

光折变晶体中双光束耦合时间响应特性的研究*

周忠祥 孙万钧 孙秀冬 许克彬

姜全忠 陈焕鑫

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

提要 从描述双光束耦合规律的动态方程组出发,在考虑了光栅调制度变化后,给出了包含晶体固有参数、入射总光强、入射夹角、光强比等变量在内的写入响应时间解析表达式,实验结果与理论分析定性符合很好。

关键词 光折变晶体, 双光束耦合, 响应时间

1 引言

双光束耦合是光折变光学中的一个基本过程,是用于研究和了解光折变材料参量和性质的一个工具,或作为更复杂的光学组态中的一个基本操作。影响光折变晶体在实际中应用的一个主要因素是光折变晶体的响应时间。Gunter, Valley 等人分别在光栅调制度线性近似和零级电子数密度近似情况下,给出了扩散长度,漂移长度远远小于光栅空间周期时的光折变晶体的响应时间^[1~3],但所讨论的光折变晶体的响应时间是在干涉条纹的调制度很小且不变的条件下列出的。实际上进入晶体内的两束光由于光折变效应而导致能量耦合及转移,从而使干涉条纹的调制度随记录时间、入射深度、初始入射光强比的变化而不断变化,反过来它又影响了空间电荷的迁移,即影响了体位相光栅的建立和擦除时间。Horowitz, 石顺祥等人讨论了二波耦合中光栅建立和擦除速度与初始光强比的依赖关系^[4,5],但只给出了实验结果与二波耦合动态方程的数值解之间的比较,而没有给出响应时间与光强比之间关系的解析表达式。T. Hirao 等人讨论了响应时间与折射率位相光栅间距之间的关系^[6]。

以上讨论光折变晶体响应时间的文献中,理论上没有直接给出包含影响响应时间的所有各参变量(如晶体固有参数、入射总光强、入射夹角、光强比)在内的响应时间的统一表达式,响应时间与各参变量之间的关系被分别地独立讨论,实际上各参变量对响应时间的影响是互相制约的。本文根据光折变晶体的带导模型,从描述双光束耦合规律的一维 Kukhtarev^[7] 方程出发,考虑了光栅调制度变化后,给出了包含晶体的固有参数、入射总光强、入射夹角、光强比等变量在内的写入响应时间的统一解析表达式。本文利用掺 Ce 的 KNSBN 晶体在 488 nm 波长下测量了二波耦合的写入响应时间,实验结果与理论分析定性符合很好。利用本文描述响应时

* 山东大学晶体研究所开放实验室基金资助项目

收稿日期: 1995年1月2日; 收到修改稿日期: 1995年6月19日

间的表达式同样可以定性地解释文献[4~6]中的实验测量曲线。因此本文给出的双光束耦合响应时间表示式具有普适性并在应用中具有实际意义。

2 双光束耦合写入响应时间的理论分析

根据光折变晶体的带导模型,对描述双光束耦合规律的 Kukhtarev 方程采取了载流子小量近似、准平衡近似、一阶光栅近似和慢变化包络近似,可得到描述双光束耦合动态特性的基本方程组^[5]

$$\frac{\partial E_1(z,t)}{\partial z} = -igR_{\text{eff}}E_{\text{sc1}}(z,t)E_2(z,t) - \frac{1}{2}\alpha E_1(z,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_2(z,t)}{\partial z} = -igR_{\text{eff}}E_{\text{sc1}}^*(z,t)E_1(z,t) - \frac{1}{2}\alpha E_2(z,t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_{\text{sc1}}(z,t)}{\partial z} = -\rho E_{\text{sc1}}(z,t) + 2B \frac{e}{ieK} E_1(z,t) \times E_2^*(z,t) (\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_2) \quad (3)$$

