

# Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体光衍射效应的研究\*

李铭华 韩爱珍 徐玉恒

(哈尔滨工业大学应用化学系, 哈尔滨 150001)

王家昌 张景文 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 减小 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶片的厚度, 扩大泵浦光束直径, 由于光爬行效应晶体产生衍射自增强。单光束辐照 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体时, 出现变偏振现象(○光变 e 光, e 光变 ○光)等各向异性自衍射。本文对上述现象的形成机理进行了探讨。

**关键词** Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 衍射, 光爬行, 变偏振。

## 1 引 言

在铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)中掺入 0.10 mol% CeO<sub>2</sub> 和 0.05 mol% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 生长的 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 是一种性能优良的光折变晶体材料, 其二波耦合指数增益系数达 30 cm<sup>-1</sup>, 四波混频位相共轭反射率达 1000% 以上, 已用于光学全息关联存储实验<sup>[1, 2]</sup>。在还原的 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体上, 作者在二波耦合实验中还观察到薄晶片的衍射自增强现象。另外, 用单光束照射该晶体时, 产生了光致各向异性自衍射现象, 即 ○光变 e 光, e 光变 ○光的 90° 变偏振现象。本文对 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的上述衍射效应的形成机理进行了理论探讨。

## 2 二波耦合衍射自增强

### 2.1 实 验

二波耦合实验光路如图 1 所示。以 Ar<sup>+</sup> 激光器作光源, 输出波长 488.0 nm, 偏振方向在入射平面内。当两束光以 2θ 角入射在光折变晶体上时, 在晶体中形成折射率光栅。当两束光照射了一段时间, 光栅已形成后, 挡住信号光 I<sub>20</sub>, 则可测出泵浦光 I<sub>10</sub> 在 I<sub>2</sub> 方向上的衍射光强 I<sub>2</sub>。衍射效率 η 定义为衍射光强 I<sub>2</sub> 与光栅不存在时 I<sub>20</sub>

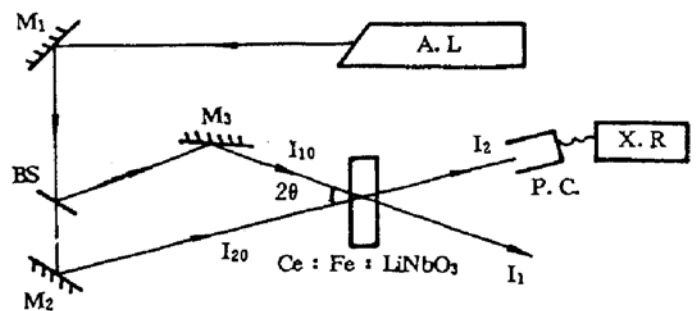


Fig. 1 Experimental setup for two-beam coupling

A: Ar<sup>+</sup> laser, M: reflector, BS: beam splitter, P. C.: photodiode, X. R.: X-Y recorder, I<sub>10</sub>: pump beam, I<sub>20</sub>: signal beam

\* 国家自然科学基金和航天基金资助项目。

\*\* 本工作由哈尔滨工业大学应用化学系和应用物理系等量工作, 共同执笔, 两单位排名并列。

收稿日期: 1994年11月27日; 收到修改稿日期: 1995年3月25日

的透射光强  $I_2$  之比, 即

$$\eta = I_2/I_1 \times 100\%$$

为使两束光充分耦合, 将泵浦光束扩束, 使其直径  $D = 5.0 \text{ mm}$ , 信号光束直径  $d = 1.0 \text{ mm}$ , 晶片尺寸  $10 \times 1 \times 10 \text{ (mm}^3\text{)}$ ,  $Y$  面通光。  $I_{10} = I_{20} = 2.89 \text{ W/cm}^2$ , 测得  $\eta$  与  $2\theta$  角的依赖关系如图 2 所示。其中  $\eta_{\text{max}}$  可达 95%, 在  $2\theta$  角从  $5^\circ$  到  $90^\circ$  的范围内,  $\eta$  皆高于 80%, 表明  $\eta$  具有较宽的  $2\theta$  角度响应范围。从光照开始, 到  $\eta$  达稳定值所需的响应时间约为  $2 \sim 3 \text{ min}$ , 与  $\text{Fe:LiNbO}_3$  晶体的响应速度相当。衍射效率  $\eta$  随时间  $t$  的实验曲线如图 3 所示。当  $\eta$  值达 45% 后, 挡掉  $I_{20}$ ,  $I_{10}$  在  $I_2$  方向发生衍射自增强, 当  $t = 350 \text{ s}$  时,  $\eta$  达 95%。而对于晶片厚度为  $2.5 \text{ mm}$ , 泵浦光直径  $D = 1.0 \text{ mm}$  的晶体, 不发生衍射自增强, 最高衍射效率只达到 80%。

