

# 铌酸锂晶体光感应散射与外加电场的关系\*

闫晓娜 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘 要** 提出外加电场减小散射光的方案。根据库赫塔列夫(Kukhtarev)方程, 对外加电场减小散射光的机理进行了理论性的探讨。

**关键词** 光感应散射, 空间电荷场, 耦合系数。

## 1 引 言

一束激光入射光折变晶体时将产生非对称的散射。这种光感应散射是自抽运相位共轭器<sup>[1]</sup>、光折变振荡器<sup>[2]</sup>的重要辐射来源。但在图像放大、全息存储等应用中, 这种散射不仅降低了信号光的强度, 同时也在系统中形成噪声, 导致信噪比下降<sup>[3]</sup>。因此, 如何减小光感应散射已成为一项重要的课题。在过去的几年中, 已有人提出在共轭面记录  $N$  个相干图像, 利用时间积分减小光感应散射<sup>[4]</sup>。Zhao<sup>[3]</sup>根据高温情况下离子参与空间电荷场的建立, 提出了升高温度减小耦合系数从而降低散射光的强度。

本文提出外加电场减小散射光。并根据库赫塔列夫方程和耦合波方程, 对外加电场减小散射光的机理进行了理论性的探讨。

## 2 理论模型

Marotz 等人已从理论上证明了光感应散射的动力学过程可近似地描述为入射光与每一束散射光之间的双光束耦合。由于散射光的空间结构不是关心的重点, 因此可用通常的两波耦合模型代替多波耦合讨论外加电场减小光散射。在此近似情况下, 透射光强为<sup>[5]</sup>:

$$I = I_0 \frac{1 + m_0}{1 + m_0 \exp(\Gamma_{\text{eff}} d)} \quad (1)$$

式中  $I_0$  为初始入射光强;  $m_0$  为初始入射光强与散射光强之比;  $d$  为晶体的厚度;  $\Gamma_{\text{eff}}$  为耦合系数, 表示为:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\pi}{m\lambda} \gamma_{\text{eff}} n^3 E_{\text{sc}} \sin \phi \quad (2)$$

式中  $m = 2 \sqrt{m_0 / (1 + m_0)}$  代表光强的调制度;  $\lambda$  为入射光在真空中的波长;  $\gamma_{\text{eff}}$  为有效电光系数;  $\phi$  为记录的噪声体光栅与双光束干涉条纹间的相移;  $n$  为晶体的平均折射率;  $E_{\text{sc}}$  为空间

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-05-14; 收到修改稿日期: 1998-09-01

电荷场的数值大小。

从(1)式和(2)式可见,在特定的记录结构情况下,为减小散射光强,即增大透射光强,唯一的途径是减小  $E_{sc} \sin \phi$  的数值。下面以  $\text{LiNbO}_3$  晶体为例,利用库赫塔列夫方程推导空间电荷场,从而解释外加电场是如何减小空间电荷场的。

对于  $\text{LiNbO}_3$  晶体,室温下只有电子参与了空间电荷场的建立。设电子在导带中的数密度为  $n_e$ , 晶体内施主的数密度为  $N_d$ , 电离的施主数密度为  $N_d^+$ ,  $N_a$  为室温下负电荷的数密度,库赫塔列夫方程表示为<sup>[5]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} &= \frac{\partial N_d^+}{\partial t} + \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} [e\mu_e n_e E + \mu_e k_B T \frac{\partial n_e}{\partial x} + e s L_{ph} I (N_d - N_d^+)] \\ \frac{\partial N_d^+}{\partial t} &= (sI + \beta)(N_d - N_d^+) - \gamma_e N_d^+ n_e \\ \epsilon \frac{\partial E}{\partial x} &= e(N_d^+ - N_a - n_e) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $e$  为电子电量;  $\mu_e$  为自由电子的迁移率;  $k_B$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为温度;  $s$ 、 $\beta$  分别为光激发系数和热激发系数;  $L_{ph}$  为光伏特传输长度;  $\gamma_e$  为复合常数;  $E$  为感应的空间电荷场;  $\epsilon$  为晶体中的介电系数。

