

文章编号: 0253-2239(2007)11-1960-7

(Ce, Cu):LiNbO₃ 晶体非挥发全息记录 理论研究及优化*

李大汕 刘德安 职亚楠 栾 竹 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 根据双中心带运输模型,对(Ce,Cu):LiNbO₃晶体双中心非挥发全息记录进行了理论与优化。推导了(Ce,Cu):LiNbO₃晶体的微观参量,采用数值方法通过严格求解模拟双中心带运输方程来模拟全息记录过程。分析了记录过程中,记录与敏化光强、Ce和Cu掺杂浓度以及晶体微观参量对(Ce,Cu):LiNbO₃晶体双中心全息记录的影响。发现(Ce,Cu):LiNbO₃晶体非挥发全息记录中实现高衍射效率与固定效率的主导因素是深中心Cu,在记录过程中,深中心Cu建立起了很强的空间电荷场。数值模拟的结果经过实验验证,最高饱和与固定衍射效率分别为60.5%和53.8%。

关键词: 非线性光学;体光栅;非挥发全息记录;(Ce,Cu):LiNbO₃晶体

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Theoretical Investigation and Optimization of Nonvolatile Holographic Recording in (Ce, Cu):LiNbO₃ Crystal

Li Dashan Liu Dean Zhi Yanan Luan Zhu Liu Liren

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

Abstract: Based on the band transport model, the two-center nonvolatile holographic recording in (Ce,Cu):LiNbO₃ has been theoretically investigated and optimized. Microphysical parameters of (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal are obtained and used to rigorously solve two-center band transport equations by numerical algorithm. The effects of recording and sensitizing intensities, dopant concentration of Ce and Cu, and microphysical parameters on recording performance of two-center holographic recording have been analyzed. And the characteristic of two-center recording in (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal has been found, that the deep center Cu plays a key role in the recording process and a strong space-charge field has been built in Cu traps, so a high diffraction efficiency and fixing efficiency can be achieved. Numerical results have been verified by experiments. The highest saturation and fixing diffraction efficiencies achieved are 60.5% and 53.8%, respectively.

Key words: nonlinear optics; volume grating; nonvolatile holographic recording; (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal

1 引 言

光折变效应在体全息存储、光信息处理、集成光学等领域中具有重要应用价值。非挥发性读取是在光折变晶体中实现体全息记录的一个重要问题。为了解决这一问题,国际上提出了几种方法来实现非挥发全息存储^[1,2]。其中,利用双掺杂LiNbO₃晶体来实现双中心非挥发全息记录已经成为一个研究热

点^[2]。双中心非挥发全息记录具有实时性、全光记录等特点,通过改变晶体中的掺杂元素,人们发展了多种双掺杂LiNbO₃晶体用于双中心非挥发全息存储^[3~5]。

在双中心记录中,(Ce,Cu):LiNbO₃晶体由于具有吸收少、衍射效率高、相干散射噪声低等优点而倍受关注。Liyong Ren等^[6]发现(Ce,Cu):LiNbO₃晶体

* 科技部重大基础研究前期研究专项(2002CCA03550)和国家自然科学基金(60177016)资助课题。

作者简介:李大汕(1979-),男,福建人,博士研究生,主要从事光折变效应理论与实验等方面的研究。

E-mail: lidashan@gmail.com

导师简介:刘立人(1942-),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事光通信、衍射光学、光折变、光学图像处理等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期:2007-05-17;收到修改稿日期:2007-06-23

存在一个从记录到固定的最佳切换时间,从而使被固定光栅衍射效率达到最高。与(Fe,Mn):LiNbO₃等用于双中心记录的晶体不同,(Ce,Cu):LiNbO₃不具有光色效应,利用短波长的紫外光等光源对其进行预敏化并不能明显提高其记录灵敏度。Ali Adibi 等^[7]利用(Fe,Mn):LiNbO₃晶体中深浅中心 Fe 和 Mn 的各个微观参量,对(Fe,Mn):LiNbO₃晶体非挥发全息性能进行了系统深入的研究,验证了实验现象,同时也对存储性能进行了优化。但是(Ce,Cu):LiNbO₃晶体中 Ce 和 Cu 的微观参量目前并没有具体报道,不利于进一步的分析研究。

本文分析了 LiNbO₃ 中 Ce 和 Cu 与 Fe 和 Mn 等杂质微观参量的不同,推导了 Ce 和 Cu 的微观参量;数值求解带输运方程组,对(Ce,Cu):LiNbO₃晶体的全息记录进行分析,研究了记录敏化光强、晶体掺杂组分比以及微观参量对双中心全息记录的影响;通过与(Fe,Mn):LiNbO₃的双中心记录模拟结果相比较,得到结论:(Ce,Cu):LiNbO₃晶体实现高衍射效率与固定效率的主导因素是深中心 Cu 建立了很强的空间电荷场。验证了数值模拟,并且为优化晶体记录性能提供了指导。

