

# Ce : Fe : LiNbO<sub>3</sub> 在红光波段的光折变特性 \*

李艳秋 边少平 孙万钧 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

李铭华 徐玉恒

(哈尔滨工业大学应用化学系, 哈尔滨 150001)

**提要** 研究了掺铈、铁 LiNbO<sub>3</sub>(简称为 Ce : Fe : LN)晶体在 633 nm 波段的光折变特性,其光折变灵敏度约为 400 mJ/cm<sup>2</sup>,指数增益系数约为 45 cm<sup>-1</sup>。用该晶体记录的傅里叶变换全息图分辨率超过 70 lp/mm。

**关键词** 铈酸锂, 光折变, 全息图

掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 光折变晶体作为优良的光全息实时记录材料其性能已被广泛研究<sup>[1~3]</sup>。但这些研究主要是在氩离子激光器的 488 nm 或 515 nm 波段。因为在这两个波段 LN 晶体有较强的光吸收。近来的实验表明<sup>[4]</sup>,掺铈离子可改善 LN 晶体的全息成像质量,并仍保持较高的灵敏度。因此,在 LN 晶体中同时掺杂铈离子和铁离子将有可能保持 LN 晶体高灵敏度并同时使 LN 晶体有很好的全息成像质量。双掺杂(如同时掺铈和铁离子)LN 晶体经还原处理,引进了新的杂质能级,改变了其吸收谱,使其在实用的 He-Ne 激光波长(633 nm)有适当的吸收,因此改善了 LN 晶体在该波段的光折变特性。

## 1 晶体材料准备及吸收光谱

本文所用的双掺杂 LN 晶体是用提拉法生长的。掺铈、铁离子的浓度各为 Ce:  $4 \times 10^{-4}$  mol, Fe:  $7 \times 10^{-4}$  mol。将晶片埋在 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 粉中,还原温度为 500 °C,保持时间为 24 h,晶体呈暗红色。用分光光度计测得其吸收谱,见图 1。图中同时给出了单掺铁 LN 晶体的吸收谱。由图可见,与单掺铁 LN 晶体相比,掺铈、铁离子使该晶体在 633 nm 波长附近吸收有增加,吸收系数为 3.2 cm<sup>-1</sup>。吸收增加的原因是由于随着还原程度的加深,晶体中离子浓度比(Fe<sup>+2</sup>/Fe<sup>+3</sup> 和 Ce<sup>+3</sup>/Ce<sup>+4</sup>)增加。因此,在光照射下,低价离子(Fe<sup>+2</sup>, Ce<sup>+3</sup>)吸收光子变成高价离子(Fe<sup>+3</sup>, Ce<sup>+4</sup>)。本实验所用晶体沿 a 面切割,抛光后的尺寸为 20 × 30 × 1 mm。

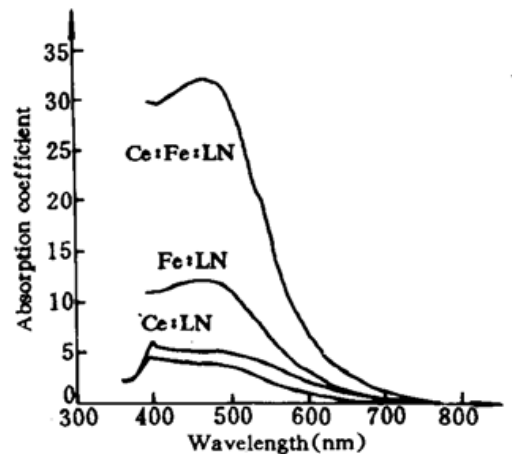


Fig. 1 Absorption spectra of Ce : Fe : LN

\* 863 高技术和哈尔滨工业大学科研基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 8 月 7 日; 收到修改稿日期: 1995 年 10 月 30 日

## 2 二波耦合实验

实验装置如图 2 所示。二波耦合实验是研究光折变材料光折变性能的基本实验,二波耦合指数增益系数是光折变能量转移能力的标志。由 Kukhtarev<sup>[5]</sup> 模型,它的大小可表示为  $\Gamma = 1/d \ln[I_2 I_{10}/I_1 I_{20}]$ ,其中,  $d$  是晶体厚度,  $I_{10}, I_{20}$  是两入射光的强度,  $I_1, I_2$  是两入射光透过晶体的强度。当泵浦光的强度为  $312 \text{ mW/cm}^2$ , 光束比为  $\beta = 1500$  时,  $\Gamma$  随两入射光束夹角的关系如图 3 所示。结果表明,晶体的能量转移能力较强,且有很大的角度响应范围。

