

文章编号: 0253-2239(2007)11-1955-5

# 用于双色全息存储(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体的 参量优化计算\*

李 熊 江竹青 孙砚宾 孔 芳 陶世荃

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

**摘要:** 在确定 Cu 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中对应于 365 nm 和 633 nm 的激发系数、复合系数、光伏系数的基础上,采用龙格-库塔(Runge-Kutta)数值方法理论研究了双掺杂(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体的深浅能级的掺杂组分比、氧化-还原状态对双色全息存储的记录灵敏度和动态范围的影响,并探讨了同时取得尽可能大的灵敏度和动态范围的晶体条件。结果表明,为了同时得到较大的记录灵敏度和动态范围,在实际应用中选用浅能级掺杂浓度为  $5.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,深能级掺杂浓度为  $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$  之间的弱氧化晶体是合适的。

**关键词:** 全息术; 体全息存储; 双色全息记录; 光折变(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体; 记录灵敏度; 动态范围

中图分类号: TN877 文献标识码: A

## Optimized Parameters for Nonvolatile Holographic Recording in (Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub> Crystals

Li Xiong Jiang Zhuqing Sun Yanbin Kong Fang Tao Shiquan

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

**Abstract:** The photo-excitation coefficient, electron recombination coefficient and bulk photovoltaic coefficient of Cu in LiNbO<sub>3</sub> are obtained. The effects of doped composition ratio of the deeper and shallower trap centers, oxidization-reduction state on the recording sensitivity and dynamic range are simulated numerically. The crystal conditions for simultaneously optimizing sensitivity and dynamic range are also investigated. The results show that, it is available to choose doping concentration of shallower trap centers as  $5.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$  and doping concentration of deeper trap centers as  $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$  to achieving the larger sensitivity and dynamic range simultaneously in the practical applications.

**Key words:** holography; volume holographic storage; two-center holographic recording; photorefractive crystal (Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>; recording sensitivity; dynamic range

### 1 引 言

光折变铌酸锂晶体是用于体全息数据存储技术的优良材料。但由于其动态的记录和擦除特性,如何实现存储信息的固定至今仍是全息存储技术实用化的关键之一。1998年, K. Buse等<sup>[1]</sup>提出的在双掺杂(Fe,Mn):LiNbO<sub>3</sub>晶体中实现双色全息存储技术,能真正实现对存储信息的全光无损读出,是较理想的固定技术,成为近期研究热点<sup>[2~6]</sup>。常用的实现非易失性全息存储的双掺杂晶体有(Fe,Mn):

LiNbO<sub>3</sub>, (Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>, (Cu,Ce):LiNbO<sub>3</sub>, (Ce,Mn):LiNbO<sub>3</sub>。在晶体中深浅能级的各个微观参量(如激发系数、复合系数、光伏系数等)对电子在晶体中的迁移有重要的影响。A. Adibi等<sup>[2,3]</sup>得到了Fe,Mn能级在(Fe,Mn):LiNbO<sub>3</sub>晶体中的各个参量,并对(Fe,Mn):LiNbO<sub>3</sub>晶体进行了大量的研究。在(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>, (Cu,Ce):LiNbO<sub>3</sub>, (Ce,Mn):LiNbO<sub>3</sub>晶体中进行双色全息存储也有大量的研究结果<sup>[4~7]</sup>,但对Cu,Ce的研究多是参照

\* 国家自然科学基金(60377003)资助课题。

作者简介: 李 熊(1982-),男,河南邓州人,硕士研究生,主要从事光学信息处理、光全息存储等方面的研究。

E-mail: lixiong1628@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 江竹青(1963-),女,湖南平江人,教授,主要从事光学信息处理、光学全息存储等方面的研究。

E-mail zhqjiang@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007-01-29; 收到修改稿日期: 2007-06-15

Mn、Fe 的参量。

本文推导出 Cu 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中的激发系数、复合系数、光伏系数,理论上研究了晶体的深浅能级掺杂组分比、氧化还原状态对记录灵敏度和动态范围的影响,为优化晶体条件提供一定的参考。

