

自泵浦位相共轲器中自增强现象与 光致宏观电场*

赵桦 周忠祥 李焱 孙秀冬 许克彬

张景文 王继扬 陈焕矗

(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 研究了自泵浦位相共轲器利用间歇入射光在无光照期间的新奇的自增强现象。发现采用间歇入射光可以显著缩短掺铋与掺锰钾钠铌酸锶钡单晶自泵浦位相共轲器的响应时间。通过实测晶体的光伏与热释电电场, 利用电荷输运的基本模型, 对实验现象给出了定性解释, 且给出了进一步的实验验证。据此, 分析了自泵浦位相共轲器的保真度下降的原因。

关键词 自增强现象, 响应时间, 自泵浦位相共轲器

近年来, 光折变非线性光学中位相共轲光学分支引起了国内外科学家愈来愈多的关注^[1]。其中利用组态简单的自泵浦与互泵浦位相共轲器实现位相共轲操作逐渐成为研究热点之一^[2~7]。历经二十余年的研究与探索, 光折变效应的应用研究成为第一主题。而进入实用阶段之前尚存在若干亟待解决的问题, 诸如位相共轲保真度及响应时间等等。本文报道的正是涉及猫式自泵浦位相共轲器中光致宏观电场对响应时间影响的新奇的自增强现象, 且对内电场对位相共轲保真度的降低进行了实验研究。

1 自泵浦位相共轲器的自增强现象 的实验观察

实验装置如图1所示。选用工作在多纵模状态的 Lexel 氩离子激光器作光源, 入射光波被一大孔径分束镜 BS 分为两束。两个光电探测器 D_1 , D_2 分别用于接收位相共轲波与前向多级反射波的信号^[8], 插入入射路径的快门 S 用于改变入射光方式。本文实验中所用样品均为山东大学晶体所生产的掺杂钾钠铌酸锶钡 (简称为 KNSBN) 单晶。实验中所用样品的尺寸分别为 $6.4\text{ mm} \times 6.4\text{ mm} \times 4.2\text{ mm}$ (样品 1, Ce: KNSBN), 8.4 mm

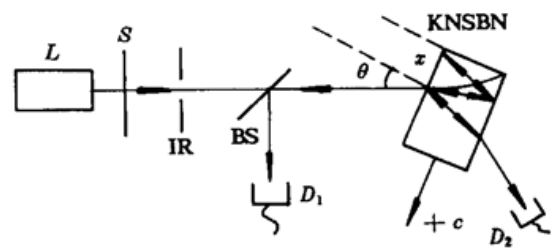


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus used to observe the self-enhancement phenomenon
 L : laser; S : shutter; IR : iris; BS : beam splitter; D_1, D_2 : photoelectric detectors

* 黑龙江省自然科学基金及山东大学晶体材料重点实验室的资助项目。

收稿日期: 1995年10月19日; 收到修改稿日期: 1996年2月8日

×5.1 mm×6.1 mm(样品 2, Mn:KNSBN)。晶体放置采用最易形成猫式自泵浦位相共轭输出的方位。激光器选择光控状态,以保证入射光强为稳定值。

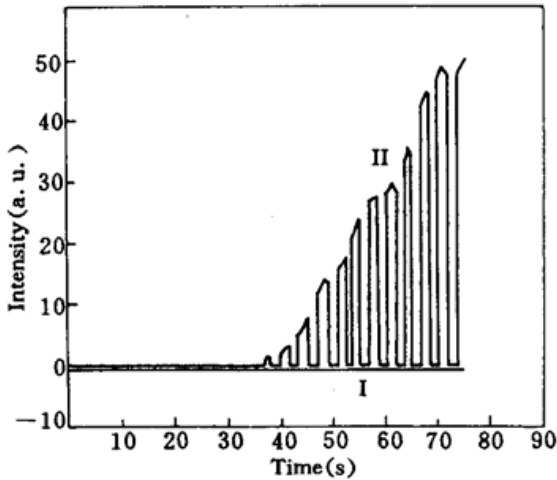


Fig. 2 The comparison of dynamic curves shows the intensity of the self-pumped phase conjugate beams versus time between intermittent mode and continuous mode with Ce: KNSBN crystal. Curves I and II correspond to continuous mode and intermittent one

