

泵浦光强变化诱导自泵浦 BaTiO₃ 相位共轭非稳态振荡的研究

刘继芳 员智省 李育林

(中国科学院西安光机所 西安 710068)

张 孟

(西安空军电讯工程学院 西安 710077)

提要 研究了泵浦光强及其入射角、入射位置满足相位共轭光稳态输出条件下,泵浦光强突变对相位共轭反射率稳定性的影响。实验结果表明在某些泵浦光强条件下,当相位共轭光强达饱和值后,泵浦光强的突变会导致相位共轭反射率的非稳态振荡。

关键词 自泵浦,相位共轭反射率,非稳态振荡

1 引 言

由于自泵浦相位共轭在光学信号处理、波前校正、光通讯以及光学神经网络方面的巨大应用前景,近十几年来国内外对其作了大量的研究。自从 P. Gunter 等报道了自泵浦 BaTiO₃ 相位共轭反射率的非稳态振荡现象^[1]以来,对自泵浦 BaTiO₃ 相位共轭反射率非稳态振荡进行了大量深入的研究,认为自泵浦 BaTiO₃ 相位共轭光的稳定与否与泵浦光的入射位置、泵浦光与晶体光轴的夹角以及泵浦光强等参数有关^[2~8]。

本文报道自泵浦 BaTiO₃ 在泵浦光的入射位置、泵浦光与晶体光轴的夹角以及泵浦光强三者均满足相位共轭光稳定输出的实验条件下,由于泵浦光强的改变导致自泵浦 BaTiO₃ 相位共轭光非稳态振荡的实验结果。

2 实验装置

实验用 BaTiO₃ 晶体为中国科学院物理所生长,尺寸为 5.5×5.5×5.5 (mm)。实验装置如图 1 所示。晶体放置在一载物台上,光轴置于水平面内,以便调节泵浦光束与晶体光轴的夹角。工作波长为 514.5 nm 的 Ar⁺ 激光器输出的连续的竖直方向偏振光,经一 λ/2 波片改变为水平方向的偏振光,再经一分束器分为两束,一束作为泵浦光经一透镜汇聚后入射到 BaTiO₃ 晶体,另一束用

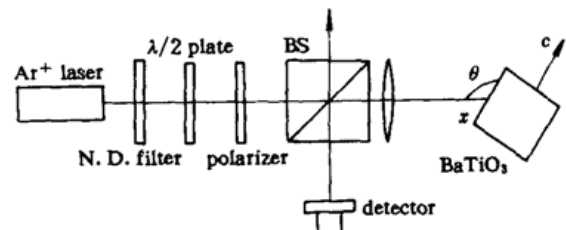


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

来监视激光器输出光强的稳定性。相位共轭光经分束器反射,由光电探测器接收,送到 $x-t$ 记录仪记录相位共轭光强随时间的变化。

3 实验结果

实验过程所选用的与相位共轭光输出稳定与否有关的实验参数如下:入射位置 $x = 2.15$ mm;泵浦光与 c 轴的夹角 $\theta = 146.5^\circ$;泵浦光束直径 $D = 0.70$ mm。

3.1 在上述实验条件下,测量了不同泵浦光强时的相位共轭反射率时间演化,泵浦光强由 0.018 W/cm^2 改变到 5.09 W/cm^2 (由 $50 \mu\text{W}$ 改变到 14 mW),每改变一次泵浦光强,都用垂直晶体表面入射(与 c 轴夹角 90°)的平行光长时间照射晶体,以擦除前一次实验中晶体写入的光栅。图 2 (a) 为不同泵浦光强时的相位共轭反射率随时间的演化曲线,图 2 (b) 为相位共轭反射率随泵浦光强的变化曲线,这表明在上述实验参数条件下,在我们实验中所选用的泵浦光强范围内都能得到稳定的相位共轭光输出。