其中 $E_1(z,t)$ 和 $E_2(z,t)$ 为两入射光场振幅, $E_{\text{sc1}}(z,t)$ 为空间电荷场一阶分量。

$$\rho = \sigma I_0 + \beta + \gamma n_0 - \gamma N_A^0 \frac{\sigma I_0 + \beta + \gamma n_0 - (iK/e)\chi I_0 - \mu n_0 e/e}{DK^2 + \gamma N_A^0 + i\mu K E_s} \quad (4)$$

$n_0 = [(\sigma I_0 + \beta)N_D^0]/\gamma N_A^0$ 为空间平均电子密度

$$B = \gamma N_A^0 \frac{\left(-\frac{iK\chi}{e} + \sigma\right)N_D^0}{DK^2 + \gamma N_A^0 + i\mu K E_s} - \sigma N_D^0 \quad (5)$$

$$g = \frac{\omega^2 \mu_0}{2K \cos \theta}$$

$R_{\text{eff}} = e_1 \cdot \bar{e}_\omega \cdot [\bar{R} \cdot (K/|K|)] \cdot \bar{e}_\omega \cdot e_2$ 为有效电光系数, α 为吸收系数, E_s 为外加电场, $K = k_2 - k_1$, k_1, k_2 为二光波矢量, 2θ 为其夹角, e_1, e_2 为二光场振动方向的单位矢量, σ 为激发截面, β 为热激发速率, D 为扩散系数, γ 为线性复合系数, I_0 为二入射光束总光强, N_D^0, N_A^0 分别是热平衡时的施主、受主数密度, χ 为光伏系数, μ 为迁移率, e 为载流子电荷, \bar{e}_ω 为光频介电张量, e 为静电张量, \bar{R} 为电光系数。

本文把两光束记录光栅时,其中一束输出光强达到其稳态值的 $1 - 1/e$ 时的记录时间作为写入响应时间(记为 t_1),此时二波耦合可以看作近稳态,由方程(3)可得

$$E_{\text{sc1}} = \frac{2B}{\rho} \frac{e}{ieK} (e_1 \cdot e_2) E_1(z,t) \cdot E_2^*(z,t) (1 - e^{-\rho}) \quad (6)$$

假定两光束偏振方向相同,即 $e_1 \cdot e_2 = 1$, 取

$$\rho = \frac{1}{\tau} + i\Omega, \quad (\tau, \Omega \text{ 为实数}) \quad (7)$$

$$gR_{\text{eff}} \frac{2B}{\rho} \cdot \frac{e}{ieK} = \Gamma_1 + i\Gamma_2 \quad (\Gamma_1 \text{ 和 } \Gamma_2 \text{ 为实数}) \quad (8)$$

$$gR_{\text{eff}} \frac{2B^*}{\rho^*} \cdot \frac{e}{ieK} = \Gamma_1 - i\Gamma_2 \quad (9)$$

$$E_1(z,t) = \sqrt{I_1(z,t)} e^{i\phi_1} \quad (10)$$

$$E_2(z,t) = \sqrt{I_2(z,t)} e^{i\phi_2} \quad (11)$$

忽略吸收并把(6)~(11)代入方程(1),(2)得

$$\frac{\partial I_1(z,t)}{\partial z} = \frac{\Gamma I_1(z,t) I_2(z,t)}{I_0} \quad (12)$$

$$\frac{\partial I_2(z,t)}{\partial z} = -\frac{\Gamma I_1(z,t) I_2(z,t)}{I_0} \quad (13)$$

其中 $\Gamma = -2I_0[\Gamma_1(1 - e^{-t/\tau} \cos \Omega t) - \Gamma_2 e^{-t/\tau} \sin \Omega t]$ 为耦合系数

$$I_0 = I_{10} + I_{20} \quad (14)$$

求解方程(12),(13)得

$$I_1(z,t) = \frac{I_0 m_0 e^{\Gamma z}}{1 + m_0 e^{\Gamma z}} \quad (15)$$

$$I_2(z,t) = \frac{I_0}{1 + m_0 e^{\Gamma z}} \quad (16)$$

其中 $m_0 = I_{10}/I_{20}$ 为初始入射光强比。此时干涉条纹调制度为

$$m = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2m_0^{1/2} e^{\Gamma z/2}}{1 + m_0 e^{\Gamma z}}$$