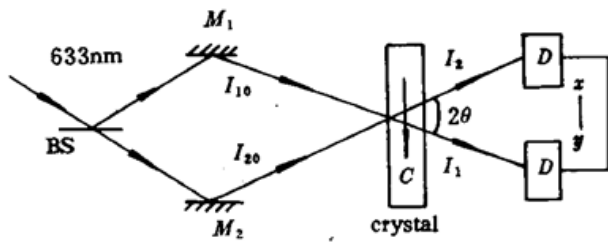


Fig. 2 Experimental setup of two wave-coupling.  $2\theta$  is the angle included between  $I_1$  and  $I_2$

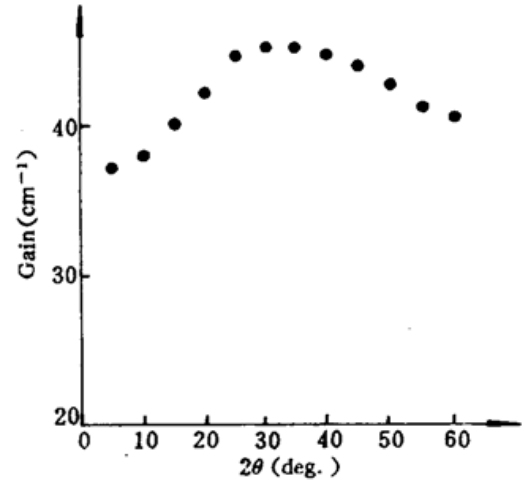


Fig. 3 Gain vs  $2\theta$  defined in Fig. 2

## 3 衍射效率

衍射效率的测量采用两  $e$  光干涉记录全息图方法。光源为 He-Ne 激光, 波长为  $633 \text{ nm}$ 。入射到晶体上的两光束偏振方向及晶体  $c$  轴均在入射面内。记录全息图的两光束功率均为  $3.5 \text{ mW}$ 。光束是高斯光束, 光束截面直径为  $1.8 \text{ mm}$ 。所以, 两光束总光强为  $322 \text{ mW/cm}^2$ 。测量时不计晶体的菲涅耳反射和吸收, 即衍射效率定义为衍射光与无光栅时晶体透过的再现光强之比。测量的衍射效率  $\eta$  与两记录光束夹角  $2\theta$  及记录光栅的间距  $\Lambda = \lambda/2\sin\theta$  的对应关系如图 2 所示。可见该晶体在很大的记录夹角范围内都有较高的衍射效率。最大衍射效率为  $85\%$ 。在此光强下达到饱和衍射效率需要的时间为  $150 \text{ s}$ 。对应曝光量为  $400 \text{ mJ/cm}^2$ 。图 3 给出了  $2\theta = 60^\circ$  时的衍射效率随曝光量变化的测量结果。

## 4 记录灵敏度

描述光折变晶体记录灵敏度的一个指标是记录全息光栅达到  $1\%$  的衍射效率对应的曝光量  $\phi$ 。记录全息图的两光束同前, 两束光总光强均为  $322 \text{ mW/cm}^2$ , 选择两记录光夹角  $2\theta = 60^\circ$ , 测量到的全息图光栅达到  $1\%$  的衍射效率对应的曝光量约为  $500 \text{ mJ/cm}^2$ 。这个结果虽然比其在蓝绿光波段 ( $488 \text{ nm}, 515 \text{ nm}$ ) 的典型曝光量 (约为  $160 \text{ mJ/cm}^2$ ) 大三倍左右, 但仍有相同的数量级。实验中也观察到响应时间 (或灵敏度) 的光强增强效应, 即响应时间 (或灵敏度) 与光强成反比的效应。由于 LN 晶体对红光 ( $633 \text{ nm}$ ) 的吸收比对蓝绿光的吸收要小, 测量结果表明 LN 晶体在红光波段仍有较高的量子效率 (即每吸收一个光子所激发到导带中去的电子数)。