## 2 双色全息存储的理论模型

N. V. Kukhtarev 等<sup>[8]</sup>提出了光折变效应的带

运输模型,解释了稳态和动态的光折变效应。在此基础上,K. Buse 等<sup>[2,3]</sup>用扩展的 Kukhtarev 方程组,提出了双色全息记录的理论模型,成功解释了双色全息记录的物理过程。依据现有的理论,采用一次谐波近似,即将每个与光强有关的物理量都近似为其直流分量与基频分量之和(分别用脚标 0 和 1 表示)。双掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的动力学方程可表示为零阶方程和一阶方程<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial N_{D0}^-}{\partial t} = -(S_{D,H} I_H + S_{D,L} I_{L0}) N_{D0}^- + \gamma_D n_0 (N_D - N_{D0}^-), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial N_{S0}^-}{\partial t} = -(S_{S,H} I_H + S_{S,L} I_{L0}) N_{S0}^- + \gamma_S n_0 (N_S - N_{S0}^-), \quad (1b)$$

$$n_0 = \frac{g_D N_{D0}^- + g_S N_{S0}^-}{\gamma_D (N_D - N_{D0}^-) + \gamma_S (N_S - N_{S0}^-)}, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial N_{D1}^-}{\partial t} = -(S_{D,H} I_H + S_{D,L} I_{L0}) N_{D1}^- - m S_{D,L} I_{L0} N_{D0}^- + \gamma_D n_1 (N_D - N_{D0}^-) - \gamma_D n_0 N_{D1}^-, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial N_{S1}^-}{\partial t} = -(S_{S,H} I_H + S_{S,L} I_{L0}) N_{S1}^- - m S_{S,L} I_{L0} N_{S0}^- + \gamma_S n_1 (N_S - N_{S0}^-) - \gamma_S n_0 N_{S1}^-, \quad (2b)$$

$$n_1 = \left\{ (g_D + \gamma_D n_0) N_{D1}^- + (g_S + \gamma_S n_0) N_{S1}^- - \frac{ik}{e} [(\kappa_{D,H} I_H + \kappa_{D,L} I_{L0}) N_{D1}^- + (\kappa_{S,H} I_H + \kappa_{S,L} I_{L0}) N_{S1}^- + m I_{S0} (\kappa_{D,L} N_{D0}^- + \kappa_{S,L} N_{S0}^-)] - \frac{e\mu}{\epsilon} n_0 (N_{D1}^- + N_{S1}^-) + m I_{S0} (S_{D,L} N_{L0}^- + S_{S,L} N_{L0}^-) \right\} / \left[ \gamma_D (N_D - N_{D0}^-) + \gamma_S (N_S - N_{S0}^-) + ik\mu E_0 + \frac{e\mu n_0}{\epsilon\epsilon_0} + \frac{\mu k_B T}{e} k^2 \right], \quad (2c)$$

式中  $g_D = S_{D,H} I_H + S_{D,L} I_{L0}$ ,  $g_S = S_{S,H} I_H + S_{S,L} I_{L0}$ ,  $N_D, N_S$  为晶体内深能级和浅能级中心的掺杂数密度;  $N_D^-, N_S^-$  为电离的施主数密度;  $n$  为导带中的电子数密度;  $S_{D,H}, S_{D,L}$  分别为敏化光和记录光对深能级的光激发系数,  $S_{S,H}, S_{S,L}$  分别为敏化光和记录光对浅能级的光激发系数;  $\gamma_1, \gamma_2$  为电子与受主的复合系数;  $\kappa_{D,H}, \kappa_{D,L}, \kappa_{S,H}$  和  $\kappa_{S,L}$  为光伏系数, 它们分别对应于深能级中心和敏化光、深能级中心和记录光、浅能级中心和敏化光、浅能级中心和记录光;  $e$  为电子电量;  $\mu$  为迁移率;  $k_B$  为玻尔兹曼常量;  $T$  为绝对温度;  $\epsilon$  为晶体的介电常量;  $E$  为电场;  $I_H$  为敏化光的光强,  $I_L$  为记录光的强度;  $m$  为记录光调制度。空间电荷场可表示为

$$E_1 = E_{D1} + E_{S1} = -i \frac{e}{\epsilon k} (N_{D1}^- + N_{S1}^- + n_1), \quad (3)$$

(1)式~(3)式为描述光栅记录和固定过程的微分方程组,其解析表达式不易求得。在已知初始条件的情况下,可用龙格-库塔(Runge-Kutta)法对其进行数值运算,求得记录和固定过程的空间电荷场