从中可以看出干涉条纹调制度 m 随记录时间、入射夹角、入射深度、初始光强比的变化而变化。当记录达到饱和时,两束光的光强分别为

$$I_1(z) = \frac{I_0 m_0 e^{\Gamma_0 z}}{1 + m_0 e^{\Gamma_0 z}} \quad (17)$$

$$I_2(z) = \frac{I_0}{1 + m_0 e^{\Gamma_0 z}} \quad (18)$$

其中 $\Gamma_0 = -2I_0\Gamma_1$, 当 $t = t_1, z = l$ 时,由响应时间定义得

$$\frac{I_0 m_0 e^{\Gamma l}}{1 + m_0 e^{\Gamma l}} = \frac{I_0 m_0 e^{\Gamma_0 l}}{1 + m_0 e^{\Gamma_0 l}} \left(1 - \frac{1}{e}\right)$$

从而得 $\Gamma = \frac{1}{l} \ln \frac{(1 - 1/e) e^{\Gamma_0 l}}{1 + (m_0/e) e^{\Gamma_0 l}}$ (19)

由(4)当扩散长度远远小于光栅间距即 $DK^2 \ll \gamma N_A^0$, 且外加电场 $E_s = 0$ 时

$$\rho = \frac{\mu n_0 e}{\varepsilon} + i \frac{K \chi I_0}{e}, \quad \text{所以} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{\mu n_0 e}{\varepsilon}, \quad \Omega = \frac{K \chi I_0}{e} \quad (20)$$

若忽略光伏效应即 $\chi = 0$ 时,由(4),(5),(8)式得

$$\Gamma_1 \approx -\frac{\sigma D \omega^2 \mu_0 R_{eff}}{(\sigma I_0 + \beta) \mu \cos \theta} \quad \Gamma_2 = 0 \quad (21)$$

因此(14)式变为 $\Gamma = -2I_0\Gamma_1(1 - e^{-t/\tau})$ (22)

通常空间载流子密度 n_0 很小,则(22)式可以近似写为

$$\Gamma = -2I_0\Gamma_1(t_1/\tau) \quad (23)$$

由(19),(23)式可得响应时间的表示式为

$$t_1 = \tau \left[\frac{1}{\Gamma_0 l} \ln \frac{1 - 1/e}{1 + (m_0/e) e^{\Gamma_0 l}} + 1 \right] \quad (24)$$

其中

$$\Gamma_0 = -2I_0\Gamma_1 = \frac{2\sigma D \omega^2 \mu_0 R_{eff} I_0}{(\sigma I_0 + \beta) \mu \cos \theta}, \quad \tau = \frac{\varepsilon}{\mu e n_0} = \frac{\varepsilon \gamma N_A^0}{\mu e (\sigma I_0 + \beta)}$$

若忽略热激发效应($\beta = 0$),则上述两式变为

$$\Gamma_0 = \frac{2D \omega^2 \mu_0 R_{eff}}{\mu \cos \theta}, \quad \tau = \frac{\varepsilon \gamma N_A^0}{\mu e \sigma I_0} \quad (25)$$

由(24),(25)式可以看出响应时间与入射总光强 I_0 成反比,且与耦合强度 $\Gamma_0 l$,初始光强比 m_0 有关系。当总光强 I_0 , $\Gamma_0 l$ 一定时,响应时间与初始光强比 m_0 的关系曲线如图 1 所示,随着初始光强比 $m_0 = I_{10}/I_{20}$ 减少,响应时间变长,但当初始光强比 m_0 减小到一定程度后,响应时间变化不大,这是由于光折变晶体二波耦合的饱和特性所决定的;当总光强 I_0 ,光强比 m_0 一定时,响应时间与耦合强度 $\Gamma_0 l$ 的关系曲线如图 2;当耦合强度 $\Gamma_0 l$,初始光强比 m_0 一定时,响应时间与总光强 I_0 之间的关系曲线如图 3 所示。

