

# Ce:KNSBN 晶体中的光扇效应及其图像存储

李盼来 郭庆林 王志军 庞立斌 梁宝来

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002. E-mail: lipanlai@sohu.com)

**摘要** 采用非同时读出条件下的两波耦合实验装置, 以单束光入射Ce:KNSBN光折变晶体, 研究了入射光强度和光入射角对Ce:KNSBN晶体中光扇效应的影响. 研究发现, 光扇效应存在明显的入射光强度阈值特性, 入射光强度阈值为  $38.2 \text{ mW/cm}^2$ ; 对应相同的入射光强度, 光入射角  $\theta$  为  $15^\circ$  时稳态光扇强度  $I_{fsat}$  最强. 研究了入射光调制对晶体中光扇噪声及体全息存储的影响, 入射光调制抑制了光扇噪声对Ce:KNSBN晶体两波耦合及体全息存储的影响, 使得再现图像质量得到了明显改善.

**关键词** Ce:KNSBN 晶体 光扇效应 阈值特性 图像存储

“光扇”是高增益光折变材料中最常见的一种光感应光散射, 作为噪声严重影响着光折变晶体在光存储和光学信息处理等领域中的应用. 目前人们已经对LiNbO<sub>3</sub>晶体中的光扇效应进行了较详细的研究, 如刘思敏等人<sup>[1]</sup>认为Fe离子的掺入是LiNbO<sub>3</sub>晶体中扇形散射光增强的重要原因; 而Zhang等人<sup>[2]</sup>通过在LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中加入抗光折变杂质离子Mg, 从而减弱了晶体的光折变效应, 在一定程度上抑制了光扇噪声; Zhang等人<sup>[3]</sup>在LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中加入Mg<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>和n<sup>3+</sup>等抗光折变杂质离子, 改变了出现扇形噪声的阈值光强. 此外, 对掺杂KNSBN晶体中的光扇效应也进行了一些探索, 如Residori等人<sup>[4]</sup>研究了Cu:KNSBN晶体不同c轴取向时光扇效应的动态过程; Ramazza等人<sup>[5]</sup>认为Cu:KNSBN晶体两波耦合体光栅的分辨率受到了光扇噪声的强烈影响; 张金平等<sup>[6]</sup>利用泵浦光的o光分量对扇形散射光的非相干擦除作用, 提高了Ce:KNSBN晶体两波耦合有效增益; 郭庆林等人<sup>[7]</sup>研究了Ce:KNSBN晶体两波耦合中光扇效应的动态响应过程. 但是, 如何抑制掺杂KNSBN

晶体中的光扇噪声, 进而改善晶体全息存储质量等问题还在进一步的研究之中. 本文采用单频 532 nm 激光入射Ce:KNSBN晶体, 系统地研究了Ce:KNSBN晶体中光扇效应随入射光强度及光入射角的变化情况; 引入调制技术, 探索了入射光调制对晶体中光扇噪声及体全息存储的影响, 并对实验结果进行了相应的物理分析.

## 1 实验

图 1 为非同时读出条件下晶体两波耦合实验装置. 单频固体激光器输出的 532 nm 激光经偏振分光晶体 BS 分为两束作为信号光  $I_s$  和泵浦光  $I_p$ .  $I_s$  和  $I_p$  对称的入射到晶体上, 光入射角为  $2\theta$ . 光电探测器  $D_1$  和  $D_2$  分别接收  $I_s$  和  $I_p$  在晶体另一侧的透射光  $I'_s$  和  $I'_p$ . 通过测量加载  $I_p$  前后  $I'_s$  的变化, 可得有效增益  $G$ ; 关闭信号光, 记录  $I'_p$  的时间演化情况, 可以研究晶体中光扇效应的入射光强阈值特性. 图 1 中  $M_1$  和  $M_2$  为宽带金属膜反射镜, HWP<sub>1</sub> 和 HWP<sub>2</sub> 为半波片,  $P_1$  和  $P_2$  为偏振片, 实验所用晶体为山东大学晶体研究