当入射氩离子激光光束(波长为 514.5 nm, 功率为 12.2 mW, 直径为 2.0 mm)以入射角 $\theta = 42.5^\circ$ 进入样品 1 时, 可以观察到一种新奇的现象示于图 2。当选用连续光入射方式时, 在 1000 s 之内没有位相共轭光波产生, 如图 2 中曲线 I 所示, 图中只画出前面一小段。然而, 当入射光改为间歇入射方式时(光束功率、直径及入射角等不变), 在 24 s 之内便可观察到位相共轭输出, 如图 2 中曲线 II 所示。应当指出, 在观察到位相共轭输出时, 实际的曝光时间短于 12 s, 因为大约一半的时间入射光被挡住了。从此结果可以看出, 间歇光能更有效地激发样品 1 的自泵浦位相共轭输出。图中所示的最佳共轭反射率 $R_c = 54\%$ 。

从实验结果中可以看出如下显著的特点: (1) 间歇光可显著缩短样品 1 构成的自泵浦位相共轭器的响应时间(采用间歇光的响应时间仅为同样条件的连续光的响应时间的四十分之一);

在某些条件下, 采用连续光根本得不到自泵浦位相共轭光束, 但间歇光仍然可以方便地给出自泵浦位相共轭光; (2) 样品 1 的自泵浦位相共轭反射率可在无光照的时间间隔内自身增高。从图中可以看出, 对应时间 $t = 66$ s 开始的一些遮光, 共轭反射率自增加近 10%。这说明在无光照的时间间隔内决定自泵浦位相共轭器反射率的主光栅发生了明显的变化。

2 理论分析

在光折变晶体中, 空间电荷场决定晶体内部光栅形成与电荷迁移所致的光电流。为解释自泵浦位相共轭器的自抑制效应, 应简要回顾光折变晶体内的电荷输运机理。众所周知, 光折变晶体内部电荷输运由扩散、漂移及光伏作用决定^[9]。在 KNSBN 晶体中掺入微量杂质元素(Fe, Ce, Co, Mn)会增强其光伏效应, 所以, 在电流方程中不能忽略光伏效应的贡献。为讨论方便, 作一点适于我们实验条件的简化处理。由 Carrascoca^[10] 模型, 光伏电场在一定精度内可等效为外加电场。在单色光照射下, 沿极轴方向的电流密度为

$$j = e\mu n[E_o + E_p + E_{sc}] - \mu k_B T \frac{dn}{dz} \quad (1)$$

其中 μ 为载流子输运率, n 为自由载流子密度, k_B 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, E_{sc} 为 z 方向的空间电荷场场强, E_o 为外加电场场强, E_p 为光伏电场场强。

$$E_p = \frac{\alpha n I}{(\sigma_d + \sigma_{ph})} = \frac{j_{ph}}{(\sigma_d + \sigma_{ph})} \quad (2)$$

其中 j_{ph} 是光伏电流, σ_d 与 σ_{ph} 分别为暗电导与光电导, α 为对应波长下的吸收系数, I 为光强, κ 为 Glass 引进的光伏常数^[11]。对于热释电晶体, 在入射光开启或关闭的瞬间, 热释电电流不可忽

略。此贡献也可等效为沿极轴方向的外电场所致。

当一个正弦干涉花样 $I = I_0 + I_1 \sin Kz$ ($I_0 \gg I_1$) 入射一光折变晶体 (K 为波矢) 时, 稳态电荷场可以近似表示为^[9]

$$E_{sc} = F \frac{E_q [E_d - i(E_0 + E_{pr})]}{E_0 + E_{pr} + i(E_d + E_q)} \frac{I_1}{I_0} \quad (3)$$