2 (Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体微观参量

在双中心全息记录中,(Fe,Mn):LiNbO₃、(Fe,Cu):LiNbO₃、(Ce,Cu):LiNbO₃ 和 (Ce,Mn):LiNbO₃ 四种最经常使用的晶体在短波长紫外光敏化时表现出光色效应或漂白效应:(Fe,Mn):LiNbO₃ 与(Ce,Mn):LiNbO₃ 表现出光色效应;(Fe,Cu):LiNbO₃ 表现出漂白效应;(Ce,Cu):LiNbO₃ 对紫外光敏化不敏感。Ren Liyong 等^[3]分析双掺杂 LiNbO₃ 晶体光色漂白效应时,引入光色漂白因子

$$\alpha = S_{s,UV} \gamma_D / (S_{D,UV} \gamma_S), \quad (1)$$

式中 $S_{D,UV}$ 、 $S_{s,UV}$ 和 γ_D 、 γ_S 分别是深浅中心对应紫外光的激发常数和电子复合系数。当掺杂组分比以及氧化还原等条件相同时, α 因子越小意味着光色效应越强烈,紫外光预敏化使电子向浅中心转移,晶体对记录光的吸收增加;当 α 较大,晶体表现出漂白效应,紫外光预敏化使电子向深中心转移,晶体对可见记录光的吸收减小。文献[4]中研究表明,相同条件下,(Ce,Mn):LiNbO₃ 比(Fe,Mn):LiNbO₃ 具有更强的光色效应,因此四种不同晶体的 α 因子满足

$$\alpha_{Ce,Mn} < \alpha_{Fe,Mn} < \alpha_{Ce,Cu} < \alpha_{Fe,Cu}, \quad (2)$$

同时可以得到

$$S_{Ce,UV} / \gamma_{Ce} < S_{Fe,UV} / \gamma_{Fe},$$

$$S_{Cu,UV} / \gamma_{Cu} < S_{Mn,UV} / \gamma_{Mn}, \quad (3)$$

文献[8]对上述四种双掺杂晶体全息记录过程中的散射噪声进行对比发现,(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体具有最低的散射噪声,这是由于 Ce 离子的电子复合系数比 Fe 离子小,而 Cu 离子的电子复合系数要比 Mn 高;同时,Ce 离子的紫外敏化光吸收系数比 Fe 离子小而 Cu 离子的紫外敏化光吸收系数比 Mn 离子大。文献[4]同样由实验得出结论,在 LiNbO₃ 晶体中掺入的 Ce 离子虽然对 633 nm 红光记录光敏感,但是吸收系数很低,对应的光生伏特系数也小于 Fe 离子,因此虽然(Ce,Mn):LiNbO₃ 具有很强的光色效应,却无法在晶体中记录很强的体光栅。

在光生伏特效应主导的掺杂 LiNbO₃ 晶体中光生伏特系数可表示为^[9,10]

$$\kappa = \kappa_g s h \nu, \quad (4)$$

其中 κ_g 为 Glass 常数, s 是光子的吸收截面, h 为普朗克常量, ν 为光子频率。由文献[9,10]可以分别得到 Cu 在 365 nm 紫外和 633 nm 红光对应的 κ_g 和 s ,利用式(5)可以分别求出 Cu 对应的光生伏特系数。Cu 对应的电子复合系数为

$$\gamma = e \mu q s \frac{1}{\sigma_{ph}} \frac{N_{Cu^+}}{N_{Cu^{2+}}}, \quad (5)$$

式中 σ_{ph} 为光电导, e 为单位电荷电量, $\mu \cdots \cdots, q$ 为光子吸收的量子效率,取与另一种深中心常用掺杂离子 Mn 相同的典型值 0.05^[11]。根据文献[10]给出的实验数据,就可以计算得到 Cu 的电子复合系数。

作为浅中心的 Ce,可以由文献[4]推导出光生伏特系数,其对应的光子吸收量子效率取与 Fe 相同数值[7]。Ce 的电子复合系数可以采用式,由文献[10]的结果推导得到。Ce 离子对应紫外敏化光的光吸收系数以及光色伏特系数根据上一小节的要求给出估计值,将在后面给予验证。

Adibi 和 Ren 等^[4,7]在讨论双中心全息记录过程时,均采用一次谐波近似来求解带输运方程组,将方程组的未知物理量都近似为直流分量与基频分量之和,方程组分解为 0 阶方程和一阶方程。这样做的好处是降低了求解难度在小调制度下可以达到较高精度;但是在全息记录时经常利用调制度接近或等于 1 的情况,一次谐波近似求解将带来较大误差。本文采用文献[12]提出的数值算法来严格求解双中心带输运方程组,降低了一次谐波近似带来的误差,提高了求解精度。其基本思想是将方程组中物理量进行空间离散化,转化为变量仅随时间变化的常微分方程组,方程数量增加,但是大大降低了求解难