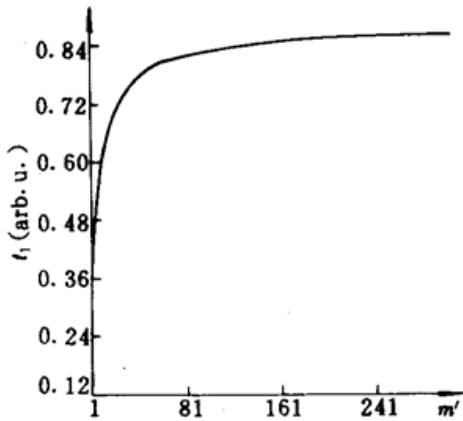


Fig. 1 Theoretical curve of response time versus the intensity ratio $m' = m_0^{-1}$ when the total input intensity I_0 and the coupling strength $\Gamma_0 l$ are definite

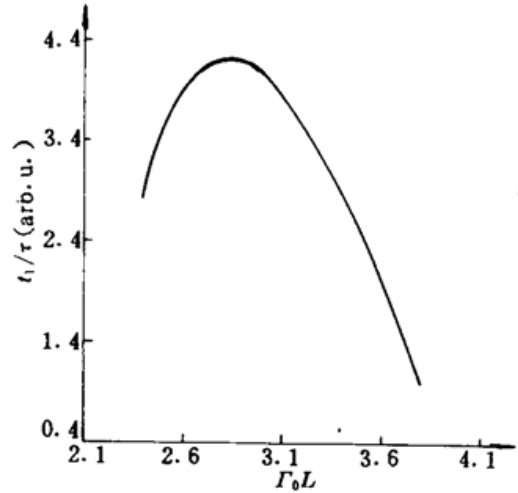


Fig. 2 Theoretical curve of response time versus the coupling strength $\Gamma_0 l$ when the total input intensity I_0 and the intensity ratio m_0 are definite

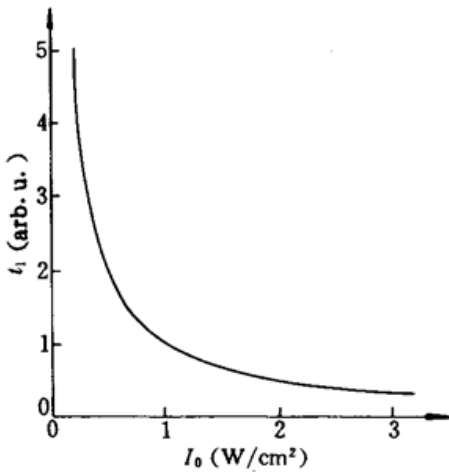


Fig. 3 Theoretical curve of response time versus the total input intensity I_0 when the coupling strength $\Gamma_0 l$ and the intensity ratio m_0 are definite

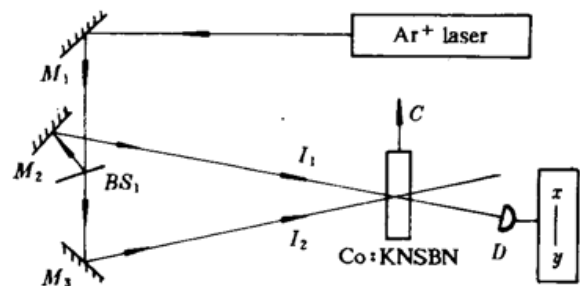


Fig. 4 Experimental configuration of the two-beam coupling

3 实验结果与讨论

实验中所用光折变晶体为掺 Ce 的 KNSBN 晶体,利用 Ar 离子激光器,入射光波长为 $\lambda = 488 \text{ nm}$,实验装置如图 4 所示。当总光强 $I_0 = 1.44 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,入射角 $2\theta = 18.8^\circ$ 时,测量了响应时间与初始光强比 m_0 的关系曲线如图 5 所示;当总光强 $I_0 = 1.44 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,初始光强比 $m_0 = 1$ 时,测量了响应时间与入射角 2θ 之间的关系曲线如图 6 所示;当入射角 $2\theta = 18.8^\circ$,初始光