当晶体选定后, F 为常数, $E_d = k_b T K / e$, $E_q = N_A e / \epsilon_0 \epsilon K$, N_A 为陷阱密度, ϵ_0 为自由空间介电常数, ϵ 为相对介电常数。

电荷漂移的非对称性可以导致光栅与干涉花样存在一定的相位差

$$\tan \phi = \frac{E_q (E_0 + E_{pr})}{E_d E_q + E_d^2 + (E_0 + E_{pr})^2} \quad (4)$$

应当指出, 虽然上面的公式适用于稳态, 我们仍然可以借用其得到一些关于瞬态效应的定性描述。为获得关于自泵浦位相共轭器的自增强现象的解释, 首先需得到一些关于光折变晶体内光伏与热释电电场的认识。

对 Ce : KNSBN 晶体, 在不同强度的均匀光照射下, 电流密度随外加直流电场 E_0 的变化曲线如图 3(a), 利用方程(2) 可以算出晶体内的光伏电场约为 $10^3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级。 σ_d 小于 $10^{-13} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, σ_{ph} 为 $3.2 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。此电场的存在使电荷向一个方向移动, 从而使光束间能量耦合偏离最佳状态 (对应于 $\phi = \pi/2$)。

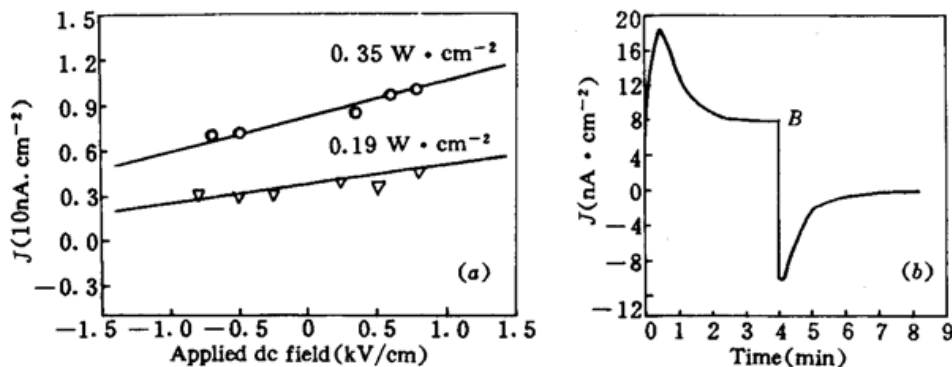


Fig. 3

(a) Relationship between current density and applied field under different incident light intensities with Ce : KNSBN; (b) schematic diagram of the dynamic feature of the photo-induced current under the situation in which no applied field is exerted on the KNSBN

对 KNSBN 晶体, 其在无外加电场存在时动态光感生电流示于图 3(b)。当入射光束开启后, 光感生电流迅速增加, 此过程对应热释电效应。经一峰值电流后逐渐趋于一稳定值, 稳态电流对应光伏效应。此过程中的热释电电场与光伏电场均沿晶体的负极轴方向。在 B 点, 入射光被突然关闭, 这时可以看到一明显的反向冲击电流, 这也是热释电效应的结果。此过程的电流方向与前述过程刚好相反。

上述动态过程可用于解释自泵浦位相共轭器的自增强现象。对于连续光照射方式, 源于光伏与热释电效应的宏观电场使载流子沿极轴漂移, 此电荷迁移使晶体内光致电荷栅与干涉条纹之间的位相差偏离 $\phi = \pi/2$, 使泵浦光束到信号光束的能量耦合强度降低。这不利于自泵浦位相共轭光束的产生。然而, 对间歇光照射, 入射激光束的突然关闭对应的热释电电场会趋动电荷反向移动, 即电荷载流子反向漂移。亦即电荷栅产生一整体移动。此移动使电荷栅与干涉条纹之间的位相差 ϕ 趋向于最佳值 $\pi/2$ 。故在无光照的时间间隔内自泵浦位相共轭反射率会被