的数值解。计算中,考虑紫外光的吸收(晶体对红光的吸收可忽略不计):

$$I_H = I_{H0} \exp(-\alpha L), \quad (4)$$

式中  $I_{H0}$  为晶体表面处的紫外光强,  $\alpha$  为紫外光的吸收系数,  $L$  为晶体厚度。双色全息存储的记录灵敏度  $S$  和动态范围  $M$  可以分别表示为<sup>[3]</sup>

$$S = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{\pi n^3 r}{2\lambda \cos \theta} (\kappa_{D,L} N_{D0}^- |_{t=0} + \kappa_{S,L} N_{S0}^- |_{t=0}) m \beta, \quad (5)$$

$$M = \frac{\pi n^3 r L}{2\lambda \cos \theta} E_1 \beta, \quad (6)$$

式中  $\epsilon\epsilon_0$  为晶体的介电常量,  $\lambda$  为记录光波长,  $\theta$  为记录光与参考光在晶体中夹角的一半,  $r$  为光伏系数,  $\beta$  为固定后光栅强度与饱和光栅强度的比值。

## 3 Cu 的微观参量

在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中,掺杂物质的复合系数、激发系数和光伏系数对电子在晶体中的迁移有重要的影响。而光伏电流  $j$  是这种影响的表现形式<sup>[9,10]</sup>,

$$j = \kappa' \alpha I = \kappa' s I (N - N^+), \quad (7)$$

式中  $I$  为光强度。由(7)式可得

$$\kappa = \kappa' s_{\text{abs}} h\nu = \frac{(j/I)h\nu}{(N - N^+)}, \quad (8)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为入射光的频率,  $\kappa'$  为晶体的各向异性系数,  $s_{\text{abs}}$  为光吸收截面,  $\kappa$  为光伏系数,  $N$  为晶体中总的掺杂浓度,  $N^+$  为电离的施主数密度。由于 Cu 处在双掺杂(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>的深能级, 633 nm 的红光不能对深能级的电子发生作用, 所以 Cu 的激发系数  $S_{\text{D,R}}$  和复合系数  $K_{\text{D,R}}$  都可认为是 0。

由文献[11]可得 Cu 在 365nm 时的  $j/I$  值, 将其代入(8)式可得光伏系数  $4.97 \times 10^{-33} \text{ m}^3/\text{V}$ ; 又由文献[12]可得 Cu 在 365 nm 时的各向异性系数  $\kappa'$ , 并将其代入(8)式可得到光吸收截面  $s_{\text{abs}}$ 。在 365 nm 时 Cu 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中光激发系数  $S_{\text{D,UV}} = q s_{\text{abs}}$ ,  $q$  为量子效率, 它描述了吸收一个光子而能激发出一个电子的效率。Yunping Yang 等<sup>[13,14]</sup>用晶体中量子效率的典型值 0.05 研究了 Mn 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中的激发系数。由于 Cu 和 Mn 都是处在双掺杂铌酸锂晶体的深能级, 也借用这一典型值研究 Cu 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中的激发系数, 可得到 365 nm 时激

发系数  $S_{\text{D,UV}}$  为  $4.95 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{J}$ 。

掺杂物质在晶体中的复合系数为<sup>[14]</sup>

$$\gamma = \frac{q s_{\text{abs}}}{\sigma_{\text{ph}}/I} \frac{N_{\text{D}} - N_{\text{D}}^+}{N_{\text{D}}^+} e\mu, \quad (9)$$

式中  $\sigma_{\text{ph}}$  为光电导率, 由于  $q s_{\text{abs}}$  已知, 根据 Cu 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中的  $\sigma_{\text{ph}}/I$  曲线图<sup>[12]</sup>, 即可计算出掺杂物质的复合系数为  $1.52 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ 。同理, 也可以获得 Fe 在 365 nm 和 633 nm 时的各个系数<sup>[11,12,13]</sup>。这样, 深浅能级的光激发系数、复合系数和光伏系数都可获得, 如表 1 所示。通过比较数据表明, Fe 是浅能级、Cu 是深能级, 说明对 Cu 的微观参量的推算是合理的。D. Liu 等<sup>[16]</sup>实验研究发现双掺杂(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体存在漂白效应, 即紫外光敏化时晶体中的电子由浅能级向深能级迁移使晶体对可见光的吸收减少, 并认为漂白效应是由于紫外光对浅能级的激发系数与深能级复合系数的乘积大于紫外光对深能级的激发系数与浅能级复合系数的乘积而造成的。可见, 这与理论得到的结果是一致的。

