>3</sub>:Fe和LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体的空间电荷场  $|E_1|$  在较低  $I_U$  条件下基本保持不变,但当  $I_U$  高于  $1.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  和  $10^6 \text{ W/m}^2$  时,LNbO<sub>3</sub>:Fe和LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体的空间电荷场  $|E_1|$  分别开始减小. 这是由  $I_U$  在全息存储中的两个相反效果造成的:  $I_U$  的增加导致晶体浅能级上离子浓度增长,因此  $|E_1|$  随之增加. 另一方面,  $I_U$  部分抹除了深浅能级上的光栅.图1(b)是当  $I_U = 1.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  时这两种晶体的空间电荷场  $|E_1|$  随  $I_R$  的变化情况. LNbO<sub>3</sub>:Fe:Mn晶体的  $|E_1|$  随  $I_R$  增强线性增加,而LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体的  $|E_1|$  在低  $I_R$  下先线性增加,在  $|E_1|$  达到饱和之后随着  $I_R$  进一步增强而线性下降. 这是因为对于LNbO<sub>3</sub>:Fe晶体,记录光在低光强下小极化子上的光激发速率与浅能级上它的暗衰减速率相比可忽略不计,而在高光强下它又变成了一个重要因素.

## 3 灵敏度

由式(1)~(7)可得到由一阶项组成的光致空间电荷场  $E_1$  微分方程,用  $iq_0 E_1/e$  来代替  $N_{D1}^+$ ,并

忽略含  $N_{s1}^+$ 项, 在没有外加电场情况下, 此方程在条件  $E_1(t=0) = 0$  下可以得到解析解:

$$E_1 = - \frac{m E_{phs}}{1 - i \frac{E_{phD}}{E_{qD}}} \left\{ 1 - \exp \left[ \left( \frac{E_{phD}}{E_{qD}} - i \right) \frac{t}{\tau} \right] \right\}, \quad (8)$$

这里  $E_{phs} = G_{RS} S_{RS} I_{R0} (N_s - N_{s0}^+) / \epsilon_0$  和  $E_{phD} = G_{UD} S_{UD} I_{U0} (N_D - N_{D0}^+) / \epsilon_0$  是光伏电场. 前者是由浅能级上电子被记录光激发所形成, 后者由深能级电子被泵浦光激发所形成.  $E_{qD} = e(N_D - N_{D0}^+) / q \epsilon_0$  是深能级的极限空间电荷场,  $\tau = \epsilon_0 / \sigma_0$  是光栅建立时间常数,  $\sigma_0 = (\sigma_d + \sigma_{ph})$  是晶体电导率, 其中  $\sigma_d$  和  $\sigma_{ph}$  分别是暗电导和光电导. 因为  $\sigma_d \ll \sigma_{ph}$ , 这里  $\sigma_0$  近似为  $\sigma_{ph}$ . 在  $E_{phD} \ll E_{qD}$  条件下,  $E_1$  表示为:

$$E_1 = - m E_{phs} [1 - \exp(-t/\tau)].$$

全息存储灵敏度  $S$  定义为  $(\partial \sqrt{d} / \partial t) |_{t=0} / (I_{R0} d)$ , 折射率光栅的衍射效率可写为  $(\Delta n / \cos \theta)^2$ , 因此可写为:

$$S = \frac{1}{2} n^3 r_{eff} m \frac{G_{RS} S_{RS} / (N_s - N_{s0}^+)}{\sigma_0 \cos \theta}. \quad (9)$$

可以看到灵敏度  $S$  正比于  $Fe^{2+}$  的数密度, 这个数密度可从方程 (1) ~ (5) 中得到并表示为:

$$N_s - N_{s0}^+ = \frac{[s(S_{UD} I_{U0} + S_{DS} I_{U0} N_{s0}^+) + D N_{D0}^+ S_{DS} I_{U0}] N_{s0}^+ (N_D - N_{D0}^+)}{[s N_{s0}^+ S_{DS} + D(S_{US} I_{U0} + S_{RS} I_{R0} + D S_{D0}^+) N_{D0}^+]}. \quad (10)$$