提高。这种提高的幅度取决于光伏电场与热释电电场的相对强弱。对于光伏电场较强的样品 1, 位相差偏离最佳值较多, 遮挡入射光后热释电电场的补偿作用较明显, 在无光照的时间间隔内自泵浦位相共轭反射率自身提高的幅度较大。为了进一步证明自泵浦位相共轭器的自增强现象确实起因于晶体内部光伏电场与热释电电场的影响, 我们完成了如下的实验。

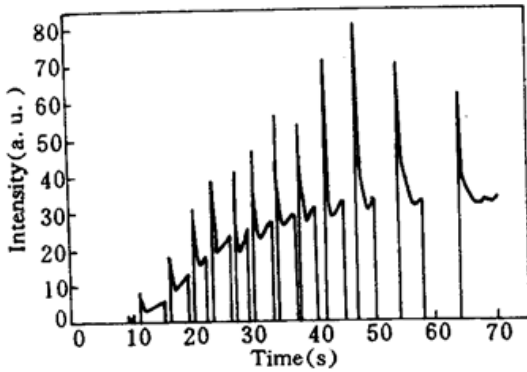


Fig. 4 The bump feature of the reflective portion of the self-pumped phase conjugate beam on the entrance crystal/air interface corresponding to an intermittent incident beam

在如图 1 所示的实验装置中, 若在 D_2 处放一接收屏, 当入射光照射晶体后, 过一会便有自泵浦位相共轭光产生, 随着自泵浦位相共轭反射率的增加, 在屏上可以观察到四到五个强度渐弱的多级反射光斑。这些多级反射光是由于入射光和其自泵浦位相共轭光在晶体内部前后两个表面多次反射并由后表面透射的结果, 其中弱光斑对应的是高级反射光。现用 D_2 接收 Ce : KNSBN 猫式自泵浦位相共轭器中多级反射波中最强的反射波, 实验发现, 当入射光被遮挡一段时间以后再次开启时, 多级反射光的强度会出现超过初始值 2 到 3 倍瞬时高值的情况, 图 4 即为采用间歇光入射模式时, 由 D_2 接收到的多级反射光的强度随时间变化的曲线。多级反射波所呈现的这种

瞬时冲击现象不仅是直接透射光增加的结果, 因为透射光在此时间间隔内只有较小的增大, 而且在较长的遮挡时间间隔后与较短的遮挡时间间隔后, 冲击光振幅均较小。对应中等的的时间间隔, 刚好热释电电场推动电荷栅移动, 使电荷栅与干涉条纹之间的位相差 ϕ 趋向于最佳值 $\pi/2$, 使反射光得到较多的能量。

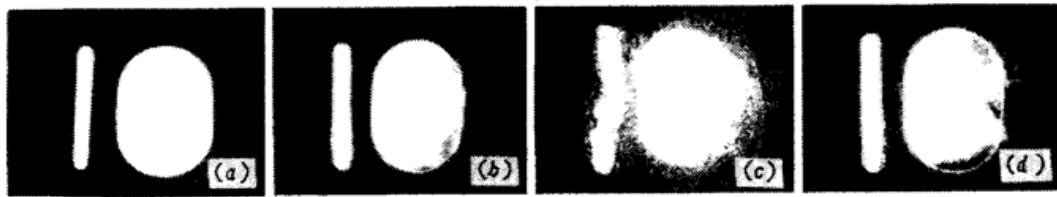


Fig. 5 The experimental results about the reduction of the conjugation fidelity of the cat self-pumped phase conjugator with Ce : KNSBN crystal

- (a) an input image; (b) the output replica of the input image when no phase aberrator is inserted in the incidence path;
 (c) a distorting input image owing to the introduction of a phase aberrator;
 (d) the output replica of the input image when the phase aberrator is inserted