度,提高了计算效率和精度。

表 1 双掺杂(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体微观参量

Table 1 Parameters of double-doped crystal (Ce,Cu):LiNbO₃

Notation	Description	Value
$\gamma_D/(m^3/s)$	Electron recombination coefficient of Cu center	7.2×10^{-13}
$\gamma_S/(m^3/s)$	Electron recombination coefficient of Ce center	1.5×10^{-14}
$S_{D,L}/(m^2/J)$	Photo-excitation coefficient of Cu for red light	0
$S_{D,H}/(m^2/J)$	Photo-excitation coefficient of Cu for UV-light	5×10^{-5}
$S_{S,L}/(m^2/J)$	Photo-excitation coefficient of Ce for red light	0.8×10^{-6}
$S_{S,H}/(m^2/J)$	Photo-excitation coefficient of Ce for UV-light	2×10^{-5}
$-\kappa_{D,L}/(m^3/V)$	Bulk photovoltaic coefficient of Cu for red light	0
$-\kappa_{D,H}/(m^3/V)$	Bulk photovoltaic coefficient of Cu for UV-light	2.5×10^{-32}
$-\kappa_{S,L}/(m^3/V)$	Bulk photovoltaic coefficient of Ce for red light	2.8×10^{-34}
$-\kappa_{S,H}/(m^3/V)$	Bulk photovoltaic coefficient of Ce for UV-light	1×10^{-32}

3 (Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体实验验证

实验中采用的双掺杂(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体是采用 Czochralski 方法从熔体中生长而成,Ce₂O₃ 和 CuO 在的掺杂质量分数分别为 0.15% ($N_S = 2.56 \times 10^{25} m^{-3}$)和 0.01% ($N_D = 3.9 \times 10^{24} m^{-3}$)。晶体在 900 °C 的氧气环境下退火 6 h 得到氧化态的样品。实验方案采用 365 nm 紫外光作为敏化光,He-Ne 激光器作为记录光源。敏化光强和记录光强分别为 200 W/m² 和 3000 W/m²。

图 1 给出了晶体双中心全息记录的实验曲线和数值模拟的对比。全息记录和固定阶段分别为 0~40 min 和 40~80 min。需要说明的是,除了氧化-还原程度这一参量很难准确把握外,其他物理参量完全取决于晶体成份配比、生长环境(包括后期处理)和全息记录实验条件,因而在实验上和理论计算上是完全一致的。在此模拟计算中假定了氧化-还原程度 $N_a = 0.93N_D$,可以看到在该氧化-还原程度下,理论模拟结果比较好地接近于实验曲线,这说

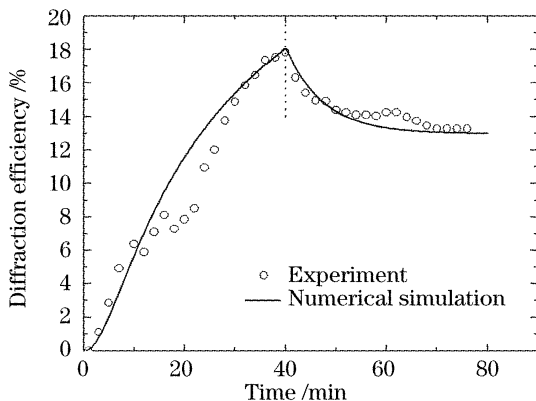


图 1 氧化的(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体衍射效率的时间演化
Fig. 1 Temporal evolution of diffraction efficiency in an oxidized (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal

明前面对(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体微观参量的推导值与实际值较为吻合。

4 讨 论

4.1 记录与敏化光强的影响

对于双掺杂 LiNbO₃ 晶体非挥发全息存储,记录和敏化光强、深浅中心掺杂组分比等记录条件将直接影响记录性能。研究表明^[4,7],双中心全息记录的衍射效率以及记录灵敏度等记录性能只与记录与敏化光强的比值有关,而与绝对光强大小无关。在(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体中记录全息时,为了达到最优化记录性能,一般取此比值为 25^[4];对于(Fe,Cu):LiNbO₃ 晶体,优化比值为 50^[13]。

在分析记录和敏化光强比值对(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体影响时,敏化紫外光强固定为 $I_{UV} = 200 W/m^2$,改变记录光强,晶体的氧化还原度 $N_a = 0.95N_D$ 。图 2 是以 365 nm 紫外光和 458 nm 蓝光

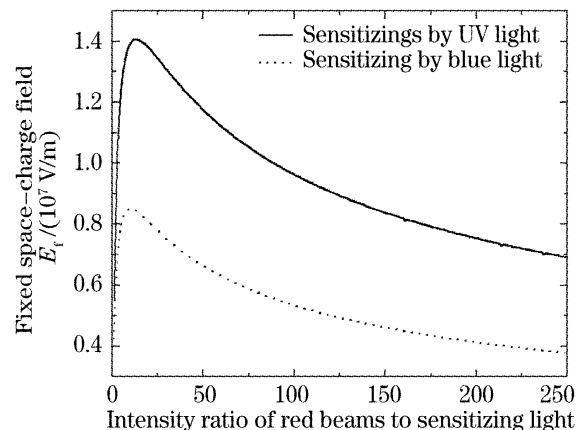


图 2 固定空间电荷场随记录敏化光强比值的变化
Fig. 2 Fixed space-charge field versus intensity ratio of writing red beams to sensitizing UV light