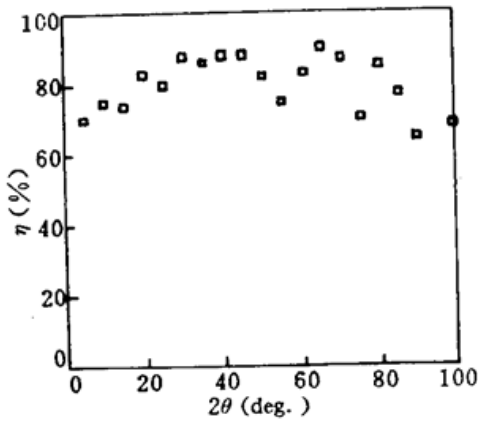
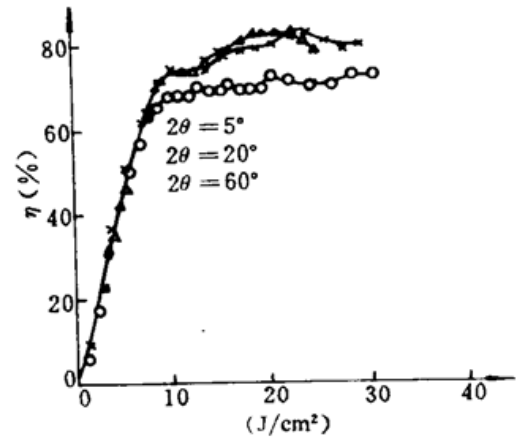
Fig. 4 Diffraction efficiency  $\eta$  vs  $2\theta$ 

Fig. 5 Diffractive efficiency vs exposure

## 5 记录全息图分辨率

对于 LN 材料的分辨率理论上由材料掺杂的杂质离子的密度确定<sup>[7]</sup>。一般的掺杂浓度都可以使 LN 材料获得每毫米数千条条纹的记录分辨率。可以满足全息图记录的要求。对于实际的光学处理系统其所能记录及再现的全息图像的分辨率与具体的实验配置有关。对于通常应用的傅里叶变换全息图记录装置,如图 6 所示,其分辨率与全息记录材料的宽度  $D_H$  有关。假定透镜口径较大,则它所能记录的物的最高空间频率(即物最小分辨距离的倒数)为  $\nu = D_H/2f\lambda$ 。实验中所用透镜焦距为  $f = 10$  cm,全息图有效尺寸(即记录物光束与参考光相重合的区域尺寸)取  $D_H = 1$  cm,  $\lambda = 633$  nm,则理论分辨率为  $\nu = 78$  lp/mm(line pair/mm)。

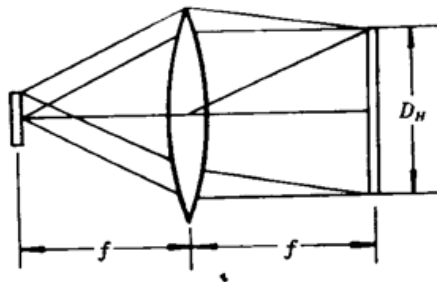


Fig. 6 Fourier holographic transformation

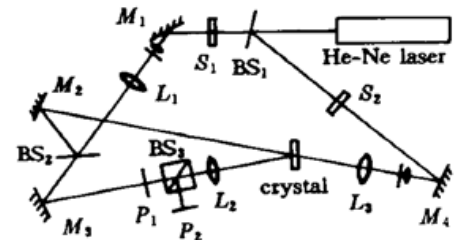


Fig. 7 Experimental setup

实验测量装置如图 7 所示。记录时开关  $s_1$  开启,  $s_2$  关闭,  $P_1$  平面上放置分辨率板作为物。其傅里叶变换谱与平行参考光干涉形成的干涉条纹被放置在焦面上的 Ce:Fe:LN 晶体记录。再现时开关  $s_1$  关闭,  $s_2$  开启, 以平行光共轭再现。再现的全息共轭像经分束镜  $BS_3$  反射到输出像面  $P_2$  上。图 8 是在  $P_2$  平面上拍摄到的全息共轭像的 50 倍放大照片。从图中看出可分辨的图形分辨率为 70 lp/mm, 与理论计算相符。

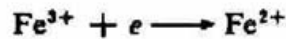
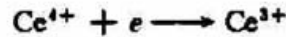
## 6 分析和讨论