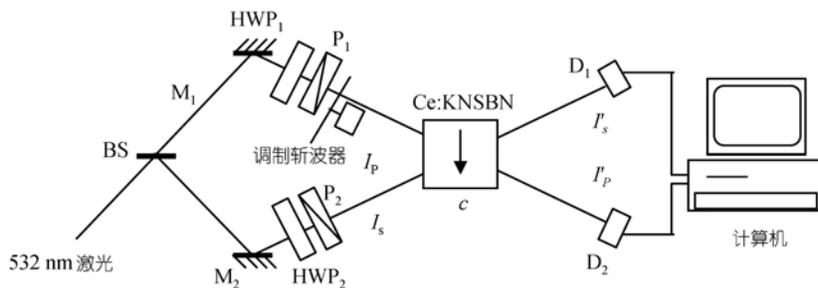


图 1 实验装置

2006-09-28 收稿, 2006-11-27 接受

河北省自然科学基金项目(批准号: F20060010023)资助

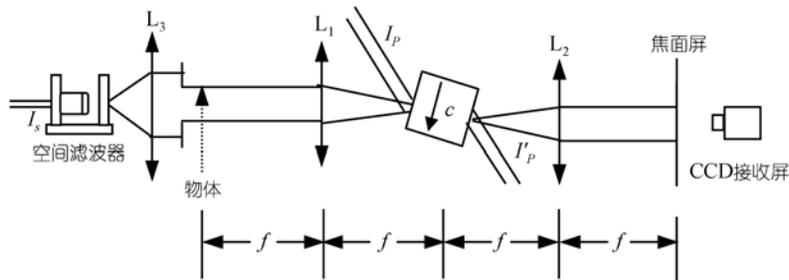


图2 图像存储与读出装置

所生产的 5 mm×5 mm×5 mm Ce:KNSBN 晶体. 用图 2 代替图 1 中信号光部分, 其中傅立叶透镜 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 组成 4f 系统, 通过晶体两波耦合将物体的信息记录在 4f 系统频谱面上的 Ce:KNSBN 晶体中, 以连续的泵浦光读取存储在晶体中的信息, 通过晶体后的 L<sub>2</sub> 将再现图像, 成在置于 L<sub>2</sub> 后焦面的屏上, 利用 CCD 采集接收屏上的成像.

## 2 结果与讨论

### 2.1 入射光强度及光入射角对光扇效应的影响

定义光扇强度为  $I_f(t) = I_{t=0} - I_t$ , 当  $I(t)$  到达稳态时, 可得稳态光扇强度  $I_{fsat}$  [8]. 采用非寻常光入射晶体, 选取光入射角  $\theta$  分别为 10°, 12°, 14°, 15°, 16° 和 18°, 通过记录各  $\theta$  角, 入射光强度  $I$  分别为 12.7, 5, 38.2, 51.0 和 57.3 mW/cm<sup>2</sup> 时, 透射光强  $I'$  随时间的演化情况, 计算可得  $I_{fsat}$ , 结果如图 3 和 4. 由图 3 可以看出,  $I$  较小时,  $I_{fsat}$  随  $I$  增大的趋势并不明显; 只有当  $I$  大于 38.2 mW/cm<sup>2</sup> 时,  $I_{fsat}$  才开始随  $I$  的增强而明显增强, 这表明光扇效应存在明显的入射光强度阈值特征, 且各  $\theta$  角下入射光强度阈值均为 38.2 mW/cm<sup>2</sup>,

但是, 对应相同的  $I$  值,  $\theta$  不同时,  $I_{fsat}$  不同. 由图 4 看出,  $I_{fsat}$  先随  $\theta$  的增大而增大, 当  $\theta$  为 15° 时到达峰值, 而后随  $\theta$  的增大  $I_{fsat}$  减小; 同时, 对应相同的  $\theta$  时,  $I_{fsat}$  会随着  $I$  的增大而增大, 如  $\theta$  为 15° 时, 随  $I$  的增大,  $I_{fsat}$  由 0.23 增大到 1.81 mW/cm<sup>2</sup>.