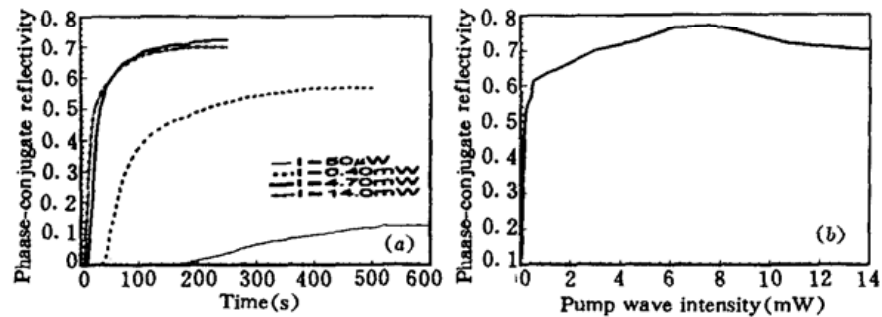


图 2 (a) 相位共轭反射率随时间的变化曲线;(b) 相位共轭反射率与泵浦光强的关系

Fig. 2 (a) Temporal dependence of the phase-conjugate reflectivity;

(b) Phase-conjugate reflectivity as a function of pump light intensity

3.2 在某一泵浦光强条件下,当相位共轭光强达饱和值时,突然增加泵浦光强。实验中泵浦光强值在 $0.018 \sim 5.09 \text{ W/cm}^2$ ($50 \mu\text{W} \sim 14 \text{ mW}$) 之间,处于 3.1 节的稳定相位共轭反射率范围内;每次实验泵浦光强的增加量为原泵浦光强的 $10 \sim 100\%$ 不等,不同泵浦光强和不同泵浦光强增加量的实验结果如图 3 所示。当泵浦光强在 $0.05 \sim 0.4 \text{ mW}$ 范围内,相位共轭反射率基本不出现非稳态振荡,从一稳定值逐渐改变为另一稳定值;当泵浦光强在 $0.4 \sim 3.0 \text{ mW}$ 范围内,泵浦光强的突然增加会引起相位共轭反射率的短时振荡,之后趋于另一稳定值;泵浦光强在 $3.0 \sim 7.6 \text{ mW}$ 范围内,相位共轭反射率又不出现非稳态振荡;而泵浦光强进一步增加,相位共轭反射率又开始出现短时非稳态振荡。

3.3 在某一泵浦光强条件下,当相位共轭光强达饱和值时,突然减小泵浦光强。泵浦光强仍在 3.1 节的相位共轭稳态输出的范围内,每次实验泵浦光强的减小量与 3.2 节中的增加量的范围相同。实验结果如图 4 所示。当泵浦光强较强时,在 $14.0 \sim 8.2 \text{ mW}$ 范围内,泵浦光强的突然减小导致非稳态的相位共轭输出,相位共轭光强长时间的非稳态振荡;当泵浦光强在 $6.2 \sim 4.2 \text{ mW}$ 范围内,相位共轭反射率经短时非稳态振荡后趋于另一稳定值;而当泵浦光强在 4.2 mW 以下时,相位共轭反射率很快由一稳定值变为另一稳定值。

