

文章编号: 0253-2239(2004)04-527-4

Ce:KNSBN 晶体两波耦合中的光扇效应*

郭庆林 刘 峰 梁宝来 张金平 魏艳红
(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

摘要: 采用两波耦合非同时读出实验装置, 测量了掺铈钾铌钽酸锶(Ce:KNSBN)晶体两波耦合过程中的信号光和抽运光非同时打开条件下两波耦合增益的时间变化规律, 讨论了光扇的入射光强阈值及光扇效应对两波耦合动态过程的影响。结果表明: 632.8 nm He-Ne 激光在 Ce:KNSBN 晶体中写入体光栅时, 光扇效应存在明显的写入光强阈值特性, 当入射光强大于 30 mW/cm² 时, 才存在强烈的光扇效应。利用修正耦合波方程对 Ce:KNSBN 晶体中的两波耦合动态过程、增益随着信号光和抽运光打开时间间隔 Δt 的变化进行了模拟计算, 理论模拟结果与实验测量结果基本一致。

关键词: 光折变晶体; 光扇效应; 两波耦合; 动态特性; 阈值
中图分类号: O734; O438 文献标识码: A

The Fanning Effect on the Dynamics of Two-Wave Coupling in Ce:KNSBN Photorefractive Crystal

Guo Qingling Liu Feng Liang Baolai Zhang Jingping Wei Yanhong
(College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002)
(Received 6 April 2003; revised 5 September 2003)

Abstract: A non-synchronously-numerating experimental system is applied to measure the gain of two-wave coupling in a Ce:KNSBN crystal while the signal beam and the pump beam are non-simultaneously opened, and the effect of fanning on the dynamical characteristics of two-wave coupling is discussed. It is shown that there is significant writing beam intensity threshold effect of fanning as 632.8 nm He-Ne laser is used to write the volume grating in Ce:KNSBN crystal, and obvious fanning occurs only if the writing beam intensity is higher than 30 mW/cm². Modified wave-coupling equations are used to simulate both the dynamical process of two-wave coupling and the gain as a function of the opening time interval between the signal beam and the pump beam. The theoretically calculated results are coincident with the experiment data.

Key words: photorefractive crystal; fanning effect; two-wave coupling; dynamical characteristics; threshold

1 引 言

近年来 KNSBN 晶体以其诸多优点吸引了研究者的广泛兴趣, 它作为理想的体全息记录材料在光存储、光学相位共轭、光学信息处理等领域具有极大的潜在应用价值^[1~4]。然而作为高增益光折变材料掺铈 KNSBN 晶体中存在强烈的光扇效应^[5]。一方

面光扇可以被利用, 如作为光折变振荡器和自抽运相位共轭器的种源等; 另一方面, 当掺杂 KNSBN 晶体被用于光存储和光学信息处理时, 光扇作为噪声源将使输出信号的增益减弱, 信噪比降低, 在一定程度上限制了 KNSBN 晶体的具体应用^[6], 因此光扇效应是掺杂 KNSBN 晶体在实际应用中所面临的一个首要问题。目前, 人们已经对掺杂 KNSBN 晶体的光扇效应进行了较为仔细的研究, 例如: Residori 等^[5]测量了 Cu:KNSBN 晶体不同 c 轴取向时光扇效应的动态特性; Ramazza 等^[7]的实验结果表明 Cu:KNSBN 两波耦合体光栅的分辨率受到光扇噪声

* 河北省自然科学基金(101059)、河北省科技厅(32135104)资助课题。

E-mail: qinglinguo@sina.com

收稿日期: 2003-04-06; 收到修改稿日期: 2003-09-05

的强烈影响。本文以 He-Ne 激光作为光源,实验研究了光扇效应对两波耦合动态过程的影响,并采用考虑光扇效应的修正耦合波方程对晶体中的两波耦合动态过程进行了模拟计算,理论模拟结果与实验测量结果基本一致。