为敏化光源时固定空间电荷场随记录敏化光强比的变化曲线。采用 365 nm 紫外光为敏化光源时,当两光强比值约为 15 时,固定的空间电荷场最强;采用波长更长的敏化光源,如 458 nm 蓝光时,由于掺杂深浅中心对敏化光的光生伏特系数、光吸收系数随之降低,相同记录光强条件下需要更强的敏化光来激发电子,因此两光强的优化比值比紫外光敏化时要小,约为 10,这与文献[14]的实验结果十分接近。

4.2 Ce 与 Cu 掺杂浓度的影响

(Fe,Mn):LiNbO₃ 等双掺杂晶体进行非挥发全息记录时,一般要求浅中心陷阱的掺杂浓度大于深中心陷阱^[7]。但是,Dong 等^[15]的实验表明,当(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体中的 Cu 掺杂浓度接近或大于 Ce 时,同样可以实现非挥发存储,但是把这一变化归结于 Cu 掺杂浓度变化而导致对紫外敏化光吸收的变化是不够全面的,并没有结合(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体本身的特点进行分析。由文献[10]可知,当 Cu 的掺杂浓度较低时,其光生伏特系数基本保持不变;而当 Cu 的掺杂浓度明显提高时,其光生伏特系数也随之提高。确定不同 Cu 的掺杂浓度下对应的光生伏特系数很困难,主要分析两种常见 Cu 掺杂浓度下,改变 Ce 掺杂浓度对晶体的记录的影响:1) Cu 掺杂浓度 $N_D = 3.84 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $-\kappa_{D,H} = 2.5 \times 10^{-32}$, 晶体对紫外光吸收 $\alpha_{UV} = 3000 \text{ /m}$;2) Cu 掺杂浓度 $N_D = 1.57 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $-\gamma_{D,H} = 3.0 \times 10^{-32}$, $\alpha_{UV} = 4000 \text{ /m}$ 。两种条件下均假设 $N_A = 0.95 N_D$ 。由于(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体对 633 nm 红光吸收很小,可以近似认为改变 Cu 的浓度时,晶体对 633 nm 红光的吸收系数不变。同时由于 Ce 的光生伏特系数比较小,对分析结果影响比较小,在进行模拟时假

设其不随着掺杂浓度变化。

如图 3 所示,不同的 Cu 掺杂浓度(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体中的饱和空间电荷场与固定效率都要比文献[3]中对(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体的模拟结果高,证实了实验中对(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体性能的判断^[6]。高掺杂 Cu 的晶体在随着 Ce 掺杂浓度变化时,其饱和空间电荷场始终比低掺杂 Cu 的晶体要高;但是在 Ce 掺杂浓度较小时,高掺杂 Cu 晶体的固定效率(定义为固定空间电荷场与饱和空间电荷场的比值)较低,当 Ce 浓度较高时,高掺杂 Cu 晶体的固定效率呈现出饱和的趋势,而低掺杂 Cu 晶体的固定效率则在 Ce 的掺杂浓度为 3×10^{25} 时达到最大值。由图 3 还可以看出,掺杂 Cu 的浓度较高时,浅中心 Ce 掺杂浓度也必须足够高才能得到足够强的空间电荷场。为此,生长了一批掺杂 Cu 浓度较高的晶体进行对比实验验证。实验条件与第 3 节中验证实验相同。实验中采用的 LN1、LN2 和 LN3 三种晶体的浅中心 Ce 的掺杂浓度均为 $1.86 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$,深中心 Cu 的掺杂浓度分别为 $2.97 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 、 $2.79 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 和 $2.62 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。LN4 的深中心和浅中心的掺杂浓度分别为 $1.57 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 和 $7.66 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。实验中得到的衍射效率曲线如图 4 所示。LN1、LN2 和 LN3 三种晶体记录饱和衍射效率很低,并且经过多次重复实验确认即使经过更长时间预敏化和记录,衍射效率始终在很低数值下振荡,说明浅中心 Ce 浓度太低不利于提高(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体的记录性能。LN4 晶体在双中心记录时得到了很高的饱和衍射效率(60.5%)和记录灵敏度(0.036 cm/J),同时得到了很高固定衍射效率(53.8%),同时对 LN4 晶体的记录过程进行数值模拟,与实验结果也得到了较好的吻合。