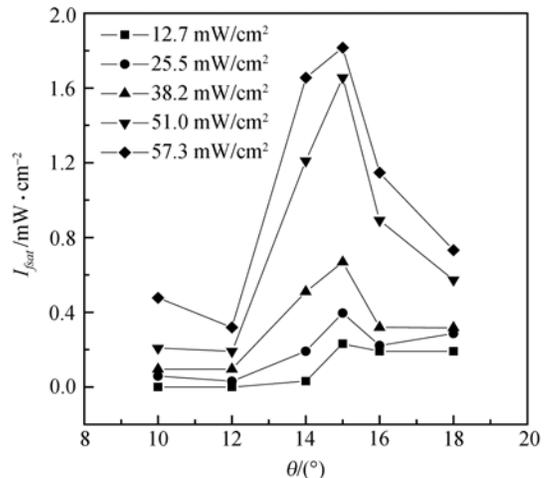


图4 稳态光扇强度随光入射角的变化情况

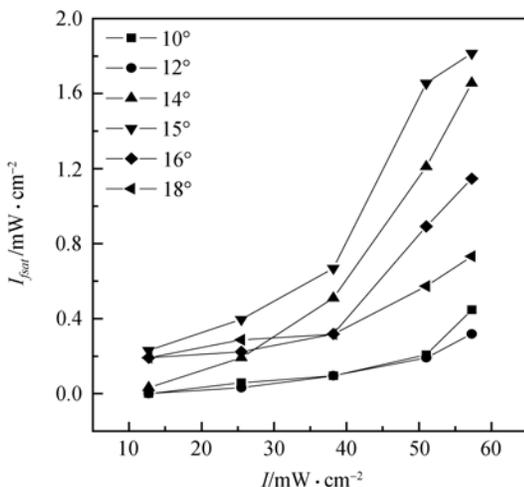


图3 稳态光扇强度随入射光强度的变化情况

综合以上结果可知 Ce:KNSBN 晶体中的光扇效应明显依赖于入射光强度和光的入射角. 分析认为, 光扇是入射光与晶体中近前向散射光之间的光耦合所形成的具有一定空间分布的、被放大的散射光, 即实质是 Ce:KNSBN 晶体中入射光与散射光的多组两波耦合, 以前的研究结果证明当入射光为非寻常光且光入射角为 15° 时, Ce:KNSBN 晶体中的有效两波耦合增益系数最大 [9], 因此该条件下的稳态光扇强度也最大. 此外, 光入射角的改变也会造成激光束在晶体有效传播光程的改变. 计算表明, 当光入射角分别为 10° 和 15° 时, 二者的有效光程差小于总有效光程的 1%, 因此可忽略激光束在晶体实际传播产生的有效光程差带来的影响. 而 Ce:KNSBN 晶体中的光扇效应存在明显的入射光强度阈值, 且入射光强度

阈值不依赖于光入射角, 可从光扇的实质找到合理解释. 光扇是 Ce:KNSBN 晶体中入射光与散射光的多组两波耦合, 其建立是晶体中散射光与入射光形成噪声光栅的一个自洽过程, 由于 Ce:KNSBN 是扩散型电荷迁移的光折变晶体, 所以散射光自动满足布喇格相位匹配条件而得到衍射放大. 但是, 噪声光栅的形成依赖于入射光的强度以及晶体中杂质、空位和缺陷的浓度, 当入射光强度较小时, 光生载流子很少, 这些载流子甚至不足以填充光照区附近的受主中心, 因此不会形成载流子的浓度梯度周期分布, 也就不会形成折射率光栅. 只有当入射光强度足够大, 光生载流子足够多, 这些载流子可以迅速填充光照区附近的受主中心, 并通过不断的激发、迁移和俘获过程扩散到暗光区从而形成噪声光栅, 故噪声光栅的形成存在入射光强阈值特性, 只有当入射光强高于阈值光强时, 才能形成噪声光栅, 且入射光强的阈值只依赖于晶体本身的杂质、空位和缺陷的浓度, 而与光入射角无关.

2.2 入射光调制对晶体中光扇噪声的影响

( ) 入射光调制对晶体两波耦合动态过程的影响.

一般情况下, 晶体两波耦合实验中的信号光较弱, 低于光扇效应的入射光强度阈值, 因此只对强度较大的泵浦光进行调制. 为了便于观察入射光调制对晶体中光扇噪声的影响, 实验中先打开泵浦光 100 s, 然后再引入信号光实现晶体两波耦合. 打开图 1 中的调制斩波器, 实现 Ce:KNSBN 晶体两波耦合, 光入射角  $2\theta = 30^\circ$ , 入射光强度  $I_o = I_p + I_s = 50 \text{ mW/cm}^2$ , 入射光光强比  $I_p/I_s = 50$ . 利用实时数据采集系统记录加载泵浦光后信号光的透射光强  $I_s'$  随时间变化情况, 图 5 给出了其包络曲线, 其中曲线 a 代表信号光与泵浦光同时打开情况; 曲线 b 为信号光滞后泵浦光 100 s 打开情况; 曲线 c 为信号光滞后泵浦光调制(调制斩波占空比为 1:1, 调制频率 175 Hz)情况. 由曲线 a 可以看出, 开始时刻晶体两波耦合过程抑制了光扇的发展, 从而  $I_s'$  随时间的延长而增大, 当两波耦合作用时间约为 150 s 时,  $I_s'$  到达峰值约为  $5.1 \text{ mW/cm}^2$ , 而后由于光扇逐渐建立, 消耗了泵浦光能量, 致使  $I_s'$  逐渐下降. 当两波耦合作用时间约为 250 s 时,  $I_s'$  下降到稳定值约为  $4.4 \text{ mW/cm}^2$ , 说明此时光扇建立完成; 而曲线 b 显示, 由于泵浦光先于信号光打开 100 s, 致使泵浦光光扇在晶体两波耦合开始之前就得到了充

