

掺杂铌酸锂薄晶体光爬行耦合*

赵 桦 张景文 孙秀冬 李艳秋 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

摘 要 实验研究了掺杂 LiNbO_3 薄晶体中非直接相交的两束光之间大角光致散射的光爬行(light crawling)耦合现象。研究了相同材料制备的厚度不同样品的二波和四波耦合的成像质量存在差异的原因。

关键词 二波耦合, 大角光致散射, 分辨率。

1 引 言

由于光折变晶体具有高灵敏度, 可使其中初始的弱的散射光得到显著加强。因此, 光致散射(衍射)受到光折变研究领域的关注^[1~4]。随着光折变效应的应用研究日益深入, 薄晶体样品中有效指数增益系数提高等现象引起人们的注意^[5,6]。伴随着薄晶体样品中二波耦合的能量转移, 显著的大角光致散射^[6~8]被观察到。在低吸收的薄晶体中, 大角光致散射光在两通光表面上发生多次全内反射形成沿晶体光轴方向的爬行光, 这种光爬行现象使两束不直接相交的光束之间发生能量耦合^[6]。

本文较详细研究了掺杂铌酸锂(LiNbO_3)薄晶体中两束不直接相交光之间的能量耦合, 且测量了放大倍数随两束光间距的依赖关系。研究了采用薄样品时系统成像质量的提高。

2 光爬行耦合现象的研究

光爬行能量耦合实验原理如图1所示。两相干光束(信号 I_{10} 与泵浦 I_{20})由工作在基横模 TEM_{00} 的氩离子激光器提供, 输出波长为 $\lambda = 488 \text{ nm}$, 实验用未还原双掺杂 $\text{Ce} : \text{Fe} : \text{LiNbO}_3$ 晶体样品, 吸收系数 $\alpha = 1.67 \text{ cm}^{-1}$, 样品尺寸 $20.0 \times 20.0 \times 0.96 \text{ mm}^3$, 光轴在 $20.0 \times 20.0 \text{ mm}^2$ 面内且平行于一边。为了加强泵浦光的光爬行现象, 把泵浦光适当扩束(直径 $D = 5.5 \text{ mm}$), 使其大于样品厚度($\delta = 0.96 \text{ mm}$), 且比低强度的信号光 I_{10} 的直径($d = 1.0 \text{ mm}$)大得多。两束光照射在晶体表面上的光斑中心间距用 Δ 表示。

实验中, 可使非直接相交的泵浦光与信号光入射于晶体上, 两束光对于晶体均为非常光。最初由于泵浦光没有强的大角光致散射的爬行光出现, 两束光之间没有能量耦合。对应

* 本课题得到黑龙江省自然科学基金资助。

收稿日期: 1993年6月16日; 收到修改稿日期: 1993年8月23日

泵浦光强 $I_{20} = 380 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，信号光强 $I_{10} = 38 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 情况下，大约 1 min 时，开始在晶体的光轴方向观察到较强的大角散射光，相应的透射信号光开始出现能量耦合所呈现的强度起伏，约 3 min 时，可以观察到很强的大角散射光(如图 2(a)所示)，由于晶体吸收系数较小，晶体内大于全内反射角的散射光多次反射行进的光迹可以在晶体表面上清楚观察到。此

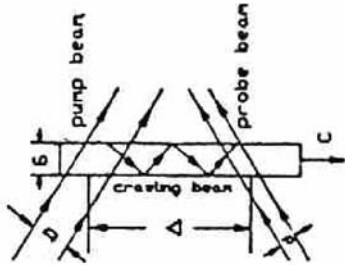


Fig. 1 Schematic diagram of coupling between two beams that are not overlapped directly via light crawling

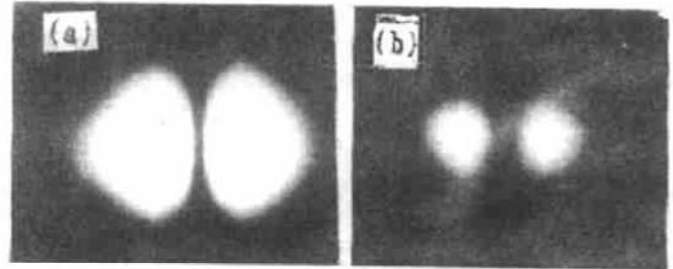


Fig. 2 (a) Scattering light with large angle (near to $\pm 90^\circ$) originate from pump beam while the probe beam is amplified; (b) reconstructed pump scattering light with large angle by probe beam