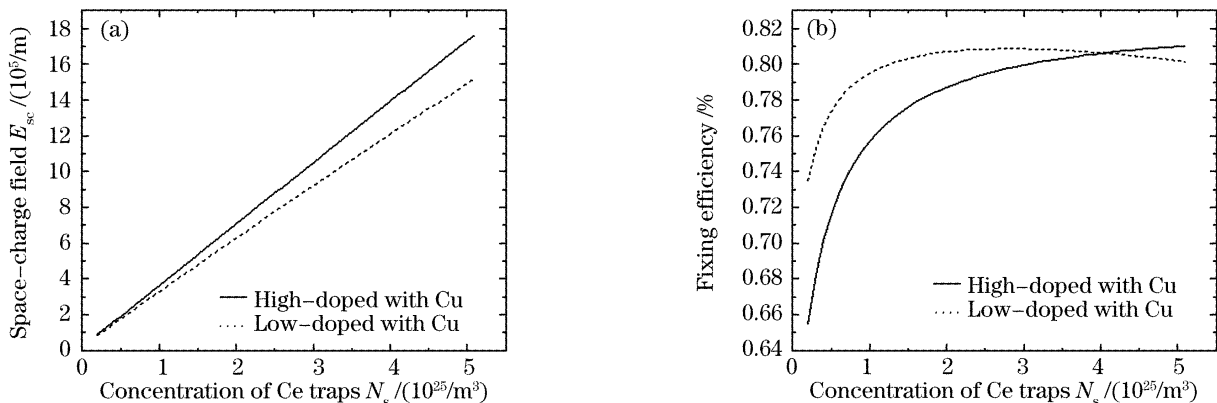


图 3 不同 Cu 掺杂浓度下,(a)饱和空间电荷场,(b)固定效率随浅中心 Ce 掺杂浓度的变化

Fig. 3 Variation of (a) saturable space-charge field and (b) fixing efficiency with the concentration of Ce centers with different Cu centers doping level

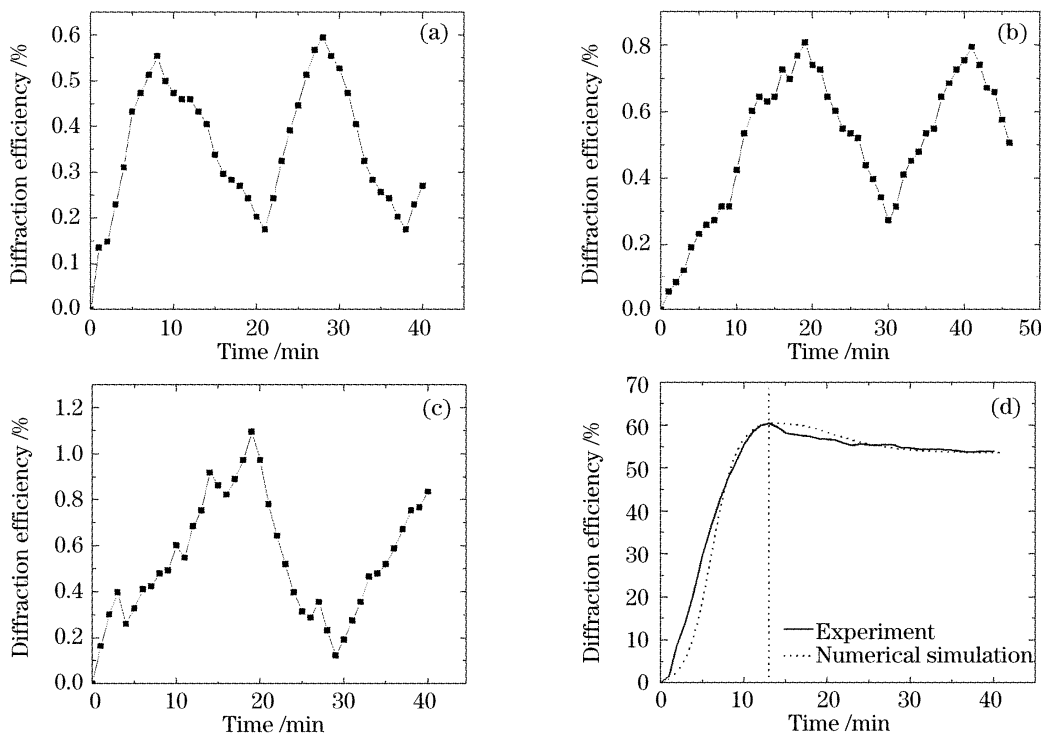


图 4 高掺 Cu 晶体双中心记录曲线。(a) LN1, (b) LN2, (c) LN3, (d) LN4

Fig. 4 Recording curves of crystals with highly doped Cu. (a) LN1, (b) LN2, (c) LN3, (d) LN4

4.3 微观参量对(Ce,Cu):LiNbO₃双中心记录的影响

由于(Ce,Cu):LiNbO₃晶体具有与(Fe,Mn):LiNbO₃等双掺杂晶体不同记录性能,相同实验条件下,根本原因是晶体具有不同的微观参量。微观参量对双中心记录性能的影响相关文献进行了部分讨

论^[3],基于(Fe,Mn):LiNbO₃晶体的微观参量,改变其中个别参量大小来考察其影响,但是并没有详细讨论LiNbO₃晶体中主要载流子运输机理和光生伏特效应的作用。利用本文得到的(Ce,Cu):LiNbO₃晶体微观参量进行数值模拟,我们发现了与