对于波数为  $k$ 、余弦调制的入射光强

$$I(z) = I_0(1 + m \cos kz) = I_0 + \frac{I_0}{2} m [\exp(ikz) + \exp(-ikz)]$$

其解  $n_e$ 、 $N_d^+$ 、 $E$  也是空间调制的。在小调制度情况下( $m \ll 1$ ),取如下形式的解对光折变效应进行一级近似分析

$$\left. \begin{aligned} n_e &= n_{e0} + [n_{e1} \exp(-ikx) + C. C.] \\ N_d^+ &= N_a + [N_{d1}^+ \exp(-ikx) + C. C.] \\ E &= E_0 + [E_{esc} \exp(-ikx) + C. C.] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $n_{e0}$  为初始导带中的电子数密度;  $E_0$  为外加电场的大小;  $E_{esc}$  为电场的调制幅度。把(4)式代入(3)式,按照 Yariv 等人的近似<sup>[6]</sup>,得到稳态时的电离施主数密度

$$N_{d1}^+ = - \frac{C_3}{C_1} m$$

从而

$$E_{esc} = \frac{ie}{\epsilon k} N_{d1}^+ = - \frac{ie}{\epsilon k} \frac{C_3}{C_1} m \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{-\omega_e \gamma_e N_a - (sI_0 + \beta)(N_d/N_a)(D_e k^2 + i\mu_e k E_0) - iks L_{ph} I_0 \gamma_e N_a}{\gamma_e N_a + D_e k^2 + i\mu_e k E_0} \\ C_3 &= \left( \frac{sI_0 D_e k^2 - iks L_{ph} I_0 \gamma_e N_a}{\gamma_e N_a + D_e k^2 + i\mu_e k E_0} \right) (N_d - N_a) \\ \omega_e &= \frac{e\mu_e n_{e0}}{\epsilon} \end{aligned}$$

$D_e$  为导带中电子的扩散系数。

把(5)式代入(2)式,得到耦合系数和相移分别为

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\pi e \gamma_{\text{eff}} n^3}{\epsilon k \lambda} \left| \frac{(\gamma_e N_a k s L_{\text{ph}} I_0 + i s I_0 D_e k^2) (N_d - N_a)}{\omega_e \gamma_e N_a + (s I_0 + \beta) (N_d / N_a) (D_e k^2 + i \mu_e k E_0) + i \gamma_e N_a k s L_{\text{ph}} I_0} \right| \sin \phi \quad (6)$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{s I_0 D_e k^2}{\gamma_e N_a k s L_{\text{ph}} I_0} \right) - \arctan \left[ \frac{(s I_0 + \beta) (N_d / N_a) \mu_e k E_0 + k s L_{\text{ph}} I_0 \gamma_e N_a}{(s I_0 + \beta) (N_d / N_a) D_e k^2 + \omega_e \gamma_e N_a} \right]$$

结合(6)式可见，外加电场减小了空间电荷场的数值大小，且随外加电场的增加，空间电荷场将越来越小。外加电场同时也减小了相位栅与干涉条纹间的相移。因此，随外加电场的增加，强度耦合系数将越来越小，从而导致透射光强增加，散射光强减小。

下面以 LiNbO<sub>3</sub> 晶体典型参数为例讨论外加电场对透射光强的影响。设晶体内入射光与散射光所夹半角为 20°，则相应的波数  $k = 1.92 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ， $\gamma_{\text{eff}} = 2.37 \times 10^{-11}$ 。其它用到的晶体参数见表 1。图 1 示出了耦合系数随外加电场的变化曲线。图 2 是规范化的透射光强随外加电场的变化曲线。由图可见，外加电场增大了透射光的强度，即减小了散射光的强度。由此推论，可以用加外电场的方式减小散射效应。

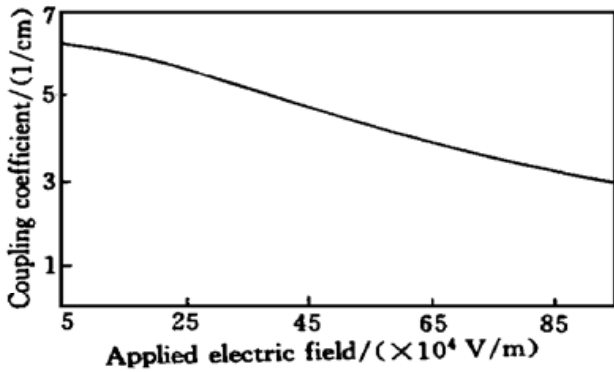


Fig. 1 The diagram of coupling coefficient with respect to applied electric field