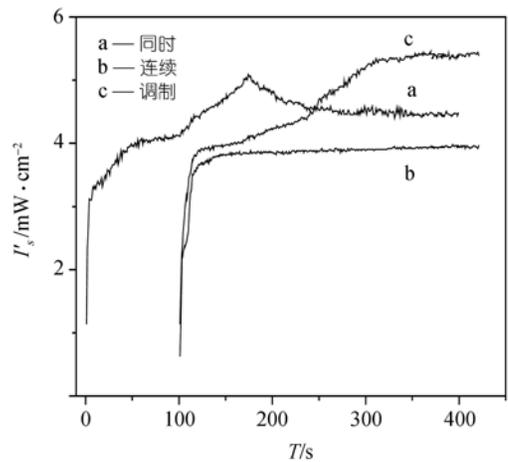


图 5 各条件下  $I_s'$  的时间演化曲线

分发展, 消耗了泵浦光的能量, 当晶体两波耦合开始后, 在晶体内只建立折射率光栅, 通过光栅衍射, 泵浦光向信号光转移能量, 然而  $I_s'$  变化比较平缓, 没有明显的峰值, 稳态值约为  $3.9 \text{ mW/cm}^2$ ; 曲线 c 显示, 开始时刻由于晶体两波耦合折射率光栅的建立抑制了光扇的发展, 因此曲线 c 的演化趋势与曲线 a 类似. 但两波耦合作用时间为 150 s 时, 二者的演化趋势开始不同, 曲线 c 中  $I_s'$  没有减小而是继续增大, 稳定值约为  $5.4 \text{ mW/cm}^2$ . 这主要是由于晶体两波耦合过程中调制双光束中的泵浦光, 使得两束光之间产生了微小的频差, 在晶体中形成运动的干涉条纹; 同时, 光辐照产生的光生伏特电场会使光栅运动, 在一定的调制周期下, 当运动的干涉条纹与运动的光栅之间有合适的位相差时, 晶体中的光扇噪声就会得到抑制, 从而使泵浦光向信号光转移的能量增加, 信号光透射光强变大.

( ) 调制频率随光入射角的变化情况

在上述 ( ) 实验的基础上, 选取入射光总光强  $I_o = 50 \text{ mW/cm}^2$ , 入射光光强比  $I_p/I_s = 50$ , 研究调制频率和增益改善  $G_m/G_f$  随光入射角  $2\theta$  的变化情况, 其中  $G_m$  为泵浦光调制下获得的最大增益  $G = \frac{I_s(d)_{I_p \neq 0}}{I_s(d)_{I_p = 0}}$ ,  $G_f$  为同条件下未调制时所获增益, 结果如图 6 和 7. 由图 6 可以看出, 随  $2\theta$  的增大, 调制频率逐渐减小, 如  $2\theta = 24^\circ$  时, 对应的调制频率为 225 Hz;  $2\theta = 30^\circ$  时, 对应的调制频率为 175 Hz. 图 7 显示, 随  $2\theta$  的增大  $G_m/G_f$  先增大后减小, 当  $2\theta = 30^\circ$  时,  $G_m/G_f$  到达峰值 1.45.

