

Ce:LiNbO₃ 晶体光致散射效应的温度特性*

刘劲松** 石顺祥 刘友文

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

李铭华 赵业权 徐玉恒

(哈尔滨工业大学化学系, 哈尔滨 150006)

提 要

对 Ce:LiNbO₃ 光致散射效应的温度特性进行了实验研究。用带导模型和耦合波方程对其进行了理论分析。实验与理论结果相吻合。

关键词: 光折变非线性光学; 光散射; 温度特性。

一、引 言

光致散射效应是光折变晶体得以进行自泵浦与互泵浦相位共轭的内在因素之一, 同时也带来了降低效率、增大背景噪声等问题。已有的工作主要集中在 Fe:LiNbO₃ 的强度特性上^[1~3], 和个别实验现象的观测^[4]。本文研究 Ce:LiNbO₃ 的温度特性, 该晶体有着比掺铁铌酸锂大得多的光折变效率^[5], 同时受光致散射效应的影响更大。本文给出了大量的实验结果并用带导模型和耦合波方程进行了理论分析, 理论能很好地解释实验。

二、理 论

如图 1 所示, 由于晶体自身的不均匀性, 高斯光束 I_i 入射到晶体后会在其中发生散射。散射光 $I(\phi, z)$ 与未散射光 $I(0, z)$ 之间以及散射光之间在晶体内相重叠的区域上将发生双光束耦合作用, 致使入射光波 I_i 将很大一部分能量转移给初始极弱的散射光, 从而使透散光 $I_t = I(0, d)$ 远小于 $I_i \exp(-\alpha d)$, 这里 α 为晶体的光吸收系数 d 为厚度。设 I_i 垂直入射并略去散射光从晶体出射时的折射过程, 令 Γ_s 为散射光 $I(\phi, z)$ 与未散射光 $I(0, z)$ 之间稳态时的双光束耦合系数, 则类似于文献[1]中的讨论, 并考虑到晶体的光吸收以及 $I(\phi, z)$ 与 $I(0, z)$ 作用的长度是 ϕ 的函数, 可推得稳态时散射光从晶体出射后光强分布 $I(\phi) = I(\phi, d)$ 的表达式为

$$I(\phi) = I_0(\phi) \left[\frac{(1+m) \exp(\Gamma d / \cos \phi)}{1+m \exp(\Gamma d / \cos \phi)} \right]^{\Gamma_s / \Gamma} \exp(-\alpha d / \cos \phi), \quad (1)$$

收稿日期: 1990年9月19日; 收到修改稿日期: 1991年1月7日

* 第四届全国量子光学会议宣读文章。

** 得到霍英东教育基金会资助。

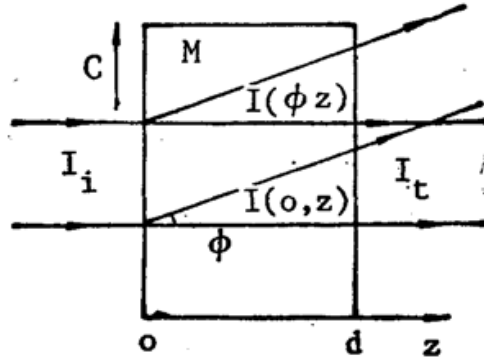


Fig. 1 A schematic diagram of light-induced scattering effect in photorefractive crystal.

M —crystal; C — c axis; ϕ —scattering angle in the crystal.

$$m = \int_0^{\pi/2} \frac{I_0(\phi)}{I_p} d\phi, \quad (2)$$

式中 $I_0(\phi) = I(\phi, 0)$, $I_p = I(0, 0)$, Γ 为有效耦合系数^[1, 2]。

为描述光致散射效应的温度特性, 需给出 Γ_ϕ 与 T 的关系。由 Kukhtarev 的体光栅形成理论可得^[6]

$$\Gamma_\phi = -2\delta \frac{E_T E_Q [E_T + E_Q + (E_A^2/E_T)]}{[(E_Q + E_T)^2 + E_A^2] [1 + (\sigma_d/\sigma_p)]}, \quad (3)$$

$$\delta = -\frac{\pi n_o^3}{\lambda} \gamma_{33} \cos \frac{\phi}{2} \cdot \left[1 - \frac{n_o^2 \gamma_{13}}{n_e^2 \gamma_{33}} \operatorname{tg}^2 \frac{\phi}{2} \right], \quad (4)$$

式中 δ 表征 LiNbO_3 的电光特性, γ_{13} , γ_{33} 和 n_o , n_e 分别为晶体的电光系数和 o 光、 e 光的折射率, ϕ 为散射角。在(3)式中, E_A 为外加电场。 E_T 和 E_Q 分别为

$$E_T = 4\pi \frac{K_b T}{\lambda e} \sin \frac{\phi}{2}, \quad E_Q = \frac{e N_A \lambda}{4\pi \epsilon_0 \epsilon \sin(\phi/2)}, \quad (5)$$