时爬行光与信号光的能量耦合更加剧烈，挡掉入射泵浦光，信号光可以再现泵浦光的大角散射光，再现结果示于图 2(b)(图(a)和图 2(b)均为在垂直 c 轴的某一面内摄取)，这说明在挡掉泵浦光之前信号光和与之相遇的爬行光已记录了光栅。当非直接相交的泵浦光与信号光同时入射时，出现了信号光与爬行光之间剧烈的能量耦合，此时两光斑间距 $\Delta = 4.8 \text{ mm}$ 。初始透射信号光强为 I'_{10} ，爬行光与信号光间的能量转移过程由图 3 所示。此时，泵浦光的透射光强减小到初始透射值的 7.6%，亦即此时 92% 的泵浦光能转化为小角与大角散射光。且由于信号与爬行光耦合对透射泵浦光影响较小，从而使透射泵浦光不随时间变化(如图 3 中的 I_2 所示)。另外，图中透射信号的非稳定性说明信号光与爬行光作用是一个多波耦合过程^[9,10]。爬行光之间由于夹角较小故相互耦合也较小，信号光与爬行光束形成的多组光栅的能量竞争致使透射信号光的能量表现出非稳定性。

为定量给出这一耦合的放大作用，测量了上述实验条件下的最高透射信号增益系数 γ 随两光束光斑间距 Δ 的依赖曲线(如图 4 所示)。实验观察到，当 $\Delta = 15 \text{ mm}$ 时尚存在爬行光到信号光的能量耦合，可见薄 LiNbO_3 晶体中光爬行对能量耦合的显著影响。

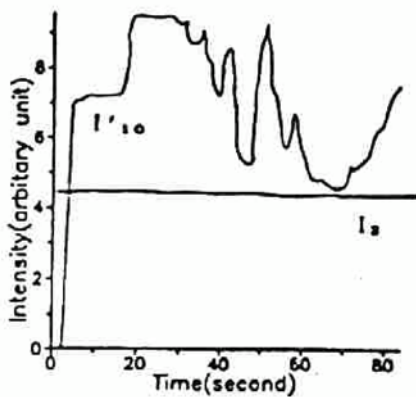


Fig. 3 Dynamic curve of transmission intensity of the probe beam with time. $D = 5.0 \text{ mm}$, $\Delta = 4.8 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $\gamma = 1.32$

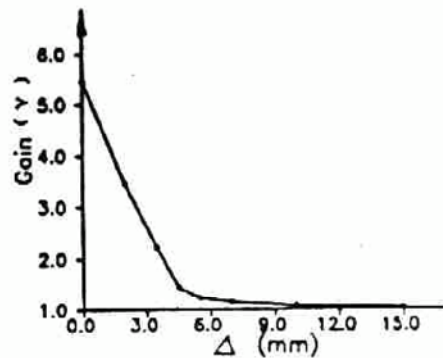


Fig. 4 Gain of the probe beam versus distance of the center of the spots of the pump and probe beams

由于信号光只和与其相遇的爬行光记录光栅，即再现散射光强度明显减少，故在垂直于光轴方向扩大泵浦光斑尺度，对爬行耦合增强作用不大。为此，可以采用柱面镜压缩泵浦光斑垂直于光轴方向尺寸的方法，其结果加快了泵浦光的爬行光出现的速度，明显加强了非直接相交光束之间的能量耦合。对应图 4 的实验条件，光斑长轴(沿晶体光轴 c 的方向，也是两光斑中心的连线方向) $2a = 5.5 \text{ mm}$ ， $\Delta = 4.0 \text{ mm}$ ，当光斑短轴(垂直于晶体光轴 c) $2b = 2.5 \text{ mm}$ 时，透射信号增益 $\gamma = 3.5$ ，当 $2b = 1.7 \text{ mm}$ 时， $\gamma = 7.2$ ，当 $2b = 1.0 \text{ mm}$ 时， $\gamma = 18.3$ 。由于信号光的强度很弱，因此，可忽略信号光的爬行光。当以寻常光入射晶体时，没有明显的光爬行现象出现，因而没有观察到能量耦合。

