

# 载流子浓度对光折变 $\text{LiNbO}_3$ 晶体 二波耦合增益的影响\*

张洪喜 强亮生 徐崇泉 徐玉恒

(哈尔滨工业大学应用化学系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

张景文 边少平 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 根据光折变微观机制和 Kukhtarev 带导模型, 分析了  $\text{LiNbO}_3$  晶体二波耦合系数与载流子浓度的关系. 结果表明二波耦合系数随载流子浓度的升高而增大, 并逐渐趋于一稳定值. 测量了不同 Ce 掺杂浓度  $\text{Ce:LiNbO}_3$  晶体二波耦合指数增益与载流子浓度的关系, 实验结果与理论分析一致.

**关键词** 光折变, 二波耦合, 载流子浓度.

## 引言

$\text{LiNbO}_3$  晶体是目前研究和应用较广的光折变材料之一, 其特点是非线性增益较高, 易于掺杂. 继  $\text{Fe:LiNbO}_3$  后, 又发展了  $\text{Ce:LiNbO}_3$ <sup>[1,2]</sup> 及其它双掺杂  $\text{LiNbO}_3$ <sup>[3~5]</sup> 材料. 根据光折变的微观机制<sup>[6,7]</sup>, 光照时施主缺陷释放出的载流子在光斑边缘被俘获, 产生周期性空间电荷分布, 并导致空间电荷场的形成. 该空间电荷场通过电光效应调制晶体折射率, 即产生光折变. 本文根据带导模型分析了光折变  $\text{LiNbO}_3$  中载流子浓度与二波耦合系数的关系, 并测量了不同 Ce 掺杂浓度时  $\text{Ce:LiNbO}_3$  晶体的二波耦合指数增益, 实验结果与理论分析一致.

## 1 理论分析

根据光折变的微观机制和 Kukhtarev 的带导模型, 在图 1 所示的光学配置下, 两相干光束在光折变介质中耦合, 并产生能量转移. 其耦合系数为<sup>[8]</sup>

\* 国家自然科学基金资助项目  
本文 1993 年 10 月 4 日收到

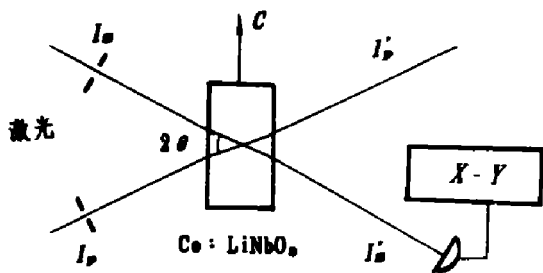


图 1 二波耦合示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for two-wave coupling

$$\Gamma = -2\delta \frac{E_D E_P (E_P + E_D + E_A^2/E_P)}{(E_D + E_P)^2 + E_A^2}, \quad (1)$$

其中

$$\delta = -\frac{\pi n_e^3}{\lambda} \gamma_{33} \cos \theta \left( 1 - \frac{n_0^2 \gamma_{13}}{n_e^2 \gamma_{33}} \tan^2 \theta \right). \quad (2)$$

为表征 LiNbO<sub>3</sub> 电光特性系数, 式中  $\gamma_{13}$ 、 $\gamma_{33}$  为晶体电光系数,  $n_0$ 、 $n_e$  为晶体折射率,  $\theta$  为晶体中两光束夹角的一半,  $E_A$  为外加电场. 式 (1) 中  $E_D$  和  $E_P$  分别为

$$E_D = \frac{4\pi k_B T \sin \theta}{\lambda e}, \quad (3)$$

$$E_P = \frac{e N_D \lambda}{4\pi \epsilon_0 \epsilon \sin \theta}. \quad (4)$$

这里  $N_D$  为载流子浓度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $\lambda$  为入射光波长,  $\epsilon_0$  和  $\epsilon$  分别为真空和相对介电常数.