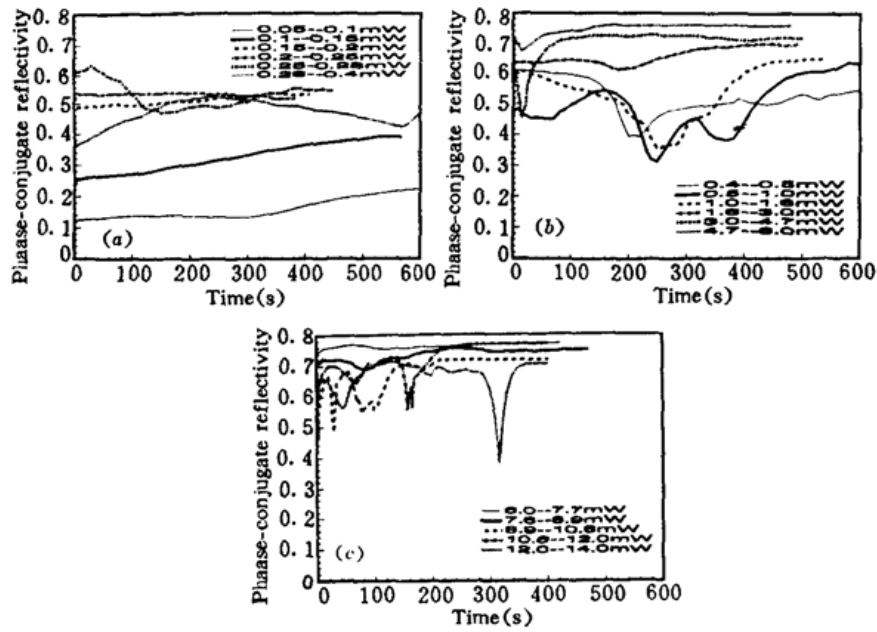


图 3 泵浦光强增加时相位共轭反射率随时间的演化, 泵浦光强在 $t = 0$ 时刻增加(曲线的说明中的数字: 前面的数字为突变前的泵浦光强, 后面的数字为突变后的泵浦光强)

Fig. 3 Temporal evolution of phase-conjugate reflectivity with pump intensity increased

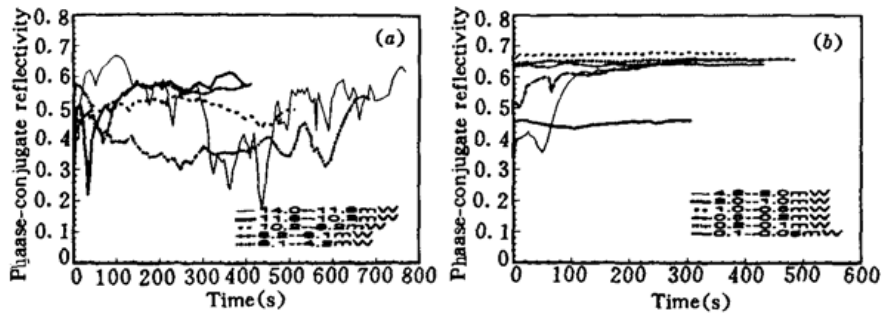


图 4 泵浦光强减小时相位共轭反射率随时间的演化, 泵浦光强在 $t = 0$ 时刻减小(曲线的说明中的数字: 前面的数字为突变前的泵浦光强, 后面的数字为突变后的泵浦光强)

Fig. 4 Temporal evolution of phase-conjugate reflectivity with pump intensity reduced

4 结论与讨论

在实验参数满足稳态输出的条件下, 泵浦光强一定时, 当输出的相位共轭光强达饱和值后, 一般其相位共轭光强不再随时间变化。由图 3 所示的泵浦光强增加和图 4 所示的泵浦光强减小的实验结果可以看出, 泵浦光强的突变都会引起相位共轭光强不同程度不同持续时间的振荡, 并逐渐趋于一新的饱和值。显然泵浦光强的稳定与否对相位共轭光的稳定性至关重要。由图 2 (b) 的实验结果可知, 相位共轭反射率与泵浦光强有关, 泵浦光强的改变必然引起相位共轭反射率的变化。但是实验中泵浦光强的变化近似为一阶跃函数, 如果相位共轭反射率的跟随性很好的话, 在泵浦光强变化时, 相位共轭反射率应从一稳定值变为另一稳定值, 不应出现振荡。所以相位共轭反射率的振荡不能简单地由泵浦光强与相位共轭反射率之间的关系来解释。