强比 $m_0 = 1$ 时, 测量了响应时间与总光强 I_0 之间的关系曲线如图 7 所示。

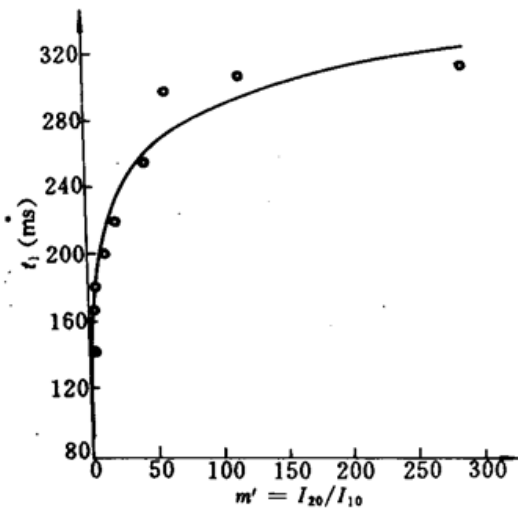


Fig. 5 Experimental curve of response time versus the intensity ratio m' when the total input intensity $I_0 = 1.44 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ and the input angle $2\theta = 18.8^\circ$ are definite

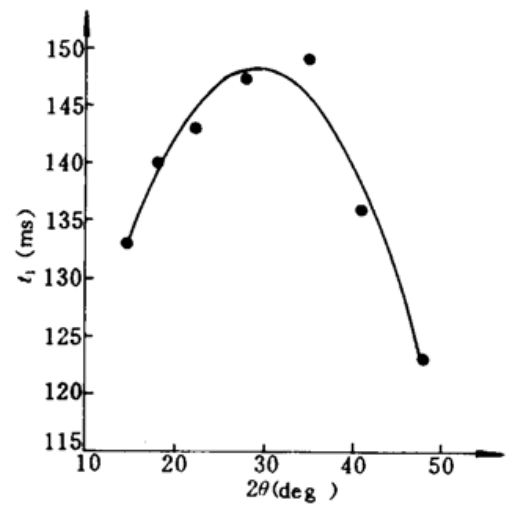


Fig. 6 Experimental curve of response time versus the input angle 2θ when the total input intensity $I_0 = 1.44 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ and the intensity ratio $m_0 = 1$ are definite

比较实验测量结果与理论曲线定性符合很好, 由于本文讨论响应时间时考虑了光栅调制度随二波耦合外在因素的变化, 给出的响应时间表达式更符合实际情况, 而文献[1~3]中讨论响应时间时假定调制度不变, 给出的响应时间只包含了晶体固有参量的影响, 文献[4~6]讨论响应时间随外在参量变化的关系时采用的是数值解法, 没能给出具体表达式。本文在上述两方面基础上给出二波耦合记录时的响应时间表达式, 它包含了外在参量和晶体内部参量对响应时间的影响, 因而更符合实际情况。

4 结 论

4.1 由公式(24)可以看出, 当入射总光强和光强比 m_0 固定时, 增大 $\Gamma_0 l$ (l 一定, 增大入射角) 可以使响应时间缩短, 但当 m_0 很小时, (24) 式变为

$$t_1 = \tau \left[\frac{1}{\Gamma_0 l} \ln(1 - 1/e) + 1 \right] \quad (26)$$

响应时间与 $\Gamma_0 l$ 成反比。

4.2 当 $\Gamma_0 l$ 固定(即入射角固定), 总光强 I_0 固定, 增大初始光强比 m_0 时, 可使响应时间变短, 光强比变小时, 响应时间变长, 当初始光强比小到一定程度后(24)式变为(26)式, 此时响应时间不变, 这反映了光折变晶体二波耦合放大倍数的饱和特性^[8]。这个结果与文献[4, 5]给出的实验曲线符合很好。