2 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示,其中 BS 为偏振分束器, M_1 、 M_2 为反射镜, HWP_1 、 HWP_2 为半波片, P_1 、 P_2 为偏振片, Ce:KNSBN 晶体为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。实验中信号 I_S 和抽运光 I_P 均为异常偏振光(e光),写入光夹角为 30° ,写入光强比 $I_S:I_P=1.25\text{ mW/cm}^2:62.5\text{ mW/cm}^2=1:50$ 。采用光电探测器 D_1 和 D_2 在晶体另一侧接收 I_S 和 I_P 的透射光 I'_S 和 I'_P ,并由计算机系统自动记录和存储。通过比较耦合前后 I'_S 的变化可以得出两波耦合的能量增益;由单束入射光照射晶体,并实时记录其透射光强的变化,以对其光扇效应进行研究。为了消除残存光栅对测量结果的影响,每次测量后都用一束强光对晶体进行仔细的擦除。

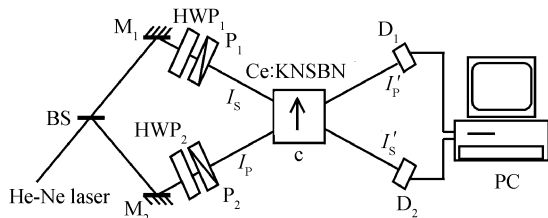


Fig. 1 Experimental setup

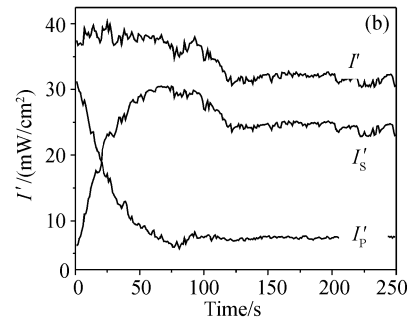
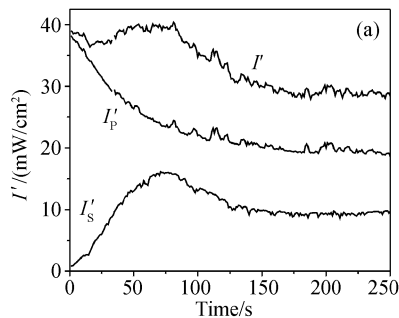


Fig. 3 Temporal evolution of the transmitted light. (a) $I_0=63\text{ mW/cm}^2$, $I_P:I_S=50:1$; (b) $I_0=57\text{ mW/cm}^2$, $I_P:I_S=5:1$

3.2 光扇效应及光扇特性

光扇效应是当一束激光照射光折变晶体时,由于入射光与晶体中近前向散射光之间的耦合而形成的具有一定空间分布的、被放大的扇形光散射。图 4 给

3 实 验

3.1 两波耦合动态过程

实验首先利用数字示波器记录了两波耦合过程中 I'_S 和 I'_P 随时间的变化如图 2 所示。随着时间的增加, I'_S 逐渐增强, I'_P 逐渐减弱,二者的时间变化规律非常对称。然而 I'_P 衰减的幅度要明显大于 I'_S 增强的幅度,显然,抽运光能量并没有完全传递给信号光,有一部分抽运光能量被扇形光所散射。

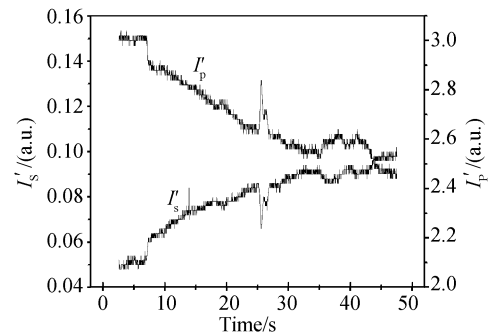


Fig. 2 Temporal evolution of I'_P and I'_S

图 3 给出了不同写入条件下,两波耦合透射光强的时间变化,其中 I'_P 、 I'_S 、 $I'=I'_P+I'_S$,分别为抽运光透射光强、信号光透射光强以及透射光的总光强随时间演化曲线。若将 I' 随时间的衰减理解为光扇损耗,实验显示了 I'_S 、 I'_P 和光扇 I_f 随时间的演化,同时看到 I'_P 随耦合时间增加而减小。比较图 3(a)、图 3(b)可知 I'_P 抽运光能量的衰减程度及两波耦合的响应速度除与光折变晶体材料特性有关外,还与两波耦合过程的写入条件相关。