在某些泵浦光强条件下, 泵浦光强的突变, 即使变化前后的泵浦光强以及入射角、入射位

置等参数都在相位共轭光的稳态输出范围内,也可引起相位共轭光强的长时间非稳态振荡,相位共轭反射率不再是稳定的了。如图 4 的实验结果所示。这表明相位共轭反射率的稳定与否,不仅仅由泵浦光强和泵浦光的入射角、入射位置三者决定,而且当相位共轭光强达饱和值后,泵浦光强突然改变为另一值亦可改变相位共轭反射率的稳定性。

一般认为自泵浦相位共轭是双作用区四波混频。解释导致非稳定相位共轭输出的理论模型有两种,一种是四波混频中四个光束两两之间相干而形成的折射率光栅全部起作用,光波复振幅的耦合方程为^[2]

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_1 = Q_1 A_1 - Q_2 A_3 - Q_3 A_2 \quad (1a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_2 = Q_1^* A_3 - Q_2^* A_1 - Q_3^* A_1 \quad (1b)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_3 = -Q_1 A_2 - Q_2^* A_1 - Q_4 A_1 \quad (1c)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_4 = -Q_1^* A_1 - Q_2 A_2 - Q_4^* A_3 \quad (1d)$$

式中 Q_j 表示上述四个光束两两之间形成的光栅的复振幅,且

$$\tau_1 Q_1 + Q_1 = (\gamma_1/I_0)(A_1 A_1^* + A_2^* A_3)$$

$$\tau_2 Q_2 + Q_2 = (\gamma_2/I_0)(A_1 A_3^* + A_2^* A_4)$$

$$\tau_3 Q_3 + Q_3 = (\gamma_3/I_0) A_1 A_2^*$$

$$\tau_4 Q_4 + Q_4 = (\gamma_4/I_0) A_3 A_1^*$$

γ_j 为耦合系数, τ_j 为非线性响应时间, $I_0 = \sum_j |A_j|^2$ 。当泵浦光强较大时,耦合系数的值与光强有关, $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 甚至可以改变符号。另一种是上述四个光栅只有一个起主要作用,其它光栅的作用可以忽略,光波复振幅的耦合方程和光栅的时间演化方程为^[5]

$$\partial A_1 / \partial z = Q A_1 - \alpha A_1 \quad (2a)$$

$$\partial A_2^* / \partial z = -Q A_3^* + \alpha A_2^* \quad (2b)$$

$$\partial A_3 / \partial z = Q A_2 + \alpha A_3 \quad (2c)$$

$$\partial A_4^* / \partial z = -Q A_1^* - \alpha A_4^* \quad (2d)$$

$$\tau \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{E_D + E_q + E_0}{E_M + E_D + E_0} Q = \frac{\gamma_0}{I_0} \frac{E_q + E_D}{E_K} \frac{E_D + iE_0}{E_M + E_D + iE_0} \times (A_1 A_1^* + A_2^* A_3) \quad (2e)$$

式中 Q 为折射率光栅复振幅, γ_0 为耦合系数, $I_0 = \sum_j |A_j|^2$, E_0 为外电场, $E_D = k_B T K / q$, $E_q = q N_D / \epsilon K$, $E_M = (\mu K \tau_R)^{-1}$ 。其中 k_B 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, K 为光栅波矢, q 为电子电量, N_D 为施主数密度, τ_R 为自由电子寿命。这两种模型都是 Mac Donald-Feinberg 模型包括光学非线性时间演化后的扩展。以上两组方程都没有解析解,其数值解表明在某些边界条件下可导致非稳定输出。大调制度光栅写入和擦除的时间演化的研究表明,除光栅的基频傅里叶分量起作用外,其 2, 3 等高阶傅里叶分量也起作用,且光栅的各阶傅里叶分量的写入和擦除时间常数不同^[9]。当某一光栅一直占主导地位,也就是其它光栅可以忽略时,相位共轭光为稳定输出;当几个光栅交替占主导地位时,相位共轭光为非稳定输出。在小泵浦光强条件下,透射光栅 Q_1 (单光栅模型的光栅基频分量)起主导作用,一般情况光折变晶体四波混频只考虑该光栅的作用。随着泵浦光强的增加,其它光栅(单光栅模型的光栅的 2, 3 等高阶分量)的作用逐渐明显,不可忽略。各光栅有不同的时间常数,一个光栅的写入又部分地擦除其它光栅,所以自泵浦相位共