表 1 Cu 在(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体中的复合系数、光激发系数和光伏系数

Table 1 Parameters of Cu in (Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub> crystals used in the theoretical calculations

| Parameters                                | Meaning  | Value                  |
|---|--|------------------------|
| $\gamma_{\text{S}}/(\text{m}^3/\text{s})$ | Electron recombination coefficient of Fe center          | $1.65 \times 10^{-14}$ |
| $S_{\text{S,R}}/(\text{m}^2/\text{J})$    | Photo-excitation coefficient of Fe center for red light  | $3.38 \times 10^{-6}$  |
| $S_{\text{S,UV}}/(\text{m}^2/\text{J})$   | Photo-excitation coefficient of Fe center for UV light   | $5.44 \times 10^{-5}$  |
| $-K_{\text{S,R}}/(\text{m}^3/\text{V})$   | Bulk photovoltaic coefficient of Fe center for red light | $6.99 \times 10^{-34}$ |
| $-K_{\text{S,UV}}/(\text{m}^3/\text{V})$  | Bulk photovoltaic coefficient of Fe center for UV light  | $1.40 \times 10^{-32}$ |
| $\gamma_{\text{D}}/(\text{m}^3/\text{s})$ | Electron recombination coefficient of Cu center          | $1.52 \times 10^{-13}$ |
| $S_{\text{D,R}}/(\text{m}^2/\text{J})$    | Photo-excitation coefficient of Cu center for red light  | 0                      |
| $S_{\text{D,UV}}/(\text{m}^2/\text{J})$   | Photo-excitation coefficient of Cu center for UV light   | $4.95 \times 10^{-5}$  |
| $-K_{\text{D,R}}/(\text{m}^3/\text{V})$   | Bulk photovoltaic coefficient of Cu center for red light | 0                      |
| $-K_{\text{D,UV}}/(\text{m}^3/\text{V})$  | Bulk photovoltaic coefficient of Cu center for UV light  | $4.97 \times 10^{-33}$ |

## 4 晶体条件对记录灵敏度和动态范围影响

通过研究晶体深浅能级的掺杂组分比、氧化还原状态对记录灵敏度和动态范围的影响, 选择可以同时得到较大记录灵敏度和动态范围的晶体参量, 为确定合适的晶体条件优化全息存储性能提供一定的指导。

### 4.1 深浅能级掺杂组分比 ( $N_{\text{Cu}}/N_{\text{Fe}}$ ) 的影响

与(Fe,Mn):LiNbO<sub>3</sub>晶体中的情形<sup>[3]</sup>相同, 在双掺杂(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体中, 记录灵敏度和动态范围都随浅能级掺杂浓度的增大而增大, 故在实

际应用中应采用尽可能大的浅能级掺杂浓度。对于双掺杂晶体, 能用于双色记录的最大浅能级掺杂质量分数为 0.15% 的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $N_{\text{Fe}} = 5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ )<sup>[2,3]</sup>。当空间电荷场记录达到饱和时, 电子在深浅能级的分布是一种动态平衡状态, 这种平衡状态与晶体深浅能级的掺杂浓度有关。保持浅能级的最大掺杂  $N_{\text{Fe}} = 5.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$  不变, 设定 90% 的 Cu 能级空穴被电子填充(即  $N_{\text{a}} = 0.9 N_{\text{Cu}}$ ), 光束比( $I_{\text{R}}/I_{\text{UV}}$ )为 30, 然后改变深浅能级的掺杂浓度比( $N_{\text{Cu}}/N_{\text{Fe}}$ )来研究它对灵敏度和动态范围的影响, 这时  $N_{\text{a}}$  为照时晶体中总的受主数密度, 它反映了晶体的氧化还