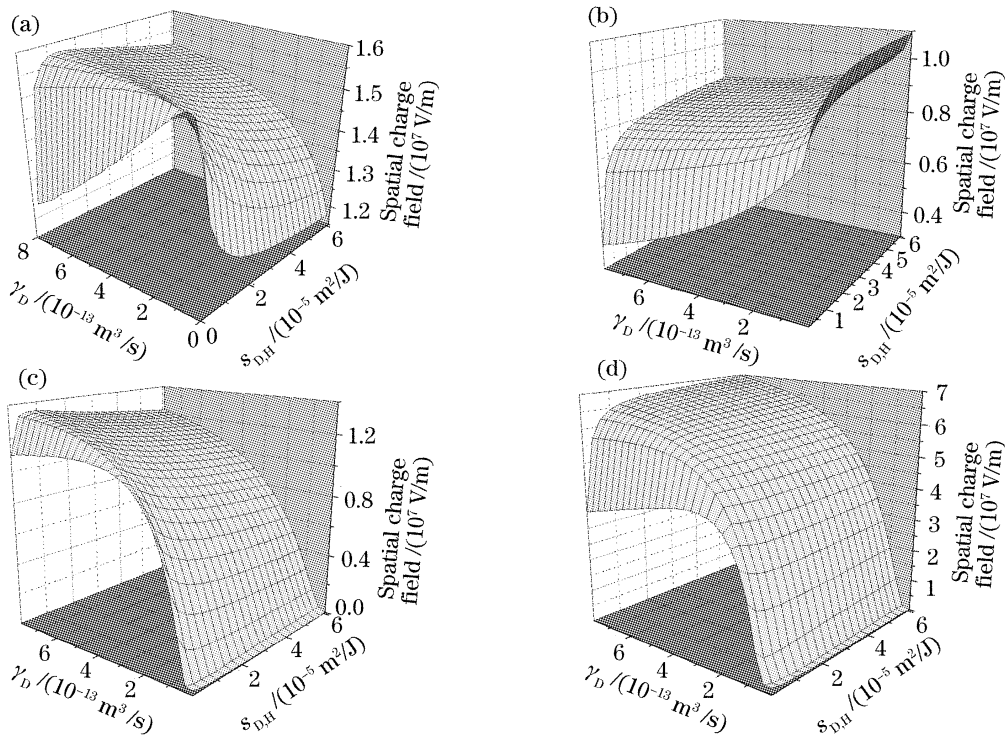


图 5 饱和空间电荷场随 γ_D 和 $S_{D,H}$ 的变化。(a) (Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体, (b) (Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体, 固定空间电荷场随 γ_D 和 $S_{D,H}$ 的变化, (c) (Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体, (d) (Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体

Fig. 5 Variations of saturable space-charge field with γ_D and $S_{D,H}$ (a) for (Ce,Cu):LiNbO₃, (b) for (Fe,Mn):LiNbO₃, variations of fixed space charge field with γ_D and $S_{D,H}$ (c) for (Ce,Cu):LiNbO₃, (d) for (Fe,Mn):LiNbO₃

(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体不同的变化规律。

如图 5 所示,两种晶体空间电荷场随深中心电子复合系数 γ_D 和紫外光激发系数 $S_{D,H}$ 变化表现出不同规律。(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体中, γ_D 很小时,饱和空间电荷场随 $S_{D,H}$ 增大而减小; γ_D 大于某个值时,随 $S_{D,H}$ 增大,饱和空间电荷场先增大再减小;固定空间电荷场也有相同变化规律。在(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体中,饱和空间电荷场随 γ_D 增大而减小,随 $S_{D,H}$ 增大而增大;当 $S_{D,H}$ 很小时,随着 γ_D 增大,固定空间电荷场先增大再减小;当 $S_{D,H}$ 大于某个值时,固定空间电荷场随着 $S_{D,H}$ 增大而增大。进一步分析发现这种不同是由晶体深中心 Cu 和 Mn 在紫

外激发时具有不同的光生伏特系数造成的。如图 6 所示,在(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体中,饱和和固定空间电荷场随光生伏特系数 $-\kappa_{D,H}$ 增大而增大; $-\kappa_{D,H}$ 较小时,饱和空间电荷场随 γ_D 增大而减小, $-\kappa_{D,H}$ 较大,饱和空间电荷场随 γ_D 增大而增大,而固定空间电荷场始终随着 γ_D 的增大而增大; $-\kappa_{D,H}$ 较小,饱和和固定空间电荷场随 $S_{D,H}$ 增大而增大, $-\kappa_{D,H}$ 较大,饱和空间电荷场随 $S_{D,H}$ 先增大再减小。同样的规律在对(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体进行模拟时也可以发现。同样的规律在对(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体进行模拟时也可以发现。