轭光的非稳态振荡可解释为各光栅之间的竞争, 由于各光栅交替占主导作用而引起的。在某泵浦光强条件下, 当相位共轭光达稳态输出后, 突然改变泵浦光强, 这会改变各光栅的耦合系数 ν_j , 从而引起光栅之间的竞争。

可见, 光栅之间的竞争总是存在的, 只不过是在稳态情形, 某一光栅总处于主导地位, 其它光栅的作用可以忽略。实际上在稳态情形, 也可观察到相位共轭光强的微小变化。除了泵浦光强和泵浦光入射角、入射位置等实验参数在一定条件下能引起光栅之间的明显竞争, 导致相位共轭光的非稳态振荡之外, 在以上参数均满足相位共轭光稳态输出的情况下, 泵浦光强的突变也能引起光栅之间的明显竞争, 导致相位共轭光的非稳态振荡。

参 考 文 献

- 1 P. Gunter, E. Voit, M. Z. Zha. Self-pulsation and optical chaos in self-pumped photorefractive BaTiO₃. *Opt. Commun.*, 1985, 55(3): 210~214
- 2 Daniel J. Gauthier, Paul Narum, Robert W. Boyd. Observation of deterministic chaos in a phase-conjugate mirror. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(16): 1640~1643
- 3 Arub K. Majumdar, Jeffrey L. Kobesky. Oscillations and possible transition to optical chaos in phase-conjugate waves in self-pumped BaTiO₃ at 514.5 nm. *Opt. Commun.*, 1990, 75(3): 339~346
- 4 Siuying R. Liu, Guy Indebetouw. Periodic and chaotic spatiotemporal states in a phase-conjugate resonator using a photorefractive BaTiO₃ phase-conjugate mirror. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9(8): 1507~1520
- 5 Wieslaw Kr Likowski, Milivoj R. Belic, Mark Cronin-Golomb *et al.*. Chaos in photorefractive four-wave mixing with a single grating and a single interaction region. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7(7): 1024~1029
- 6 C. H. Kwak, J. Takacs, L. Solymar. Spatial subharmonic instabilities. *Opt. Commun.*, 1993, 96(4): 278~282
- 7 A. A. Zozulya, G. Montemezzani, D. Z. Anderson. Analysis of total-internal-reflection phase-conjugate mirror. *Phys. Rev.*, 1995, A52(5): 4167~4175
- 8 Torsten Rauch, Cornelia Denz, Theo Tschudi. Analysis of irregular fluctuations in a self-pumped BaTiO₃ phase-conjugate mirror. *Opt. Commun.*, 1992, 88(6): 160~166
- 9 E. Serrano, Vicente López, M. Carrascosa *et al.*. Recording and erasure kinetics in photorefractive materials at large modulation depths. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, 11(4): 670~675

Study of the Change of Pump Wave Intensity Induced Instability in Self-pumped BaTiO₃

Liu Jifang Yun Zhisheng Li Yulin

(Xi'an Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Zhang Meng

(Air Force Telecommunication Engineering Institute, Xi'an 710077)

Abstract Under the conditions that the incidence angle, incidence position and the intensity of the pump wave ensure a stable phase-conjugate wave output, the effect of the pump wave intensity change on the stability of the phase-conjugate wave is investigated. The experimental result shows that for some pump wave intensity, when the phase-conjugate intensity reaches its saturation value, the change of pump wave intensity may induce an instable phase-conjugate output.

Key words self-pump, phase-conjugate reflectivity, fluctuation