原状态。

由图 1 可以看出,记录灵敏度和动态范围的最大值不可能同时得到。在双色全息存储中,记录灵敏度与浅能级施主数密度呈正比,即  $S \propto N_{Fe}^{2+}$ 。当  $N_{Cu}$  较小时,深能级的电子数密度较少,被激发到导带后再被浅能级陷阱  $Fe^{3+}$  俘获的电子数目较少,所以灵敏度较低;随着深能级掺杂浓度的增大,能被激发到导带再被  $Fe^{3+}$  俘获的电子数目越来越多,灵敏度逐渐增大;但深能级的  $Cu^{2+}$  也会俘获导带中的电子,当  $N_{Cu}$  过大时,深能级的  $Cu^{2+}$  也较多,这样深能级  $Cu^{2+}$  和浅能级的  $Fe^{3+}$  在俘获导带中的电子时产生竞争,使得灵敏度随深浅能级的掺杂组分比增加达到一最大值后反而下降了。对于文中给出的参量,当深浅能级的掺杂组分比  $N_{Cu}/N_{Fe} \approx 1.2$  (即  $N_{Cu} \approx 6.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ) 时可得到最大灵敏度值。

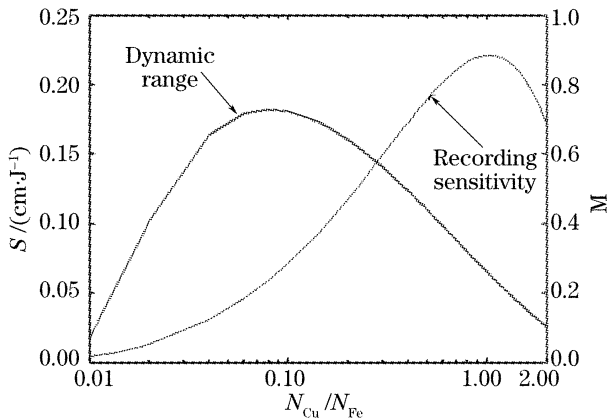


图 1 掺杂组分比对记录灵敏度和动态范围的影响  
Fig. 1 Effect of dopant composition ratio on recording sensitivity and dynamic range

对于动态范围,  $M \propto E_f (= E_s \beta)$ ,  $E_s$ 、 $E_f$  分别为饱和空间电荷场和固定后空间电荷场,所以动态范围的变化趋势与固定后的空间电荷场(如图 2)的变化趋势相同。在记录过程中,晶体的深浅掺杂能级同时形成调制的空间电荷场,但在固定后只有记录在深能级的空间电荷场不被擦出。即在光栅形成过程中,只有记录在深能级的空间电荷场才是最终形成的非易失性的空间电荷场。

当掺杂组分比较小时,深能级掺杂浓度较少,这样激发到浅能级的电子数目就少,形成的空间电荷场也较弱。随着掺杂组分比的增大,能被激发到浅能级被红光干涉调制的电子数目增多,形成空间电荷场较强;同时深能级电子陷阱数密度也随着掺杂组分比的增大而增大,这样深能级的陷阱俘获的被红光干涉调制的电子数目也较多,使记录深能级的空间电荷场较强。当掺杂组分比过大时,深能级电子

陷阱数目也较多,它将比浅能级电子陷阱俘获更多的电子,使较少的电子数激发到浅能级,从而限制了空间电荷场的形成,这样转移到深能级的空间电荷场也较弱。由图 1 和图 2 可以看出,当深浅能级的掺杂组分比  $N_{Cu}/N_{Fe} \approx 0.06$  (即  $N_{Cu} \approx 3.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) 时可得到最大动态范围值。

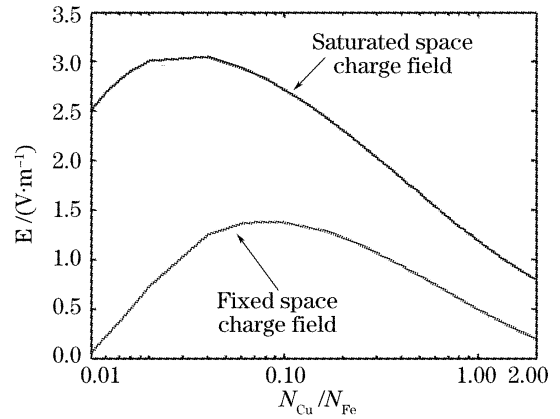


图 2 掺杂组分比对饱和空间电荷场和固定后空间电荷场的影响

Fig. 2 Effect of dopant composition ratio on saturated space-charge field and fixed space-charge field