出了以不同强度抽运光 I_P 照射晶体(信号光关闭),晶体后透射光强 I_P 的变化结果。图中由上到下依次为 $I_P=95.5$ 、 80 、 62.5 、 48 、 35 、 32 、 28 、 26 、 20 、 16 、 9.5 mW/cm^2 时透射光强随时间的变化曲线。当写入

光强大于 35 mW/cm^2 时,透射光强衰减过程明显,透射光强衰减到最小值时间随着 I_P 的增加而减小,这表明写入光强的降低将延缓光扇的形成。若将光扇强度定义为 $I_f = I'_P(t=0) - I'_P(t)$,当 $I'_P(t)$ 到达稳态时,得到稳态光扇强度值 I_f^{sat} 随抽运光写入强度 I_P 变化规律如图 5 所示。当 $I_P < 20 \text{ mW/cm}^2$ 时 I_f^{sat} 很小,可以忽略,而当 $I_P > 20 \text{ mW/cm}^2$ 时 I_f^{sat} 开始增强, $I_P > 30 \text{ mW/cm}^2$ 光扇效应明显。可见 Ce:KNSBN 晶体中的光扇存在明显的写入光强阈值特性^[8]。

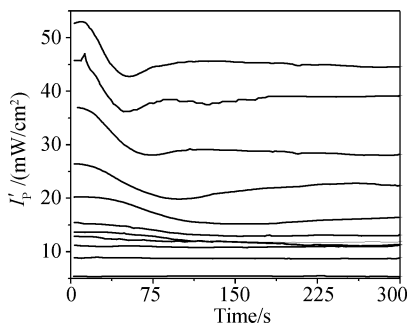


Fig. 4 The variation of I'_P as a function of time

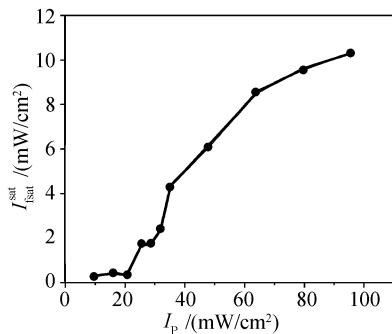


Fig. 5 The incident intensity dependence of fanning

3.3 信号光和抽运光非同时打开对两波耦合动态过程的影响

实验观察到两波耦合过程中当信号光和抽运光打开的顺序和时间间隔不同时,两波耦合能量增益 G (G 定义为 $G = I'_s(I_P \neq 0) / I'_s(I_P = 0)$) 随时间变化也不同,图 6 给出了信号光打开和抽运光打开时间间隔为 $\Delta t = -25, 0, 25, 75 \text{ s}$ 时两波耦合能量增益 G 随时间的变化。当信号光超前打开时, G 的时间曲线与信号光和抽运光同时打开时基本相同, G 在 $t = 120 \text{ s}$ 到达峰值,最大值为 $G = 24.6$;当信号光滞后打开时, G 到达峰值时间随信号光延迟时间 Δt 的增大而延长, G 的最大值随着 Δt 的增大而减小,当 $\Delta t > 75 \text{ s}$ 时, G 的最大值趋于一稳定值约为 $G = 16$ 。由图 5 可知,由于信号光光强 $I_s = 1.25 \text{ mW/cm}^2$ 远远小于实验所得入射光强阈值 20 mW/cm^2 ,可以忽