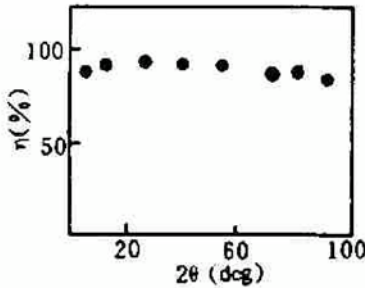


Fig. 2 Experimental curve of  $\eta$ - $2\theta$

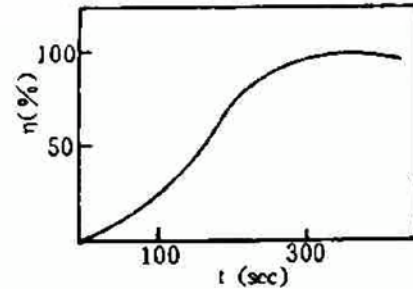


Fig. 3 Experimental curve of  $\eta$ - $t$

### 2.2 理论探讨

1987 年, 张光寅等人<sup>[3]</sup>在  $\text{Fe:LiNbO}_3$  薄晶片上观察到沿晶体的光轴  $\pm c$  方向, 出现爬行的光散射, 称之为“光爬行效应”, 它可以将入射光的能量带到非光照区。光爬行效应产生的机制是由于在薄晶片中, 存在着大于全反射角的散射光, 这些大角度散射光在辐照区内多次反射穿行, 沿着光轴曲折前进。作者在厚度为  $1.0 \text{ mm}$  的  $\text{Ce:Fe:LiNbO}_3$  晶体上, 当泵浦光直径  $D = 5.0 \text{ mm}$  时, 在晶体侧面观察到了很强的近  $90^\circ$  大角度散射光, 如图 4 所示。其产生原因是, 当较强的泵浦光入射, 且光束直径  $D$  大于晶片厚度  $\delta$  时, 满足全内反射条件的大角度散射光, 可在晶体内表面多次反射, 沿着晶体的  $\pm c$  轴方向曲折前进, 如图 5 所示, 此即光爬行效应。这种爬行光亦可再散射, 再散射光在晶面上不满足全内反射条件, 即泄漏出去, 产生如图 4 所示的现象。

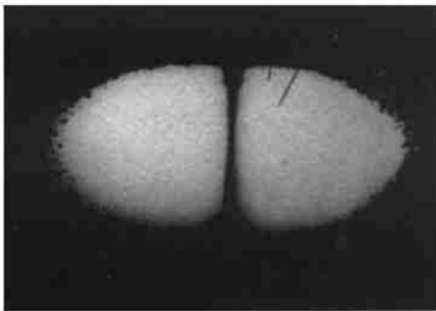


Fig. 4 Large-angle scattering light (The photograph was taken in the X-Y plane, perpendicular to the C-axis)

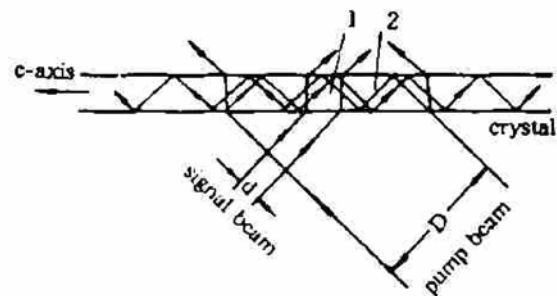


Fig. 5 Schematic of the light crawling and two-beam coupling  
1. area of two beams meet, 2. area of the pump beam light

这些大角度散射光在折回前进时, 与大截面的泵浦光发生能量耦合, 不断得到放大, 同

时将泵浦光的能量从一个区域转移到另一个区域。由于光爬行效应,小截面的信号光不仅与直接相遇的泵浦光发生耦合(图 5(1)区域内),获取能量,同时可与不直接相关的其它区域的泵浦光发生耦合,此时信号光是与多个泵浦光束作用,从而使衍射效率增加。另外由于爬行光是源于晶体内普遍存在着的散射光,所以无论光束入射角  $2\theta$  如何变化,只要泵浦光束截面足够大,均能产生光爬行耦合,因此  $\eta$  的  $2\theta$  角度响应范围较宽。