对于光折变 LiNbO<sub>3</sub>, 外加电场  $E_A = 0$ , 式 (1) 可简化为

$$\Gamma = -2\delta \frac{E_P E_D}{E_P + E_D}. \quad (5)$$

由式 (3)~(5) 可见, 二波耦合系数与光束夹角和载流子浓度有关. 将 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的有关系数  $n_e = 2.250$  ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) 或  $n_e = 2.200$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )、 $n_0 = 2.353$  ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) 或  $n_0 = 2.293$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )<sup>[9]</sup>、 $\gamma_{13} = 8.0 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 、 $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 、 $T = 298 \text{ K}$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 代入式 (2)~(4), 并设  $\theta = 3.5^\circ$ , 得到  $\Gamma - N_D$  理论曲线如图 2 所示.

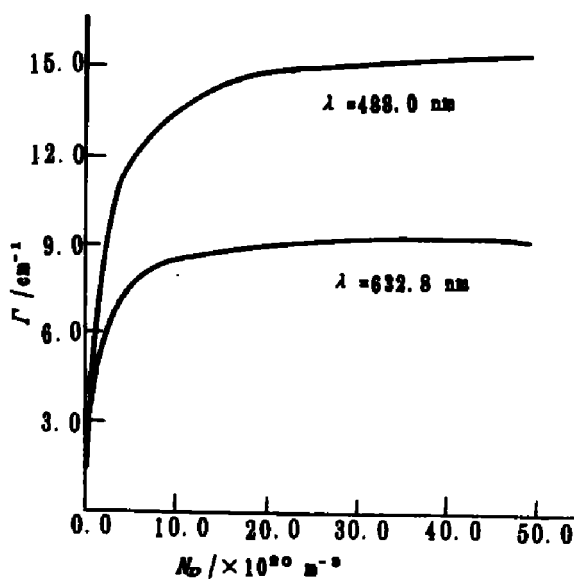


图 2 二波耦合增益系数与载流子浓度的理论关系

Fig. 2 The theoretical relationship between two-wave coupling gain coefficient and carrier concentration

## 2 实验

测量 Ce:LiNbO<sub>3</sub> 二波耦合增益系数与载流子浓度关系的实验装置同图 1. 其中样品厚度均为 1.8 mm, 置于 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 粉末中在 550 $^\circ\text{C}$  温度下还原处理, 以使 Ce<sup>4+</sup> 转化为 Ce<sup>3+</sup>.

实验中, 以 He-Ne 632.8 nm 激光为光源 ( $e$  偏振), 固定泵浦光  $I_P = 478 \text{ mW/cm}^2$ , 信号光  $I_s = 3.2 \text{ mW/cm}^2$ , 光束比  $I_P/I_s = 150$ . 由于  $I_P/I_s \gg 1$ , 二波耦合增益系数  $\Gamma$  可按下列式计算:

$$\Gamma = \frac{1}{d} \ln \frac{I'_s}{I_s} \quad (6)$$

式中  $d$  为晶体厚度,  $I'_s$  为耦合后信号光强. 由式 (5) 可知, 当  $E_P = E_D$  时,  $\Gamma$  达最大值.

因而由  $\Gamma - \theta$  实验曲线得到最大增益对应的晶体两光束夹角  $2\theta$ , 进而通过式 (3)、(4) 求出晶体中有效载流子浓度  $N_D$ .  $\Gamma - N_D$  实验曲线如图 3 所示.

由图 2 和 3 可见实验结果与理论分析基本一致, 即随着载流子浓度的升高, 二波耦合增益系数增大, 并逐渐趋于稳态值.

实验发现, 当掺杂浓度过高和过度还原处理时, 晶体性能往往变差. 原因之一是高浓度掺杂使晶体质量下降, 原因之二是晶体吸收增强, 从而导致二波耦合增益降低.