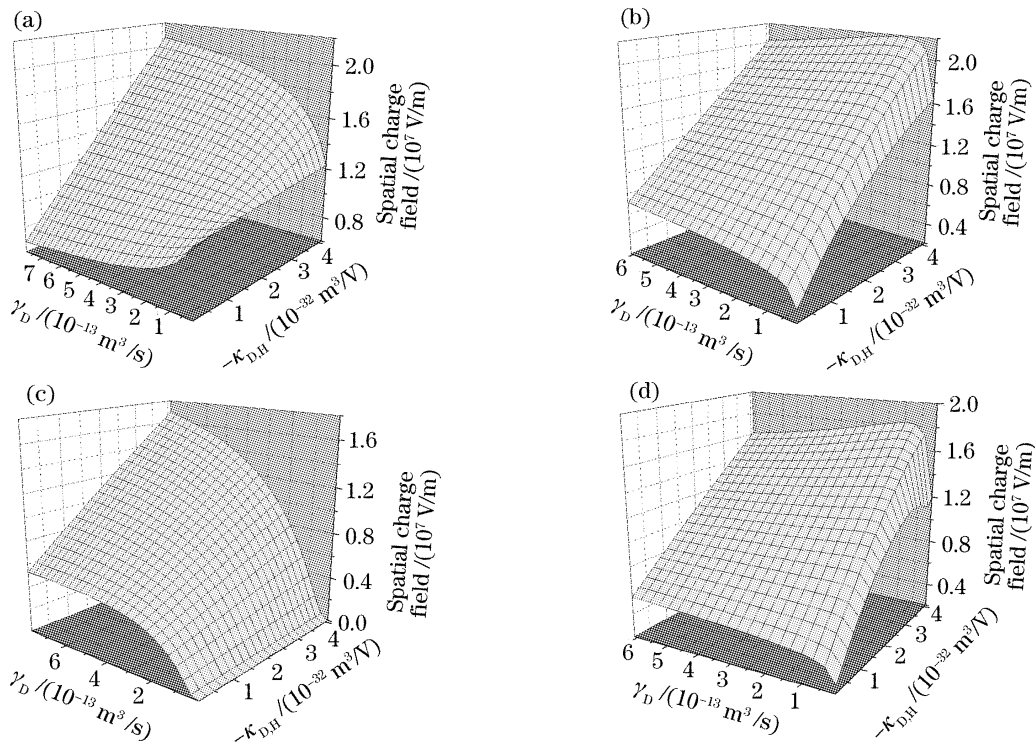


图 6 (Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体饱和空间电荷场(a) 随 γ_D 和 $-\kappa_{D,H}$ 的变化,(b) 随 $S_{D,H}$ 和 $-\kappa_{D,H}$ 的变化,(Ce,Cu):LiNbO₃ 晶体固定空间电荷场 (c) 随 γ_D 和 $-\kappa_{D,H}$ 的变化,(d) 随 $S_{D,H}$ 和 $-\kappa_{D,H}$ 的变化

Fig. 6 Variations of saturable space-charge field for (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal with (a) γ_D and $-\kappa_{D,H}$, (b) $S_{D,H}$ and $-\kappa_{D,H}$, variations of fixed space-charge field for (Ce,Cu):LiNbO₃ crystal with (c) γ_D and $-\kappa_{D,H}$, (d) with $S_{D,H}$ and $-\kappa_{D,H}$

通过模拟发现,深中心紫外光生伏特系数 $-\kappa_{D,H}$ 越强,越有利于在深中心建立起强大的空间电荷场,在固定过程中,深中心的光栅只有一部分被擦除,因此 $-\kappa_{D,H}$ 越强,晶体固定衍射效率也越高。Cu 比 Ce 具有更强的紫外光生伏特系数,而且 Cu 电子复合系数很高。 $S_{D,H}$ 表征的是深中心电子被紫外光激发的能力。 $S_{D,H}$ 太小,导带中电子太少,不利于电子输运; $S_{D,H}$ 太大,深中心电子被迅速激发,深中心俘获的电子数也下降。因此,合适的 $S_{D,H}$ 才可使饱和空间电荷场达到最大值,由于此时饱和空间电荷场主要分布在深中心,固定空间电荷

场也达到最大值。在(Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体中,Fe 比深中心 Mn 具有更强的紫外光生伏特系数,因此 γ_D 越小, $S_{D,H}$ 越大,越有利于建立起强大的饱和空间电荷场,但电子主要分布在浅中心,固定电荷场反而越小;当 $S_{D,H}$ 较大时, γ_D 越大,越有利于深中心建立起更强的空间电荷场,提高固定效率;当 $S_{D,H}$ 较小时,深中心电子激发速率慢, γ_D 太大,降低了导带电子密度,固定空间电荷场降低。

由此,双中心全息记录的双掺杂 LiNbO₃ 晶体可分为深中心主导与浅中心主导两种类型。具有光色效应的(Fe,Mn):LiNbO₃ 以及(Ge,Ni):LiNbO₃