### 3 各向异性自衍射

#### 3.1 实验

当用单束波长为 488.0 nm 的 Ar<sup>+</sup> 激光辐照 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体时,观察到 90° 变偏振现象,即 o 光变 e 光, e 光变 o 光。实验装置如图 6 所示。

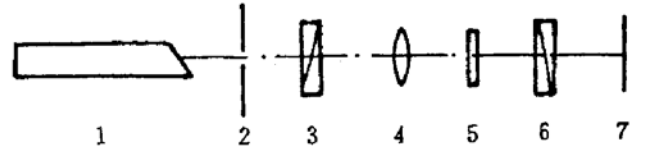


Fig. 6 Experimental setup for the light polarization variation

- 1. Ar<sup>+</sup> laser, 2. light diaphragm, 3. polarizer, 4. lens, 5. Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub>, 6. analyzer, 7. screen

##### 3.1.1 o 光变 e 光自衍射

Ar<sup>+</sup> 激光通过棱镜,以垂直于晶体光轴的偏振方向入射到 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶片上,首先,透射光沿平行于 C 轴的方向逐渐散开,由弱变强(图 7a);然后逐渐减弱,并发生弥散,同时在垂直于 C 轴的方向上出现散射光,开始也是弥散的,逐渐跳跃性地增强(图 7b);最后只剩下垂直于 C 轴方向的扇形光象(图 7c)。

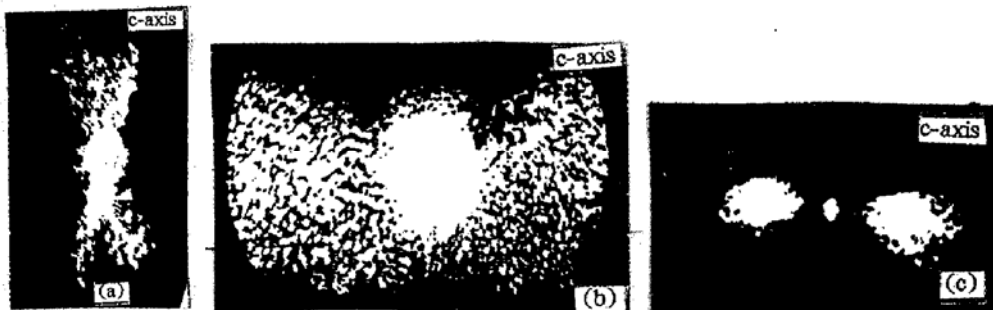


Fig. 7 Changing process from o-light to e-light in Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub>

##### 3.1.2 e 光变 o 光自衍射

当入射光的偏振方向平行于 C 轴时,观察到图象如图 8 所示。其特征为一圆环,且在 C 方向上有两个缺口,圆环里面为沿 C 轴方向的散射光斑。

#### 3.2 理论探讨

光折变晶体的各向异性自衍射是很复杂的光散射过程,作者首先提出下面两个假设:(1)在光折变晶体中,o 光和 e 光不能形成位相噪音栅<sup>[4]</sup>;(2)在入射光束的初始散射光中,产生 90° 变偏振。

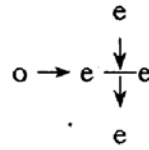
##### 3.2.1 o 光变 e 光

Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体中 o 光变 e 光,主要有下面两种散射方式:

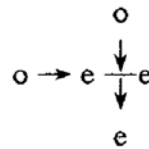


Fig. 8 Photograph of the change from e-light to o-light

1) o 光入射后, 产生初始散射光 e 光, e 光建立起位相噪音栅, 对 e 光进行衍射。散射光中 e 光逐渐示强, 开始沿 C 轴传播。简记为



2) 初始散射光中的 e 光建立起位相噪音栅, 对 o 光进行各向异性散射。简记为



光照开始时, 初始散射光 e 光在平行于 C 轴方向上建立的光栅很强, 而在垂直于 C 轴的方向上很弱, 如图 9(a)所示, 这时 e 光主要沿 C 轴方向传播。与此同时过程(2)产生的 e 光沿垂直于 C 轴方向传播, 并在垂直于 C 轴的方向建立光栅, 此光栅对主光束 o 光产生各向异性散射, 散射光沿垂直于 C 轴的方向传播, 散射的 e 光又进一步在垂直于 C 轴的方向建立光栅, 如图 9(b)所示。由于这两个方向的干涉相互干扰, 使两个方向的 e 光光斑发生弥散。经过一段时间后, 垂直于 C 轴的光栅占优势, 如图 9(c)所示, 这样就对 C 轴方向的 e 光光栅产生擦除作用, 即把衍射能量都转移到垂直于 C 轴的方向上。这就是图 7 所示的 o 光变 e 光过程。