3 薄样品成像质量的提高

上述光爬行耦合的实验结果进一步证明了文献[6]中关于爬行光增大有效指数增益系数的机理分析，即在二波耦合实验中一般被认为引起噪声的散射光，在薄样品中起到了提高增益的作用。但在薄晶体用于实际信息处理的过程中，大角度散射光对成像质量的影响，是一个有待研究的实际问题。压缩照射于光折变晶体样品上的光斑尺寸从而压低散射噪声，提高透射光斑的质量早在 1986 年已见报道。在晶体样品厚度固定的情况下，缩小入射光斑尺寸，可以显著压低透射光斑周围分布的激光散斑数目^[11]。受他们工作的启发，作者完成了如下薄、厚样品成像质量比较的实验，实验所用材料是由同一块晶体切下的两块经还原处理的 $\text{Ce} : \text{Fe} : \text{LiNbO}_3$ 样品，当氩离子激光器输出波长为 488 nm 时，其吸收系数 $\alpha = 19 \text{ cm}^{-1}$ 。厚晶体样品厚度 $\delta = 2.00 \text{ mm}$ ，二波耦合实测最佳指数增益系数 $\Gamma = 33 \text{ cm}^{-1}$ ；薄晶体样品厚度 $\delta = 0.60 \text{ mm}$ ，二波耦合实测最佳指数增益系数 $\Gamma = 139 \text{ cm}^{-1}$ 。利用此二样品对弱入射图象大写英文字母“T”进行放大，作图象二波耦合的实验条件相同。泵浦光与信号光晶体外夹角 $2\theta = 24^\circ$ ，泵浦光强 $I_{20} = 1.28 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，用焦距 $f = 308 \text{ mm}$ 的透镜记录傅里叶全息图，对应输出图象示于图 5。其中(a)是对应厚晶体样品的输出放大图象；(b)是对应薄晶体样品的输出放大图象。

薄晶体样品成像质量提高的原因可作如下定性解释。对于同一块相同晶体材料的不同部分，单位体积内固有缺陷及杂质浓度的平均数大致相同。由于信号光截面相同，在薄样品中，信号光遇到的固有缺陷的数目比在厚样品中遇到的固有缺陷的平均数目要少得多。另外，对应相同泵浦光截面，分布于透射光斑周围的小角度散射光在厚样品中与泵浦光的作用长度比薄样品中的相应作用长度大得多(图 6)，所以薄晶体样品的二波耦合放大图象噪声较低。

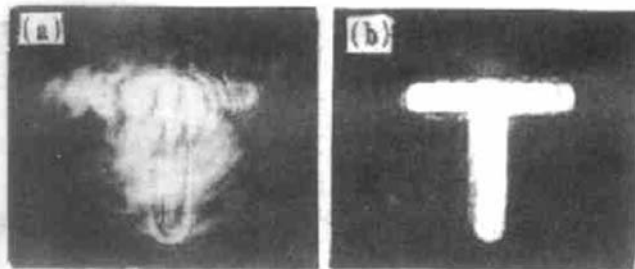


Fig. 5 Comparison of amplified images between the two samples; (a) output image of thick one, (b) output image of thin one

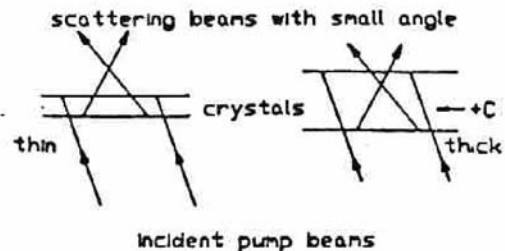


Fig. 6 Schematic diagram of interaction length between pump and scattering beam with small angle in samples with different thickness

取自同一块晶体而制备的厚度不同的样品的简并四波耦合的位相共轭输出图像的像质也有显著差别。实验以我国通用的 WT-1005-62 系列分辨率板图案 N_3 号作输入图像, 在完全相同的实验条件下, 测量了上述厚、薄晶体样品四波耦合成像质量(图 7), 图 7(a)是对应厚样品的位相共轭输出图像, 图 7(b)是对应薄样品的位相共轭输出图像。正向泵浦光功率为 37 mW, 反向泵浦光功率为 76 mW, 入射信号功率为

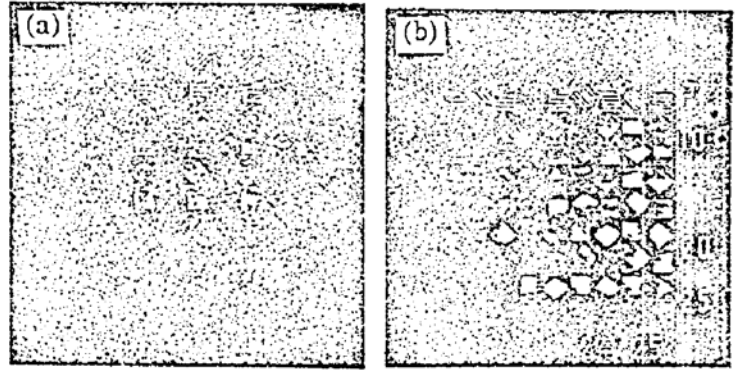


Fig. 7 Phase-conjugate replica of the resolution chart N_3 of the system WT-1005-62 employing degenerate four wave mixing: (a) output image of the thick sample; (b) output image of the thin sample