### 4.2 氧化还原状态的影响

在实际应用中,需要尽可能同时得到大的记录灵敏度和动态范围,这就要求选择合适的深浅能级掺杂浓度和氧化还原条件。令  $N_{Fe} = 5.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , 和光束比  $I_R/I_{UV} = 30$  保持不变,取  $N_{Cu} = 1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , 图 3 和图 4 分别为记录灵敏度和动态范围随氧化还原状态的变化曲线。

由图 3 和图 4 可以看出,在  $N_a \approx 0.9N_{Cu}$  附近时,记录灵敏度和动态范围都可取得其各自最大值。当  $N_a = 0$  时,晶体深、浅能级都没有电子存在,这样就不能在晶体中记录全息图;当  $N_a = N_{Cu}$  时,虽然记录过程中紫外敏化光可以激发深能级的电子到浅能级从

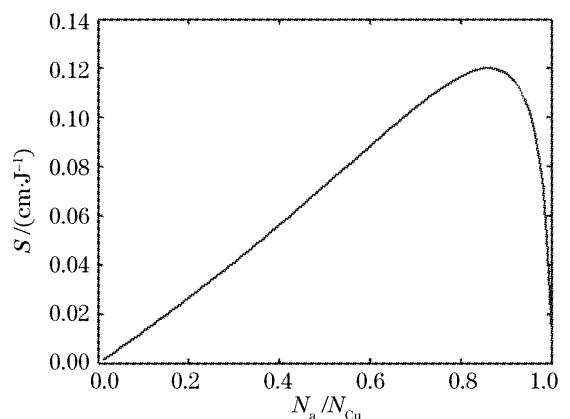


图 3 氧化还原状态对灵敏度的影响

Fig. 3 Effect of oxidization-reduction state on sensitivity

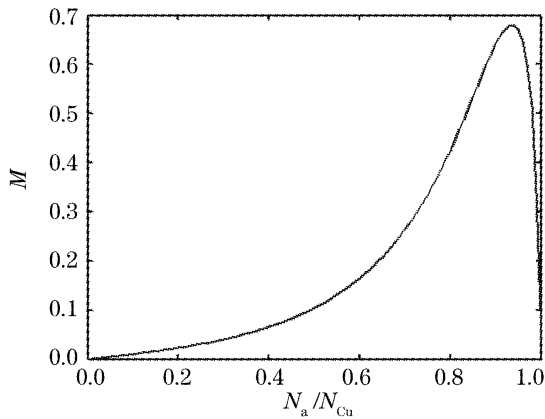


图4 氧化还原状态对动态范围的影响

Fig. 4 Effect of oxidization-reduction state on dynamic range  
而记录较强的空间电荷场,但在固定过程中红光对电子的激发又会使深能级填满电子,使深能级没有空间去存储折射率调制的空间电荷场,所以存储的全息图是易失性的。因此,只有在  $0 < N_a < N_{Cu}$  时,即在氧化状态的晶体中才可以实现非挥发性全息存储。

本文还研究了  $N_{Cu}$  取不同值时,最大灵敏度  $S_{max}$  和动态范围  $M_{max}$  所对应的优化氧化还原状态,如表 2 所示。

表 2 不同掺杂  $N_{Cu}$  条件下,  $S_{max}$  和  $M_{max}$  所对应的优化氧化还原状态Table 2 The optimized oxidization-reduction state of the  $S_{max}$  and  $M_{max}$  with different  $N_{Cu}$ 

| $N_{Cu}/m^{-3}$    | $N_a/N_{Cu}$ | $S_{max}/(cm/J)$ | $N_a/N_{Cu}$ | $M/\#_{max}$ |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| $6 \times 10^{25}$ | 0.95         | 0.25             | 0.98         | 0.50         |
| $3 \times 10^{25}$ | 0.92         | 0.21             | 0.97         | 0.55         |
| $1 \times 10^{25}$ | 0.86         | 0.12             | 0.94         | 0.68         |
| $5 \times 10^{24}$ | 0.82         | 0.08             | 0.9          | 0.72         |
| $3 \times 10^{24}$ | 0.79         | 0.05             | 0.87         | 0.74         |
| $1 \times 10^{24}$ | 0.73         | 0.02             | 0.73         | 0.64         |