图 2 是近化学比  $LNbO_3: Fe$  (虚线) 和  $LNbO_3: Fe: Mn$  (实线) 晶体的灵敏度在不同实验条件下的变化情况. 图 2(a) 表示当记录光强度固定在  $5 \times 10^4 W/m^2$  时, 在较低  $I_U$  时, 两种晶体的灵敏度随着  $I_U$  增强而线性增长. 当  $I_U$  大于  $10^5 W/m^2$  时,  $LNbO_3: Fe$  晶体的灵敏度逐渐趋于饱和. 当  $I_U$  较低时,  $LNbO_3: Fe$  晶体的灵敏度比  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体的高近 4 个量级. 这是由于这两种晶体的所有参数值除浅能级上电子的暗衰减速率外,  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体的其余参数均比近化学比  $LNbO_3: Fe$  晶体的相应参数大一个量级左右, 而  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体中浅能级上电子的暗衰减速率参数比  $LNbO_3: Fe$  晶体的大四个量级左右, 这个参数位于式 (10) 分母中, 这就是  $LNbO_3: Fe$  晶体的灵敏度值比  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体的值大的原因. 图 2(b) 为当  $I_U$  固定在  $10^4 W/m^2$  时, 灵敏度随  $I_R$  的变化情况. 从图中可看到,  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体的灵敏度在  $10^{-6} cm/J$  量级基本不变, 而  $LNbO_3: Fe$  晶体灵敏度值在低记录光强下也基本维持不变, 但随着  $I_R$  增强, 灵敏度开始线性下降. 这是由于晶体在低记录光强下, 浅能级  $Nb_{Li}^{4+}$  上的光激发速率与浅能级  $Nb_{Li}^{4+}$

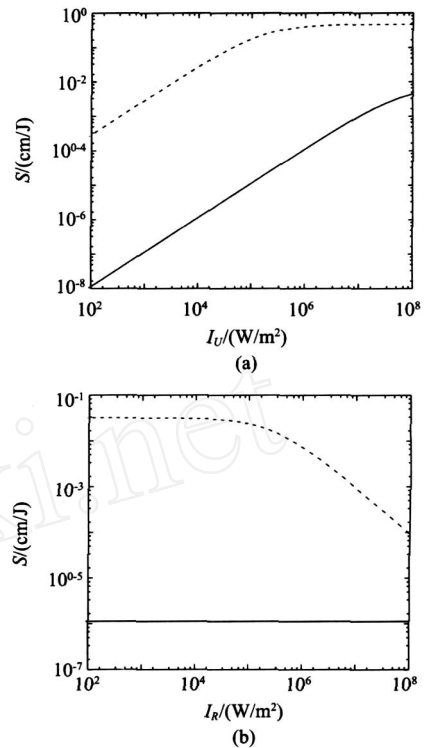


图 2 近化学比  $LNbO_3: Fe$  (虚线) 和  $LNbO_3: Fe: Mn$  (实线) 的记录灵敏度在各种实验条件下的情况  
Fig 2 The recording sensitivities at various experimental conditions for the near-stoichiometric  $LNbO_3: Fe$  (dashed curves) and the  $LNbO_3: Fe: Mn$  (solid curves)

上电子的暗衰减速率比可忽略不计, 但随着  $I_R$  增强, 光激发速率逐渐增强并逐渐超过暗衰减速率.

### 4 结论

以双中心模型为基础, 从理论上研究了  $LNbO_3: Fe: Mn$  和近化学比  $LNbO_3: Fe$  晶体的全息存储性能. 可知在低光强连续光范围内近化学比  $LNbO_3: Fe$  晶体通常比  $LNbO_3: Fe: Mn$  晶体有着更大的空间电荷场、更高的记录灵敏度和动态范围. 为进一步提高晶体灵敏度, 晶体材料的参数 (掺杂浓度等) 和实验条件 (记录光、泵浦光的波长及强度等) 都需要优化选择. 此外, 从浅能级中心到深能级中心的直接电子俘获及记录光和泵浦光引起的从浅能级中心到导带的光激发速率形成了竞争, 这就需要优化记录光和泵浦光光强来实现晶体最大的灵敏度.

### REFERENCES

[1] 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.

(下转 139 页)

表3 Iris分类测试数据结果比较

Table 3 Comparison result of test data of Iris classification

算法	迭代次数	测试数据分类正确率(%)
本文算法	150	98.57
BP	200	96.94
GA-ANN	210	97.85
文章[3]算法	195	98.19

### 3 结论

提出了一种基于物种入侵自适应遗传算法的设计和训练人工神经网络的算法.给出了一种与网络对应的染色体编码方法.该编码方法能应用于相同物种和不同物种个体之间的交差操作,并使染色体与网络一一对应;给出了相应的交差算子和具体的网络训练算法.物种入侵扩大算法在解空间中的搜索范围,使算法能得到更优解——即网络结构更简单,隐层节点数更少,连接数更少,泛化能力更强的人工神经网络;自适应调整,加速算法的收敛过程,提高了算法的效率.最后的仿真实验有力地证明了本文算法的高效性和优越性.