略信号光的光扇影响,只考虑抽运光的光扇对两波耦合的影响。当信号光滞后打开时,抽运光的光扇在信号光打开之前已经展开,导致信号光打开之后抽运光向信号光能量转移的减弱,造成两波耦合能量增益极大值的相对减弱。信号光延迟时间不同对应两波耦合及光扇的演化过程也不同,这说明光扇对 Ce:KNSBN 晶体两波耦合动态过程有显著影响。

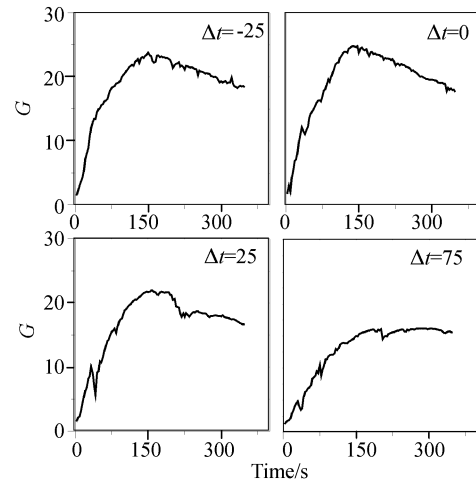


Fig. 6 The dynamic curves of G when the pump and signal beam open non-simultaneously

4 理论分析

对于 Ce:KNSBN 晶体中的两波耦合,由于存在强烈的光扇效应,所以不仅要考虑信号光和抽运光之间的耦合作用,还要考虑光扇散射光与信号光和抽运光之间的耦合作用。Byron 等^[9] 给出以 I_f 表示扇形光束等效总强度的修正的稳态耦合波方程。当忽略光伏效应时,非稳态情况下耦合系数^[10] 为

$$\Gamma(t) = \Gamma[1 - \exp(-t/\tau)],$$

其中 Γ 为两波耦合增益系数, τ 为写入时间常数。假设非稳态信号光与抽运光耦合系数 Γ_{ps} ,抽运光与光扇耦合系数 Γ_P 和信号光与光扇间的耦合系数

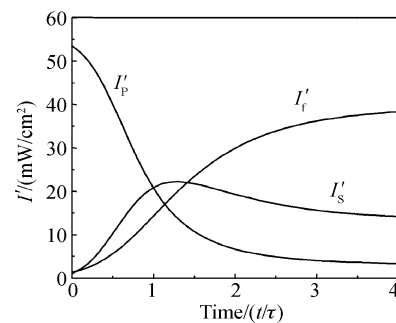


Fig. 7 Dynamic curves of the pump: the signal and the fanning beam intensity

Γ_{IS} 相同,即: $\Gamma_{IS}(t)=\Gamma_P(t)=\Gamma_{PS}(t)=\Gamma(t)$ 。又因为信号光强度很小,可忽略信号光光扇散射对两波耦合的影响,故令信号光扇因子 $f_s=0$;同时设抽运光

的光扇效应因子 $f_p=f$ 为与时间无关的常数,由文献[9]得到描述抽运光、信号光与光扇彼此间相互作用的动态过程的修正耦合波方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_S(t,z)}{dz} = \frac{\Gamma(t)I_S(t,z)I_P(t,z)}{I_0} - \frac{\Gamma(t)I_S(t,z)I_f(t,z)}{I_0} - \alpha I_S(t,z), \\ \frac{dI_P(t,z)}{dz} = -\frac{\Gamma(t)I_S(t,z)I_P(t,z)}{I_0} - fI_P(t,z) - \frac{\Gamma(t)I_P(t,z)I_f(t,z)}{I_0} - \alpha I_P(t,z), \\ \frac{dI_f(t,z)}{dz} = fI_P(t,z) + \frac{\Gamma(t)I_f(t,z)[I_S(t,z) + I_P(t,z)]}{I_0} - \alpha I_f(t,z) \end{cases} \quad (1)$$