式中 N_A 为陷阱密度, K_b 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, λ 为光波波长, ϵ_0 与 ϵ 分别为真空与相对介电常数, e 为电子电荷电量。(3)式中 σ_d 和 σ_p 分别为暗电导和光电导^[7]

$$\sigma_d = \sigma_0 T^{3/2} \exp(-E_t/TK_b), \quad \sigma_p = S I_i, \quad (6)$$

式中 σ_0 为由材料决定的常数, E_t 为杂质能级在带隙中的位置, S 为光电离截面。

由(1)~(6)式即可定量地分析散射光随散射角、温度、入射光强等各变量的变化关系。

三、实 验

1. 实验装置

如图 2 所示, 晶体*置于加热炉 H 中, 由 WMNK-402 型温控仪 O 探测和控制炉温, 从室温到 300°C 连续可调, 分辨率为 1°C , 控制精度 0.1°C 。由 He-Ne 激光器 S 发出一束功率为 35mW , 光斑半径为 1mm , 波长为 632.8nm 的基模高斯光束, 经格兰棱镜 G 后沿水平方向偏振, 与晶体的 c 轴相平行。中性密度滤波器 N 控制入射到晶体上光强的大小, 并由分束器 BS 分出一部分经功率计 D_2 加到函数记录仪 R 的 Y_2 上, 以监测入射光的变化。功率计 D_1 探测透射与散射光, 将信号加到 R 的 Y_1 上。 D_1 和光栏 Q 被装在一个能沿水平方向

* 晶体为 $\text{Ce}:\text{LiNbO}_3$ 单晶, 尺寸为 $5 \times 5 \times 4.6 \text{mm}^3$, 通光方向长度为 4.6mm 。

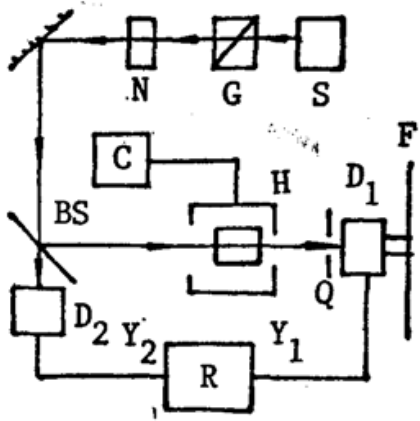


Fig. 2 A schematic diagram of experimental setup

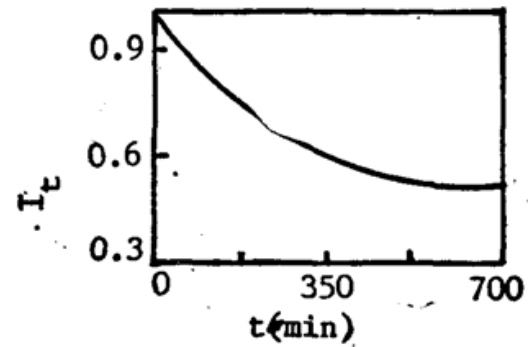


Fig. 3 Time evolution of transmissive laser beam
 $I_t \approx 25 \text{ mW}$, $T = 24^\circ\text{C}$

扫描的导轨 F 上, 由电机带动进行扫描探测。 Q 的孔径为 1mm 。将 R 置于时间挡, 改变电机的工作电压使得 D_1 的扫描速度同 R 的走纸速度相等或成简单比例, 这样在确定好晶体的后表面与 D_1 感光面的距离后, 即可从记录纸上确定出散射光强在光轴与入射光决定的平面内随角度的分布。

2. $I(\phi)$ 与 T 关系的测量

利用温控仪, 可从室温到 300°C 的不同温度下进行测量。首先由 D_1 和 R 探测和记录透射光 I_t 随时间 t 的变化过程, 结果如图 3 所示。经过 10 分钟左右的时间后, I_t 达到了稳定值, 此时启动电机进行扫描测量。图 4 为不同温度, 相同入射光强下散射光光强随角度分布的测量结果。图 5 为不同散射角, 相同入射光强下散射光光强随温度 T 变化的测量结果。实验结果表明: (1) 对某一给定的散射角 ϕ_0 来说, $I(\phi_0) \sim T$ 关于 T 存在一个极大值; (2) 对某一给定的温度 T_0 来说, $I(\phi) \sim \phi$ 关于 ϕ 存在一个极大值, 设此极值对应的角度为 ϕ_m ; (3) 不同角度散射光对温度的敏感程度不同, $\phi = \phi_m$ 处最为敏感, ϕ 偏离 ϕ_m 越远, 敏感程度越弱; (4) $T \geq 200^\circ\text{C}$ 后, 散射光消失。