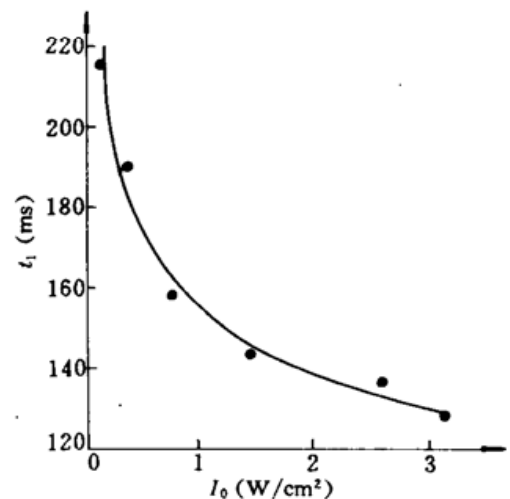


Fig. 7 Experimental curve of response time versus the total input intensity I_0 when the input angle $2\theta = 18.8^\circ$ and the intensity ratio $m_0 = 1$ are definite

4.3 当入射角和光强比不变时,响应时间与入射总光强成反比,增大入射总光强,可以使响应时间变短。

4.4 从 $\Gamma_0 = \frac{2D\omega^2\mu_0 R_{eff}}{\mu\cos\theta}$, $\tau = \frac{\epsilon\gamma N_A^0}{\mu\epsilon\sigma I_0}$ 可以看出在选择光折变材料时,应选择扩散系数较大,迁移率大,激发截面大的晶体材料,可以使响应时间变短,在掺杂时应减少掺杂浓度,也可相应缩短响应时间。

总之,本文从理论上给出了光折变晶体双光束耦合的响应时间解析表达式,并在实验中得到了验证。一方面由理论和实验结果可以看出响应时间与入射总光强、光强比、入射夹角的关系;另一方面也给出了光折变材料固有参数对响应时间的影响,这对选择和拉制光折变材料有重要的指导意义;其次给出了光强比对响应时间影响的理论表示式,并很好地解释了文献[4, 5]中的实验结果。

参 考 文 献

- 1 P. Gunter. Holography, coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials. *Physics Reports*, 1982, 93(4):199~299
- 2 G. C. Valley, M. B. Klein. Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing. *Optical Engineering*, 1983, 22(6):704
- 3 G. C. Valley. Erase rates in photorefractive materials with two photoactive species. *Appl. Opt.*, 1983, 22(20):3160
- 4 M. Horowitz, Ron Daisy, Baruch Fischer. Signal-to-pump ratio dependence of buildup and decay rates in photorefractive nonlinear two-beam coupling. *J. Opt. Am. B*, 1992, 9(9):1685
- 5 石顺祥, 关义春, 安毓英等. 光致折射晶体中双光束耦合的动态特性研究. *中国激光*, 1989, 16(8):462
- 6 T. Hirao, Takayuki Sawada. On the dependence of photorefractive response time on the index grating space. *Opt. Commun.*, 1991, 82(1):83
- 7 N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*. Holographic storage in electro-optic crystals. *Ferroelectrics*, 1979, 22(1):949
- 8 R. A. Vazquez, F. R. Vachss, R. R. Neurgaonkar *et al.*. Large photorefractive coupling coefficient in a thin Cerium-doped strontium batrium niobate crystal. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, 82(9):1932

Study of the Response Time of Two-beam Coupling in Photorefractive Crystals

Zhou Zhongxiang Sun Wanjun Sun Xiudong Xu Kebin

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

Jiang Quanzhong Chen Huanchu

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract Considering the change of the grating modulation index, a united analytic formula of the response time for two-beam coupling is obtained by solving the dynamic equation of two-beam coupling. It involves parameters of crystals, incident intensity, full incident angle and signal-pump ratio. The experimental results using Ce:KNSBN crystal are in good agreement with the theory qualitatively.

Key words photorefractive crystal, two-beam coupling, response time