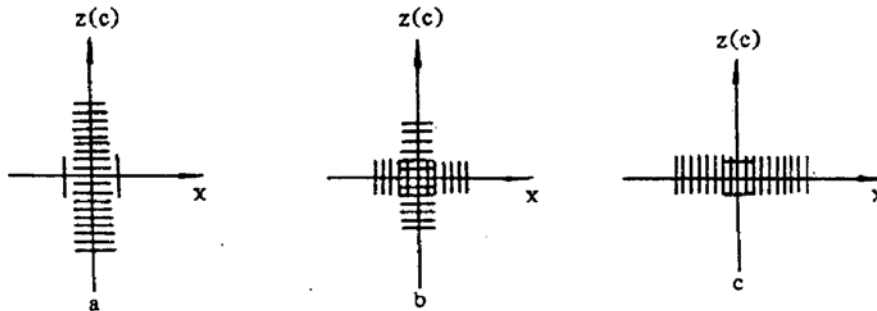


Fig. 9 Raster change in the process from o-light to e-light

### 3. 2. 2 e 光变 o 光

利用时间分辨简并四波混频, 可解释如图 8 所示的 e 光变 o 光的圆环。在这种各向异性自衍射中, 时间分辨简并四波混频的位相匹配条件应该满足:

$$K_s = K_r \pm (K_l - K'_s)$$

其中  $K_s$  为自衍射 o 光波矢,  $K_r$  为  $t = 0$  时刻入射 e 光的波矢,  $K'_s$  为  $t = 0$  时刻晶体的初始散射光波矢,  $K_l$  为  $t = t'$  时刻入射 e 光的波矢。应用 Ewald 作图法<sup>[4]</sup>解出  $K_s$  如图 10 所示。由于  $K_s = 2\pi n_o/\lambda$ ,  $K_r = 2\pi n_e/\lambda$ ,  $K'_s = 2\pi n_e/\lambda$ ,  $K_l = 2\pi n_o/\lambda$ , 图 10 中  $OA'O'A$  为一平行四边形,  $K = K'$ , 即时间分辨简并四波混频的位相匹配条件自动满足。e 光变 o 光的散射光的波矢端点轨迹是以  $AA'$  为直径的圆, 其空间张角可算得为  $26^\circ 38'$ , 与实验(图 8)中的测得值  $26^\circ$  符合得很好。

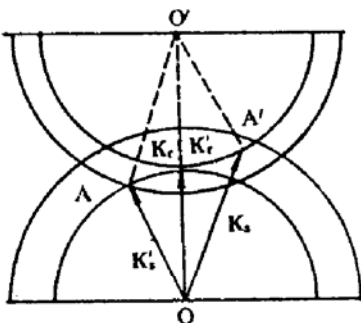


Fig. 10  $K_s$  solution obtained with Ewald sphere

## 参 考 文 献

- [1] 李铭华, 贾晓林, 强亮生等, Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的全息存储和相位共轭特性的研究. 光学学报, 1993, 13(3): 229~233
- [2] 李铭华, 贾晓林, 徐玉恒等, Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的生长及其存储特性的研究. 硅酸盐学报, 1994, 22(2): 129~133
- [3] 张光寅, 武原庆, 刘思敏等, LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体薄片中的光爬行效应. 中国激光, 1987, 14(8): 511~513
- [4] 吴仲康, 王进雄, 张光寅等, LiNbO<sub>3</sub>:Fe 的光致光衍射. 物理学报, 1987, 36(9): 1203~1208

### Study on the Light Diffraction Effect in Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> Crystal\*

Li Minghua    Han Aizhen    Xu Yuheng

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

Wang Jiachang    Zhang Jingwen    Xu Kebin

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

(Received 27 November 1994; revised 25 March 1995)

**Abstract** The self-enhancement of diffraction was obtained due to the light crawling effect by reducing the thickness of the Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> and by increasing the diameter of the pump beam. Lighting the crystal by a single beam, the phenomena of variation of the light polarization, i. e. the anisotropy self-diffraction from o-light to e-light or from e-light to o-light were observed, and the mechanism was discussed.

**Key words** Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystal, diffraction, light crawling, variation of the polarization.

\* This work was supported by the Nature Science Foundation of China and the Space Foundation.