0.3 mW, 正向泵浦光与入射信号光夹角 $2\theta = 24^\circ$ 。从输出的位相共轭象可以看出, 采用薄晶体样品时系统成像分辨率 > 25 $\mu\text{l}/\text{mm}$, 采用厚晶体样品时系统成像分辨率为 16 $\mu\text{l}/\text{mm}$ 左右。

结 论 总之, 在掺杂 LiNbO_3 光折变晶体薄样品中, 存在着较强的大角光致散射的光爬行耦合现象, 致使不直接相交于晶体样品的两束光通过光爬行发生能量转移。对于同一掺杂 LiNbO_3 光折变晶体材料制备的不同厚度样品, 薄样品具有更好的成像质量。由此可知, 适当减小晶体样品厚度, 可以降低能耗, 减低信号噪声, 节省材料。这对未来微光子学中的器件集成将大有裨益。

本文作者感谢南开大学张光寅教授对文中部分内容极有价值的讨论。感谢哈尔滨工业大学徐玉恒高高工和李铭华副教授提供了晶体样品。

参 考 文 献

- [1] 吴仲康, 王进雄, 张光寅等, $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 的光致光衍射. 物理学报, 1987, 36(9): 1203~1207
- [2] 刘思敏, 张光寅, 武原庆, $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中光感应自衍射观察. 物理学报, 1988, 37(2): 268~273
- [3] 许克彬, 徐海英, 洪 晶等, 光折晶体 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 中的光致散射效应. 中国激光, 1989, 16(9): 532~535
- [4] 边少平, 张景文, 许克彬等, 掺杂钾铌酸锶钡光折变晶体的各向异性衍射. 物理学报, 1993, 42(4): 681~690
- [5] R. A. Vezquez, F. R. Vachss, R. R. Neurgaonkar *et al.*, Large photorefractive coupling coefficient in a thin cerium-doped strontium barium niobate crystal. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, 8(9): 1932~1939
- [6] Zhang Jingwen, Sun Wanjun, Bian Shaoping *et al.*, Very high photorefractive gain in two-beam coupling with thin iron-doped LiNbO_3 crystal. *Chinese Phys. Lett.*, 1993, 10(4): 227~230
- [7] P. A. Augustov, M. J. Reinfeld, K. K. Shvarts, Photofraction and anisotropic light scattering in $\text{LiNbO}_3\text{-Fe}$ crystals. *Appl. Phys. (A)*, 1982, 29(): 169~171
- [8] 张光寅, 武原庆, 刘思敏等, $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 晶体薄片中的光爬行效应. 中国激光, 1987, 14(8): 511~513
- [9] J. Ma, L. Liu, S. Wu *et al.*, Multibeam coupling in photorefractive $\text{SBN}:\text{Ce}$. *Opt. Lett.*, 1988, 13(11): 1020~1022
- [10] L. Klees, C. Denz, T. Tschudi, Intensity crosstalk and angular selectivity of multibeam coupling in

photorefractive BaTiO₃. *Opt. Commun.*, 1990, 77(1): 65~70

- [11] G. Zhang, Q. Li, P. Ho *et al.*, Dependence of specklon size on the laser beam size via photo-induced light scattering in LiNbO₃: Fe. *Appl. Opt.*, 1986, 25(17): 2955~2959

Beam Coupling Based on Light Crawling in Thin Doped LiNbO₃ Crystals

Zhao Hua Zhang Jingwen Sun Xiudong Li Yanqiu Xu Kebin

(*Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006*)

(Received 16 June 1993; revised 23 August 1993)

Abstract The coupling of two beams that are not overlapped directly in thin doped LiNbO₃ crystals based on light crawling originating from scattering beams with large angle is studied experimentally. The reason that samples with different thickness fabricated from the same bulk material show obvious discrepancy of imaging quality in two-wave mixing and degenerate four-wave mixing is analyzed qualitatively.

Key words two-bam coupling, photo-induced scattering with large angle, resolution.