### REFERENCES

- [1] Zhang Q W, Wang C. Using Genetic Algorithm to Optimize Artificial Neural Network: A Case Study on Earthquake Prediction [C]. Genetic and Evolutionary Computing, 2008: 128—131.
- [2] JWU Yan, WAN Wei. Method on designing and training of artificial neural network based on genetic algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武妍, 万伟. 基于遗传算法设计和训练人工神经网络的方法, 红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 65—68.
- [3] Chen Z P, Zhao Y M, Zheng Y, et al. Neural Network Electrical Machine Faults Diagnosis Based on Multi-population GA [C]. IEEE International Joint Conference, 2008, 3795—3798.
- [4] Zhao X M, Li H Y, Zhang J. GA in Optimized Control of Central Air-conditioning System Based on ANN Simulation [C]. Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2007, 3: 617—622.
- [5] MA Fang-Fang. Optimization of neural networks with a real-coded genetic algorithms [J]. *Microprocessors* (马芳芳. 基于实数编码遗传算法的神经网络优化设计. 微处理机), 2008(3): 107—109.
- [6] Ma J, Wang B S, Ma Y G. ANN-based Real-Time Parameter Optimization via GA for Super Heater Model in Power Plant Simulator [C]. Machine Learning and Cybernetics, 2008 International Conference 2008, 4: 2269—2273.
- [7] Pan S T, Wu C H, Lai C C. The Application of Improved Genetic Algorithm on The Training of Neural Network for Speech Recognition [C]. Information and Control, Second International Conference on Innovative Computing, 2007: 168—171.
- [8] LI Wei-Chao, SONG Da-Meng, CHENG Bin. Artificial neural network based on genetic algorithm [J]. *Computer Engineering and Design* (李伟超, 宋大猛, 陈斌. 基于遗传算法的人工神经网络. 计算机工程与设计), 2006, 27(2): 316—318.
- [9] Grzesiak L M, Meganck V, Sobolewski J, et al. Genetic Algorithm for Parameters Optimization of ANN-based Speed Controller [C]. The International Conference on "Computer as a Tool", 2007: 1700—1705.
- [10] Tsou Y R, Spitsyn V G. Using Genetic Algorithm With Adaptive Mutation Mechanism for Neural Networks Design and Training [C]. The 9th Russian-Korean International Symposium, 2005: 709—714.
- [11] JWU Yan, FENG Zhao. Adaptive invading genetic algorithm based on chaos search [J]. *Journal of computer applications* (武妍, 冯钊. 一种基于混沌搜索的自适应入侵遗传算法. 计算机应用), 2008, 28(1): 101—103.
- [2] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Two-center holographic recording [J]. *J. Opt. Am. B*, 2001, 18(5): 584—601.
- [3] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Theoretical analysis of two-step holographic recording with high-intensity pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, 63(2): 023813-1-023813-17.
- [4] ZHANG Tian-Hao, LI Kun, SHAO Wei-Wei, et al. TE and TM mode photorefractive surface waves [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天浩, 李坤, 邵伟伟, 等. TE和TM模式光折变表面波. 红外与毫米波学报), 2008, 27(1): 60—64.
- [5] SHEN Yan, ZHANG Guo-Quan, FU Bo, et al. Studies on nonvolatile holographic recording for  $\text{LNbO}_3:\text{Fe}$  with different stoichiometry [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (申岩, 张国权, 付博, 等. 对不同组份  $\text{LNbO}_3:\text{Fe}$  非挥发全息存储的研究. 红外与毫米波学报), 2005, 24(4): 269—272.
- [6] YAO Jiang-Hong, XUE Liang-Ping, YAN Bo-Xia, et al. Optical parametric oscillator based on periodically poled  $\text{MgO}:\text{LNbO}_3$  crystal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姚江宏, 薛亮平, 颜博霞, 等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡. 红外与毫米波学报), 2007, 34(2): 209—213.
- [7] SHEN Yan, SUN Xiu-Dong, ZHAO Ye-Quan. Theoretical studies on nonvolatile holographic recording for  $\text{LNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (申岩, 孙秀冬, 赵业权.  $\text{LNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  晶体非挥发全息存储性能的理论研究. 红外与毫米波学报), 2008, 27(6): 421—424.

(上接 96页)