对于 Ce:KNSBN 晶体,如取 $\Gamma=7 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha=0.25 \text{ cm}^{-1}$, $f=0.05 \text{ cm}^{-1}$, 晶体厚度 $L=0.5 \text{ cm}$, 选取初始条件为 $I_{S0}=1.25 \text{ mW/cm}^2$, $I_{P0}=62.5 \text{ mW/cm}^2$ 和 $I_{f0}=0$, 由(1)式利用龙格库塔方法对两波耦合动态过程进行计算机数值模拟,结果如图 7。与图 3 比较除抽运光能量的转移程度大小存在差异外,其两波耦合过程中的时间演化特性与实验结果相符合。在相同参量下,图 8 给出了信号光延迟情况下两波耦合动态过程计算机数值模拟结果。计算中假设在未打开信号光前只有抽运光与光扇发生作用,而且只有当信号光打开时,信号光与抽运光的耦合系数才由 0 开始增长。图 8 结果表明:两波耦合能量增益 G 到达峰值时间随信号光延迟时间 Δt 的增大而延长, G 的最大值随着 Δt 的增大而减小,与图 6 实验结果相吻合。

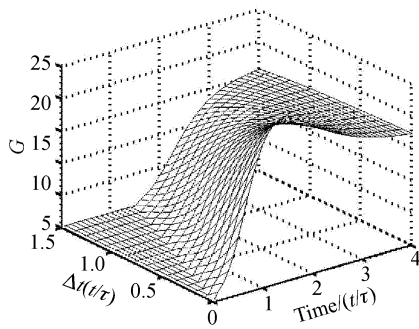


Fig. 8 Computer simulated results of G

结论 实验表明当 He-Ne 632.8 nm 激光在 Ce:KNSBN 晶体中写入体光栅时,光扇效应存在明显的入射光强阈值,入射光强大于 30 mW/cm^2 , 才存在强烈的光扇效应。随着信号光和抽运光打开时间间隔 Δt 的增大,由于光扇对抽运光能量的耗散,两波耦合能量增益到达峰值的时间延长,最大能量增益减小。引入考虑光扇效应的耦合波方程对 Ce:KNSBN

晶体中的两波耦合动态过程进行了模拟计算,计算结果与实验基本一致。

参 考 文 献

- 1 Chen H C, Sun D L, Song Y Y *et al.*. Growth and properties of a TB type photorefractive crystal. *J. Crystal Growth*, 1993, **128**(1~4):880~885
- 2 Guo Qinglin, Fu Guangsheng, Liang Baolai *et al.*. Discrimination enhancement of optical correlation pattern recognition via Ce:KNSBN photorefractive crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6):641~644 (in Chinese)
- 3 Zhao Jianlin, Wu Jianjun, Wang Bin *et al.*. Image edge-enhancement using photorefractive two-waves coupling in Cr:SBN crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1343~1346 (in Chinese)
- 4 Ji Xuanmang, Wang Jinlai, Liu Jinsong *et al.*. Intensity dependence of four-waves mixing at intermediate region in photorefractive crystals. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12):1591~1595 (in Chinese)
- 5 Residori S, Ramazza P L, Zhao Mingjun. Dynamics of beam fanning in Cu-doped KNSBN. *Optics Communications*, 1993, **102**(1~2):100~104
- 6 Li Y, Liu S, Yang M *et al.*. Superior real-time holographic storage and properties in doped potassium sodium strontium barium niobate crystal. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(4):212~214
- 7 Ramazza P L, Zhao Mingjun. Experimental study of two wave mixing amplification in Cu-doped KNSBN. *Optics Communications*, 1993, **102**(1,2):93~99
- 8 Kamber N Y, Xu Jingjun, Mikha S M *et al.*. Threshold effect for photorefractive light-induced scattering and signal beam amplification in doped LiNbO₃ crystal. *J. Appl. Phys.*, 2000, **78**(6):2684~2690
- 9 Byron Q, Yeh P. Fanning noise reduction in photorefractive amplifiers using incoherent erasures. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2):283~287
- 10 Zhuo Zhongxiang, Sun Wanjuan, Jiang Quanzhong *et al.*. Study of the response time of two-coupling in photorefractive crystals. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1996, **23**(2):187~192 (in Chinese)