此外, 利用样品 2 的自泵浦位相共轭实验也发现: (1) 间歇光可缩短自泵浦位相共轭器的响应时间; (2) 样品的自泵浦位相共轭反射率可在无光照的时间间隔内自增高。

由于自泵浦位相共轭器中光伏与热释电电场的存在, 致使光束之间存在非零的相位耦合^[9], 这便是我们在第二节中提及的多级反射波存在导致位相共轭保真度下降的原因。正如前面所述, 在晶体第二透射面的二次反射波与晶体内部直接透射波和总的位相共轭波发生四波混合, 产生的二次反射波的位相共轭波可以与直接位相共轭波混合, 二次反射波的位相共轭波与其他光波之间发生位相耦合会引起附加位相, 从而造成总位相共轭波的位相共轭保真度的下

降。位相共轭保真度的下降的实验结果示于图 5, (a) 为输入图像, (b) 为没有位相畸变介质插入时的位相共轭输出像, (c) 为引入位相畸变介质后的输入晶体的畸变像, (d) 为引入位相畸变介质后的位相共轭输出像。从图中看出, 位相畸变没有被完全消除, 这说明输出位相共轭光束中含有非位相共轭成分。

参 考 文 献

- 1 P. Gunter, J. P. Huignard. *Photorefractive Materials and Their Applications I and II*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989
- 2 J. Ferinberg. Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, 7 : 486
- 3 S. Weiss, S. Sternklar *et al.*. Double phase-conjugate mirror; analysis, demonstration and applications. *Opt. Lett.*, 1987, 12 : 114
- 4 M. D. Ewbank, R. A. Vazquez *et al.*. Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate; theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7 : 2306
- 5 K. R. Mcdonald, J. Feinberg. Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, 73 : 548
- 6 D. M. Pepper. Observation of Diminished Specular Reflectivity from Phase-Conjugate Mirrors. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62 : 2945
- 7 L. Zhang, J. Zhang *et al.*. Conjugation fidelity and bistability in a high-efficiency mutually pumped phase conjugator with ring cannels. *Opt. Lett.*, 1995, 20(13) :
- 8 J. Zhang, L. Zhang *et al.*. Observation of multireflections from cat self-pumped phase conjugators with Cu-doped $(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.2}(Sr_{0.75}Ba_{0.25})_{0.9}Nb_2O_6$ Crystals and conjugation fidelity analysis. *Opt. Lett.*, 1995, 20 : 979
- 9 P. Gunter. Holography, coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials. *Phys. Rep.*, 1982, 93 : 199
- 10 M. Carrascoca, J. M. Cabrera *et al.*. Steady Holographic Gratings Formed in Photorefractive Materials; Influence of Material Parameters. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1991, QE-27 : 509
- 11 A. M. Glass, D. von der Linde *et al.*. High-voltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive process in $LiNbO_3$. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 25 : 233

Self-enhancement and the Photo-induced Macroscopic Field in Self-pumped Phase Conjugators

Zhao Hua Zhou Zhongxiang Li Yan Sun Xiudong Xu Kebin

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

Zhang Jingwen Wang Jiyang Chen Huanchu

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

Abstract A novel phenomenon of self-enhancement of reflectivity of a self-pumped phase conjugator during the time interval in which no light illuminates the conjugator is observed. The response time of self-pumped phase conjugators of Ce-doped or Mn-doped potassium sodium strontium barium niobate (KNSBN) single-domain crystal is shortened obviously by using an intermittent light. The qualitative explanation about experimental results is given using a fundamental charge carrier migration model via the measurement of photovoltaic and pyroelectric fields. Some further experiments have been done to support our analysis. The reduction of conjugation fidelity of the self-pumped phase conjugators is also explained in terms of a photo-induced internal field.

Key words self-enhancement, response time, self-pumped phase conjugator