本文的实验研究表明, Ce:Fe:LN 在红光波段有较高的灵敏度、大的指数增益系数和衍射效率及很高的全息图像分辨率, 同时, 实验研究结果也表明, 由于同时掺入铈、铁离子也改善了 LN 晶体的成像质量。Ce:Fe:LN 晶体的光折变机制仍是一个有待研究的较复杂的问题, 文献[4]曾给出初步的讨论。由于 LN 晶体是没有反演对称中心的晶体, 在光照射下有很强的体光生伏达效应, 它产生的很强内电场( $10^4 \sim 10^5$  cm<sup>-1</sup>)对光折变效应贡献很大, 铈离子的掺

入,引入了新的杂质能级。在 Ce : Fe : LN 晶体中存在  $Ce^{3+}$ ,  $Ce^{4+}$ ,  $Fe^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  离子,因此仍可以设想该晶体的光激发电子迁移过程包括:



即铁离子和铈离子都有电子被激发到导带。这些电子通过扩散、漂移等传递机制到达低光照区被  $Ce^{4+}$  和  $Fe^{3+}$  陷阱俘获即有如下过程电子的过程。



从掺入铈离子引起 LN 晶体吸收谱的变化(不只是改变背景整体吸收,见图 1),可以证明这些激发、俘获过程的存在。

本文的实验研究表明,重还原 Ce : Fe : LN 使晶体的杂质离子浓度比  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  及  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  增加,从而增加有利于实现光折变效应的电子施主浓度和受主陷阱浓度,使得 Ce : Fe : LN 在红光波段有较高的灵敏度和衍射效率。同时,由于同时掺入 Ce 和 Fe 离子,改善了 LN 晶体的成像质量和抗擦除性能。此特点有利于晶体作为存储多幅图像的全息记录介质使用。

### 参 考 文 献

- 1 J. J. Amodi, W. Phillips, L. Steabler. Improved electrooptic materials and fixing techniques for holographic recording. *Appl. Opt.*, 1972, 11 : 390
- 2 D. L. Staebler, W. Phillips. Fe : Doped LiNbO<sub>3</sub> for read-write applications. *Appl. Opt.*, 1974, 13 : 788
- 3 W. Phillips, J. J. Amodi, D. L. Staebler. Optical and holographic storage properties of transmission metal doped lithium niobate. *RCA. Review*, 1972, 33 : 94
- 4 李铭华, 王福平, 徐玉恒 等. Ce : Fe : LiNbO<sub>3</sub> 晶体光折变效应的研究. *高技术通讯*, 1991, 5 : 9
- 5 N. V. Kukhtarev et al. Holographic storage in electrooptic crystal. *Ferroelectrics*, 1979, 22 : 949~996
- 6 J. J. Amodi etc. *RCA. Review*, 1971, 32 : 185

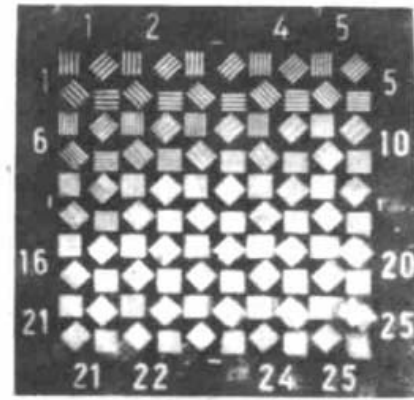


Fig. 8 Hologram of a resolution plate

## Photorefractive Properties of Heavily Reduced Ce : Fe : LiNbO<sub>3</sub> at 633 nm

Li Yanqiu Bian Shaoping Sun Wanjun Xu Kebin

(Harbin Institute of Technology, Department of Applied Physics, Harbin 150001)

Li Minghau Xu Yuheng

(Harbin Institute of Technology, Department of Applied Chemistry, Harbin 150001)

**Abstract** Photorefractive properties of heavily reduced Ce : Fe : LiNbO<sub>3</sub> at 633 nm have been studied. The photorefractive sensitivity of this crystal is about 400 mJ/cm<sup>2</sup>. The two-beam coupling constant is about 45 cm<sup>-1</sup>. The resolution of a Fourier transform hologram recorded with this kind of crystal reaches 70 lp/mm.

**Key words** LiNbO<sub>3</sub>, photorefractive, hologram