3. σ_0 与 E_t 的确定

为从理论上给出 $I(\phi) \sim T$ 曲线, 需确定 (6) 式中的 σ_0 和 E_t 这两个未知参量。为此, 安排一个普通的双光束耦合实验, 如图 6 所示。 I_{10} 和 I_{20} 为有固定夹角 ϕ_b 的两束 632.8nm 激光, I_1 和 I_2 为其出射光, 则

$$\Gamma_{\phi_b} = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{I_{20}}{I_{10}} \left(\frac{I_{10} + I_{20}}{I_2} e^{-\alpha d} - 1 \right) \right]. \quad (7)$$

方程右边都是可测量的物理量, 且 $\phi_b, I_{10}, I_{20}, d, \alpha$ 均和 T 无关, 保持其不变。在不同的温度下测量 I_2 的稳态值, 得到 $\Gamma_{\phi_b} \sim T$ 关系如图 7 所示。将所得数据代入 (3) ~ (6) 式中并取 $E_A = 0, n_e = 2.2, n_o = 2.29, \gamma_{18} = 8 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \phi = \phi_b = 16^\circ, T_t = 19.5 \text{ mW}, \lambda = 632.8 \text{ nm}, S = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{J}, N_A = 10^{23} \text{ m}^{-3}, \epsilon = 29$, 得到 $\sigma_0 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}, E_t \sim 10^{-10} \text{ J}$ 。

4. $I(\phi)/I_0(\phi)$ 与 T 关系的理论曲线

将以上有关量代入 (1) ~ (8) 式中, 得到 $I(\phi)/I_0(\phi)$ 随 T 变化的理论曲线如图 8 和图 9 所示。与图 4 和图 5 对比可知, 实验和理论曲线从趋势上讲是基本一致的。

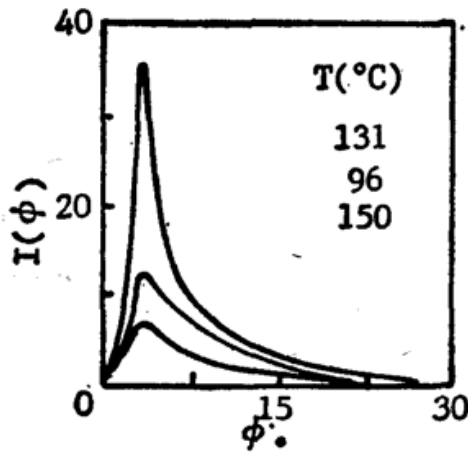


Fig. 4 Experimental curve of $I(\phi)$ versus ϕ
 $I_1=25 \text{ mW}$

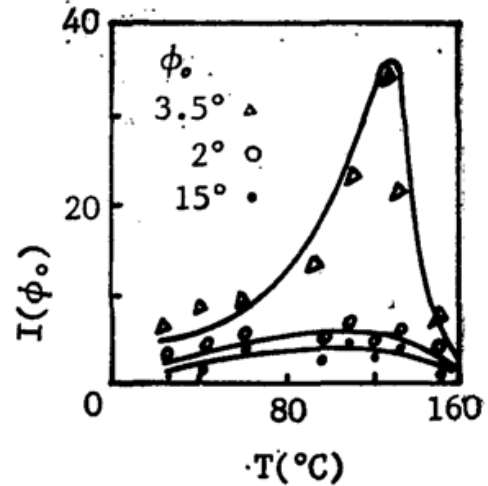


Fig. 5 Experimental curve of $I(\phi_0)$ versus T
 $I_1=25 \text{ mW}$

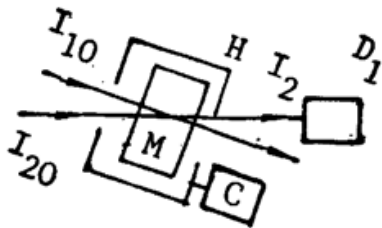


Fig. 6 A schematic diagram of two-beam coupling

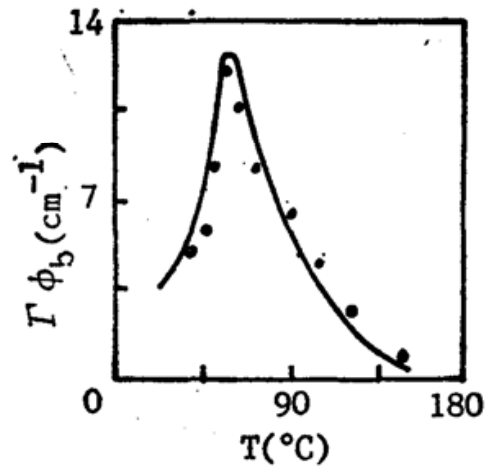


Fig. 7 Measured gain coefficient of two-beam coupling as a function of temperature
 $I_{10}=19.0 \text{ mW}$, $d=4.6 \text{ mm}$, $I_{20}=0.5 \text{ mW}$,
 $\alpha=1.5 \text{ cm}^{-1}$, $\phi_b=16^\circ$.