由表 2 可以看出,随着深能级掺杂浓度的减少,最大灵敏度和动态范围的最优氧化程度相应降低。而且随着深能级掺杂浓度逐渐减小,灵敏度  $S_{max}$  也逐渐减小;而  $M_{max}$  先增大到一最大值(对应的  $N_{Cu}$  为  $3 \times 10^{24} m^{-3}$ )后又逐渐减小。为了同时得到较大的记录灵敏度和动态范围,取深能级的掺杂浓度  $N_{Cu} = 3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} m^{-3}$  是合适的。同时还可以看出,记录灵敏度和动态范围的最大值所对应的氧化还原状态  $N_a = (0.73 \sim 0.97) \times N_{Cu}$ ,即在弱氧化的状态可以同时得到大的记录灵敏度和动态范围。

## 5 结 论

在得到了(Fe,Cu):LiNbO<sub>3</sub>晶体中 Cu 在 365 nm 和 633 nm 时的激发系数、复合系数、光伏系数的基础

上,采用数值方法理论研究了晶体的深、浅能级的掺杂组分比、氧化-还原状态双色全息存储的记录灵敏度和动态范围的影响,发现记录灵敏度和动态范围的优化值对应的晶体参量不同,它们不可能同时获得。为了尽可能同时得到大的灵敏度和动态范围,在实际应用中应选用浅能级掺杂浓度为  $5.0 \times 10^{25} m^{-3}$ ,深能级掺杂浓度为  $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} m^{-3}$  之间的弱氧化晶体是合适的。

## 参 考 文 献

- 1 K. Buse, A. Adibi, D. Psaltis. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals[J]. *Nature*, 1998, **393**(18): 665~668
- 2 A. Adibi, K. Buse, D. Psaltis. Two-center holographic recording [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(5): 584~601
- 3 O. Momtahan, A. Adibi. Global optimization of sensitivity and dynamic range for two-center holographic recording[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(3): 449~461
- 4 Hou Jinying, Tao Shiquan, Jiang Zhuqing. Research on two color holographic storage in a LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Cu crystal [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(5): 594~598 (in Chinese)
- 5 侯金英,陶世荃,江竹青. LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Cu 晶体中双色全息存储技术的研究[J]. *光子 • 激光*, 2004, **15**(5): 594~598
- 6 Ren Liyong, Liu Liren, Liu De'an. Effect of microcosmic optical parameters of doubly doped LiNbO<sub>3</sub> on diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 941~946 (in Chinese)
- 7 任立勇,刘立人,刘德安. 双掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 微观光学参量对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 941~946
- 8 Dong Qianmin, Lliu Liren, Liu Dean *et al.*. Optimal dopant composition ratio during nonvolatile holographic recording in LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce crystals[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 248~251 (in Chinese)
- 9 董前民,刘立人,刘德安等. LiNbO<sub>3</sub>:Cu:Ce 非挥发全息记录掺杂组分比的优化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 248~251
- 10 Liyong Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Dynamic characteristics of holographic recording and fixing in LiNbO<sub>3</sub>:Ce:Cu crystal[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4~6): 363~369
- 11 N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state [J]. *Ferroelectrics*, 1979, **22**: 949~960
- 12 A. M. Glass, D. Von der Linde, T. J. Negran. High-voltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive progress in LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(4): 233~235
- 13 R. S. Cudney, R. M. Pierce, G. D. Bacher *et al.*. Intensity dependence of the photogalvanic effect in barium titanate[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(9): 1704~1713
- 14 E. Krätzig, H. Kurz. Photo-induced currents and voltages in LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Ferroelectrics*, 1976, **13**: 295~296
- 15 E. Krätzigand, H. Kurz. Photorefractive and photovoltaic effects in doped LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Optica Acta*, 1977, **24**(4): 475~482
- 16 Yiping Yang, D. Psaltis, M. Luennemann *et al.*. Photorefractive properties of lithium niobate crystals doped with manganese[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(7): 1491~1502
- 17 K. Buse, A. Gerwens, S. Wevering *et al.*. Charge-transport parameters of photorefractive strontium-barium niobate crystals doped with cerium[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(6): 1674~1677
- 18 F. Jermann, J. Otten. Light-induced charge transport in LiNbO<sub>3</sub>:Fe at high light intensities[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(11): 2085~2092
- 19 D. Liu, L. Liu, C. Zhou *et al.*. Nonvolatile holograms in LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Cu by use of the bleaching effect[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(32): 6809~6911