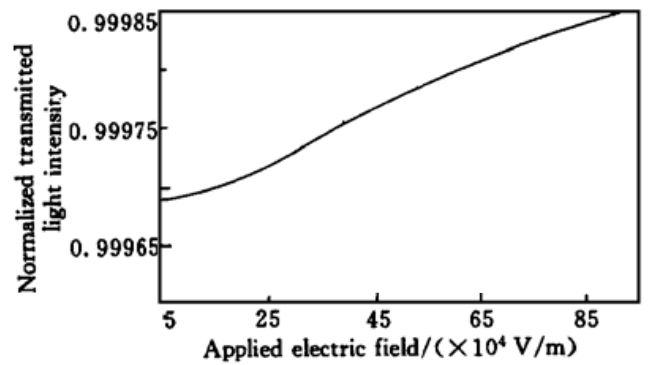


Fig. 2 The normalized transmission intensity with respect to the applied electric field

Table 1. Coefficients of LiNbO<sub>3</sub> crystal

coefficient	value	reference
$n$	2.3	[5]
$\lambda / \text{nm}$	514.5	
$d / \text{mm}$	10	
$s / (\text{m}^2 / \text{W} \cdot \text{s})$	$3 \times 10^{-4}$	[7]
$\beta / (1/\text{s})$	0.5	[7]
$\gamma_e / (\text{m}^3/\text{s})$	$10^{-15}$	[7]
$N_d / \text{m}^{-3}$	$1.22 \times 10^{22}$	
$N_a / \text{m}^{-3}$	$0.1 \times 10^{22}$	
$L_{\text{ph}} / \text{m}$	$5 \times 10^{-10}$	[7]
$D_e / (\text{m}^2/\text{s})$	$2.86 \times 10^{-8}$	[7]
$\mu_e / (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	$1.1 \times 10^{-6}$	[7]
$\omega_e / \text{s}^{-1}$	5.48	[7]
$I_0 / (\text{W}/\text{m}^2)$	5000	
$\epsilon$	29	
$e$	$1.6 \times 10^{-19}$	
$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-12}$	

结 论 作者提出利用外加电场减小散射光。根据库赫塔列夫方程和耦合波方程，对外加电

场减小散射光的机理进行了理论性的探讨。

### 参 考 文 献

- [1] Feinberg J. Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10) : 486~ 488
- [2] White J O, Cronin-Golomb M, Fisher B *et al.*. Coherent oscillation by self-induced gratings in the photorefractive crystal BaTiO<sub>3</sub>. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(6) : 450~ 452
- [3] Zhao F, Zhou H, Wu Zh *et al.*. Temperature dependence of light-induced scattering in a Ce·Fe·LiNbO<sub>3</sub> photorefractive crystal. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(7) : 1985~ 1992
- [4] Huignard J P, Herriani J P, Pichon L *et al.*. Speckle-free imaging in four-wave mixing experiments with BSO crystals. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(10) : 436~ 437
- [5] 刘思敏, 郭 儒, 凌振芳. 光折变非线性光学, 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [6] Yariv A, Orlov S S. Holographic storage dynamics in lithium niobate: Theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13**(11) : 2513~ 2523
- [7] Liu B, Liu L, Xu L. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(11) : 2170~ 2176

## Relationship Between Light-Induced Scattering and Applied Electric Field in LiNbO<sub>3</sub> Crystal

Yan Xiaona      Liu Liren

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

(Received 14 May 1998; revised 1 September 1998)

**Abstract** Light-induced scattering in LiNbO<sub>3</sub> crystal is highly dependent on the magnitude of the applied electric field. Based on the Kukhtarev and coupled wave equations, an analytical solution is given to the relation between the transmitted intensity and the different applied electric fields, and thus explain how the applied electric field diminish the scattering light.

**Key words** light-induced scattering, space-charge field, coupling coefficient.