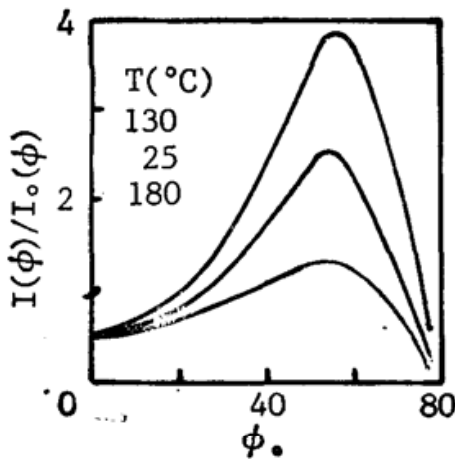


Fig. 8 Theoretical curve of $I(\phi_0)/I_0(\phi_0)$ versus T
 $\Gamma=20.0 \text{ cm}^{-1}$, $m=10^{-7}$

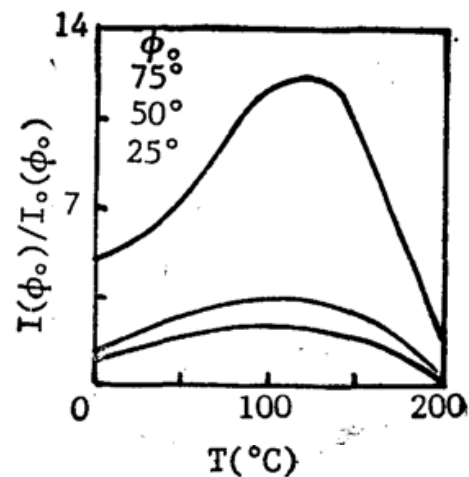


Fig. 9 Theoretical curve of $I(\phi)/I_0(\phi)$ versus ϕ
 $\Gamma=20.0 \text{ cm}^{-1}$, $m=10^{-7}$

四、结 论

- (1) Ce:LiNbO₃ 的光致散射光的光强分布同温度有关。不同散射角的散射光对温度的敏感程度不同。散射光强最强的地方,对温度的变化最为敏感;
- (2) 存在着一个温度值,在此值下光致散射效应最强烈;
- (3) 光致散射效应随着温度的升高而减弱,大于一定的温度后散射光消失;
- (4) 用 Kukhtarev 的带导模型和从双光束耦合的角度出发,略去了散射光之间的相互作用,以及光束在晶体内部各个截面的初始散射等问题,建立起的理论,可较好地解释 Ce:LiNbO₃ 晶体光致散射效应温度特性的实验现象。

参 考 文 献

- [1] 许克彬等;《中国激光》,1989, **16**, No. 9 (Sep), 532~575.
- [2] R. A. Rupp *et al.*; *Appl. Phys. (B)*, 1986, **B39**, No. 4 (Apr), 223~229.
- [3] R. Grousson *et al.*; *Opt. Comm.*, 1984, **51**, No. 5 (Oct), 342~346.
- [4] 吴仲康等;《中国激光》,1989, **16**, No. 12 (Dec), 714~716.
- [5] 刘劲松等;《红外研究》,1990, **9**, No. 1 (Feb), 63~66.
- [6] N. V. Kukhtarev *et al.*; *Ferroelectrics*, 1979, **22**, 949~960.
- [7] Cheng Lijen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**, No. 21 (Nov), 1456~1458.
- [8] Pochi Yeh; *IEEE J. Quan. Elec.*, 1989, **QE-25**, No. 3 (Mar), 484~519.

Temperature dependence of light-induced scattering effect in Ce:LiNbO₃ crystal

LIU JINSONG, SHI SHUNXIANG AND LIU YOUWEN

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)

LI MINGHAU, ZHAO YEQUAN AND XU YUHENG

(Department of Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

(Received 19 September 1990; revised 7 January 1991)

Abstract

The light-induced scattering effect in Ce:LiNbO₃ crystal was investigated experimentally as a function of temperature and analyzed theoretically by using the band-transport model and beam coupling equations. The experimental results were in accord with the theoretical ones.

Key words: Photorefractive nonlinear optics, light scattering, temperature character.