等晶体,记录时电子在敏化光作用下向浅中心迁移,Fe具有较强的光生伏特系数,成为浅中心主导型记录过程,(Ce,Mn):LiNbO₃具有很强的光色效应,但深浅中心的光生伏特系数都较低,空间电荷场很弱,因此饱和固定衍射效率都很低;(Ce,Cu):LiNbO₃晶体对紫外敏化不敏感,但是深中心Cu具有很强的紫外光生伏特系数与电子复合系数,属于深中心主导型记录,在深中心中建立起很强空间电荷场,实现了很高的饱和固定衍射效率。(Fe,Cu):LiNbO₃晶体中Cu和Fe都具有很强紫外光生伏特系数,但是在紫外光作用下呈现漂白效应,即浅中心电子向深中心迁移,当记录光将浅中心电子激发后很快被深中心俘获,不利于空间干涉记录光对电子分布的调制,无法形成更强的空间电荷场,不适用于双中心全息记录。

由分析可以看出,(Ce,Cu):LiNbO₃与(Fe,Mn):LiNbO₃两种晶体的区别在于,被调制的电子空间分布更倾向于存在深中心还是浅中心。而形成这一区别的主要因素是深中心不同的紫外光生伏特系数。深中心光生伏特系数大,则电子分布集中于深中心;深中心光生伏特系数小,则电子分布倾向于浅中心。同时,深中心具有较大的电子复合系数和合适的紫外光激发系数也有利于在深中心中固定更强的空间电荷场。(Ce,Cu):LiNbO₃晶体中,深中心Cu具有更强的一 $\kappa_{D,H}$ 和 γ_D ,因此在双中心记录中通常可以达到很高的饱和和固定衍射效率;(Fe,Mn):LiNbO₃晶体中,深中心Mn对应的一 $\kappa_{D,H}$ 和 γ_D 较低,而且浅中心Fe具有较强的紫外光生伏特系数和电子复合系数,因此深中心空间电荷场较弱,在双中心记录中通常饱和和固定衍射效率较低,并且空间电荷场的固定效率低。

5 结 论

通过分析不同双掺杂LiNbO₃晶体双中心记录特点,推导了(Ce,Cu):LiNbO₃晶体的微观参量。利用这一结果,通过数值求解深中心带输运方程组,对(Ce,Cu):LiNbO₃晶体的双中心全息记录过程进行数值模拟。研究了记录与敏化光强、深浅中心掺杂组分比以及晶体微观参量对(Ce,Cu):LiNbO₃双中心记录的影响,通过与(Fe,Mn):LiNbO₃的双中心记录模拟结果相比较发现,(Ce,Cu):LiNbO₃双

中心记录中深中心Cu具有很强的紫外光生伏特系数,在记录中占优势地位,建立起了很强的空间电荷场,导致了高衍射效率和固定效率。

参 考 文 献

- 1 L. Hesselink, S. S. Orlov, A. Liu *et al.*. Photorefractive materials for nonvolatile volume holographic data storage[J]. *Science*, 1998, **282**(5391): 1089~1094
- 2 K. Buse, A. Adibi, D. Psaltis. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals[J]. *Nature*, 1998, **393**(6686): 665~668
- 3 Ren Liyong, Liu Liren, Liu Dean. Effect of microcosmic optical parameters of doubly doped LiNbO₃ on diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 941~946 (in Chinese)
任立勇,刘立人,刘德安. 双掺杂LiNbO₃微观光学参量对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 941~946
- 4 Xuefeng Yue, A. Adibi, T. Hudson *et al.*. Role of cerium in lithium niobate for holographic recording[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(9): 4051~4055
- 5 Cuixia Dai, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Refractive-index change and sensitivity improvement in holographic recording in (Ce,Cu):LiNbO₃ crystals with green light[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(9): 507~509
- 6 Liyong Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Optimal switching from recording to fixing for high diffraction from a LiNbO₃:Ce:Cu photorefractive nonvolatile hologram [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(2): 186~188
- 7 Ali Adibi, Karsten Buse, Demetri Psaltis. Two-center holographic recording[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(5): 584~601
- 8 De'an Liu, Liren Liu, Liyong Ren *et al.*. Material optimization for low scattering noise during nonvolatile holographic recording in doubly doped LiNbO₃ crystals[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 630~633
- 9 E. Krätzig, H. Kurz. Photorefractive and photovoltaic effects in doped LiNbO₃[J]. *J. Mod. Opt.*, 1977, **24**(4): 475~482
- 10 K. Peithmann, J. Hukriede, K. Buse *et al.*. Photorefractive properties of LiNbO₃ crystals doped by copper diffusion [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(7): 4615~4620
- 11 Yunping Yang, Demetri 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
- 12 Li Dashan, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Photorefractive grating dynamics under large modulation and strong applied electric field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 148~154 (in Chinese)
李大汕,刘立人,刘德安等. 强外加电场与大调制度下光折变动力学光栅形成研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 148~154
- 13 Liyong Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Experimental and theoretical study of non-volatile photorefractive holograms in doubly doped LiNbO₃:Fe:Cu[J]. *Opt. Mater.*, 2003, **23**(1): 261~267
- 14 Youwen Liu, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Intensity dependence of two-center nonvolatile holographic recording in LiNbO₃:Cu:Ce crystals[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(1): 339~343
- 15 Qianmin Dong, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Effect of dopant composition ratio on nonvolatile holographic recording in LiNbO₃:Cu:Ce crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5016~5022