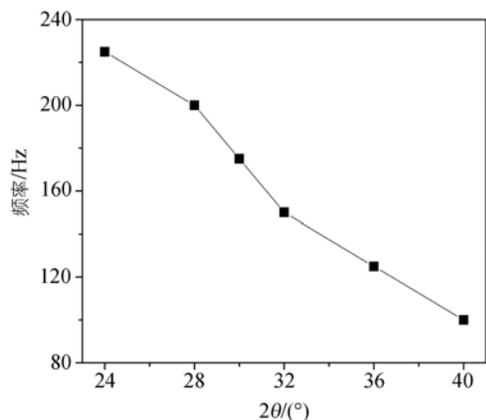


图6 调制频率随光入射角的变化

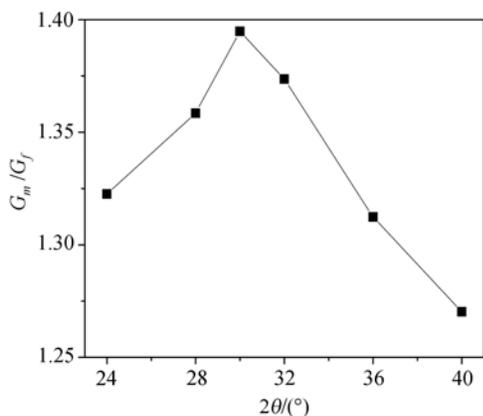


图7 增益改善随光入射角的变化

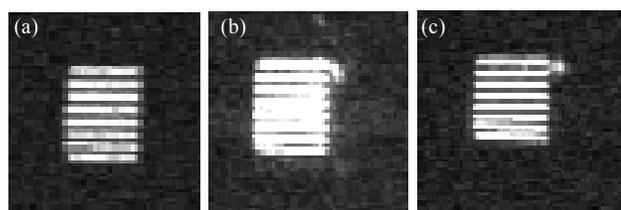


图8 各条件下再现图像

(a) 泵浦光关闭时, 物在屏上所成的像; (b) 泵浦光未调制情况下的再现图像; (c) 泵浦光调制情况下的再现图像

### 2.3 入射光调制对晶体图像存储的影响

根据上述实验结果, 以图2光路代替图1中信号光部分, 进行入射光调制条件下的晶体全息存储实验. 实验中调制频率取 175 Hz, 调制斩波占空比取 1:1, 为了使调制与未调制达到相同的增益效果, 特取调制记录时间为未调制时的两倍, 记录结果如图8. 图8(a)为泵浦光关闭时, 物在屏上所成的像; 图8(b)

和(c)分别为泵浦光未调制和调制情况下所得到的再现图像. 比较图8(a)和(b), 由于光扇噪声的影响, 图8(b)中边界和条纹部分都比较模糊, 丧失了图8(a)的细节; 而图8(c)中条纹和边界处都很清晰, 与图8(a)所含信息基本一致. 上述结果表明入射光调制抑制了 Ce:KNSBN 晶体中的光扇噪声, 改善了再现图像的质量.

### 3 结论

以单束 532 nm 激光入射 Ce:KNSBN 晶体, 系统研究了 Ce:KNSBN 晶体中光扇效应随入射光强度及光入射角的变化情况. 实验结果表明, Ce:KNSBN 晶体中的光扇效应存在明显的入射光强度阈值特性, 且该阈值与光入射角无关, 为 38.2 mW/cm<sup>2</sup>; 对应相同的入射光强度, 随光入射角  $\theta$  的增大, 稳态光扇强度  $I_{fsat}$  先增加后减小, 当  $\theta = 15^\circ$  时到达峰值; 同时对相同的光入射角时,  $I_{fsat}$  会随着入射光强度的增大而增大. 采用入射光调制技术可抑制晶体中的光扇噪声, 提高晶体两波耦合有效增益, 从而获得高质量的晶体全息存储再现图像.

### 参 考 文 献

- 1 刘思敏, 郭儒, 许京军. 光折变非线性光学及其应用. 北京: 科学出版社, 2004. 265—279
- 2 Zhang G Y, Xu J J, Sun Q, et al. Study of resistance against photorefractive light-induced scattering in LiNbO<sub>3</sub>:Fe, Mg crystals. Proc SPIE, 1995, 2529: 14—17 [DOI]
- 3 Zhang G Q, Zhang G Y, Liu S, et al. The threshold effect of incident light intensity for the photorefractive light-induced scattering in LiNbO<sub>3</sub>:Fe, M (M = Mg<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, In<sup>3+</sup>) crystals. Appl Phys, 1998, 83(8): 4392—4396 [DOI]
- 4 Residori S, Ramazza P L, Zhao Mingjun. Dynamics of beam fanning in Cu-doped KNSBN. Opt Comm, 1993, 102(1-2): 100—104 [DOI]
- 5 Ramazza P L, Zhao M J. Experimental study of two wave mixing amplification Cu doped KNSBN. Opt Comm, 1993, 102(1-2): 93—99 [DOI]
- 6 张金平, 郭庆林, 魏艳红, 等. 光扇效应对 Ce:KNSBN 记录偏振组态的影响. 光学学报, 2004, 24(3): 309—312
- 7 郭庆林, 刘峰, 梁宝来, 等. Ce:KNSBN 晶体两波耦合中的光扇效应. 光学学报, 2004, 24(4): 527—530
- 8 Segev M, Ophir Y, Fischer B. Nonlinear multi two-wave mixing, the fanning process and its bleaching in photorefractive media. Opt Comm, 1990, 77(2-3): 265—268 [DOI]
- 9 梁宝来, 王肇圻, 官玖洪, 等. Ce:KNSBN 光折变晶体光栅衍射特性研究. 光学学报, 2000, 20(7): 1021—1025