对于 Ce:LiNbO<sub>3</sub> 材料, 适当的掺杂浓度为 0.06 mol%~0.10 mol% CeO<sub>2</sub>, 还原时间短于 24 h.

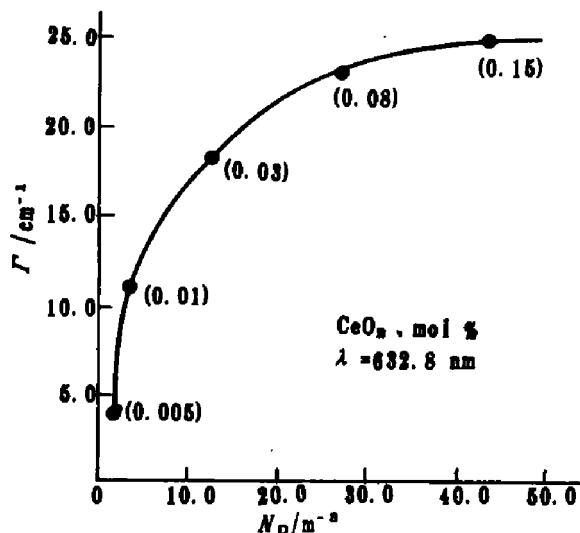


图 3 CeO<sub>2</sub> 含量与 Ce:LiNbO<sub>3</sub> 二波耦合增益系数的实验曲线

Fig. 3 The experimental curve of two-wave coupling gain coefficient of Ce:LiNbO<sub>3</sub> with different CeO<sub>2</sub> content

### 3 结论

根据光折变带导模型, 研究了光折变 LiNbO<sub>3</sub> 二波耦合增益系数与载流子浓度的关系. 结果表明: 随着载流子浓度的升高, 二波耦合增益系数增大, 并逐渐趋于稳态值. 测量了 Ce:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的二波耦合增益系数, 实验结果与理论分析一致.

### 参考文献

- 1 Zhang Hongxi, Shang Xuebin, Xu Chongquan, et al. Multi-beam mixing in Ce:LiNbO<sub>3</sub> crystal, In: Digests of the 1st Conference on Nonlinear Optics, Guangzhou, China, 1991.88
- 2 刘劲松, 李铭华, 徐玉恒. 光学学报, 1991,11(8):693
- 3 张洪喜, 商学彬, 李铭华, 等. 量子电子学, 1991,8(1):121
- 4 李铭华, 贾晓琳, 强亮生, 等. 光学学报, 1993,13(3):229
- 5 强亮生, 张洪喜, 徐崇泉, 等. 人工晶体学报, 1993,22(4):362
- 6 Chen F S. Appl. Phys. Lett., 1968,13(2):223
- 7 Kukhtarev N V. Ferroelectrics, 1979,22(5):946
- 8 Marrakchi A, Huignard J P, Gunter P. Appl. Phys., 1981,24(1):131
- 9 Boyd G D, Bond W L, Carter H L. J. Appl. Phys., 1967,38(4):1941

## THE INFLUENCE OF CARRIER CONCENTRATION ON TWO-WAVE COUPLING GAIN IN PHOTOREFRACTIVE LiNbO<sub>3</sub> CRYSTAL\*

Zhang Hongxi Qiang Liangsheng Xu Chongquan Xu Yuheng

*(Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)*

Zhang Jingwen Bian Shaoping Xu Kebin

*(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)*

**Abstract** Based on Kukhtarev's band-conduction model, the relationship between two-wave coupling gain and carrier concentration in photorefractive LiNbO<sub>3</sub> crystal is analyzed. The result indicates that the gain increases with the carrier concentration and reaches a saturation value. The exponential gain coefficients of Ce:LiNbO<sub>3</sub> crystals with different Ce content have been measured and the experimental results are in good agreement with the theoretical ones.

**Key words** photorefraction, two-wave coupling, carrier concentration.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China