

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0033-04

固体激光中位相差的广义同步*

朱士群 何英 陈险峰

(苏州大学理学院物理系, 苏州 215006)

提要 对三台在空间上耦合的固体激光器组成的一维激光阵列进行了研究。结果表明,激光强度会随着激光之间耦合的变化而呈现周期性同步、混沌同步和失去混沌同步的现象。同时,激光也从部分相干光变为相干光、部分相干光,直至成为非相干光。三台激光器之间的位相差出现了广义同步和失去广义同步的现象。

关键词 固体激光, 激光阵列, 位相差, 广义同步

中图分类号 O437, O415.5 **文献标识码:** A

Generalized Synchronization of Phase Differences in Solid State Lasers

ZHU Shi-qun He Ying CHEN Xian-feng

(Department of Physics, College of Sciences, Suzhou University, Suzhou 215006)

Abstract A one-dimensional array of three spatially coupled solid state lasers is investigated. It is shown that the periodic synchronization, chaotic synchronization and loss of synchronization in laser intensities occur when the coupling between lasers is changed. Meanwhile, the laser light is changed from partially coherent, perfect coherent, to partially coherent again and finally incoherent. The phase differences between lasers show generalized synchronization and loss of synchronization as the coupling is changed.

Key words solid state lasers, array of lasers, phase difference, generalized synchronization

1 引言

由于混沌的控制和同步在电子学、激光物理学、通讯、流行病学等领域中的广阔应用前景,有关混沌的控制和同步迅速成为近年来国际学术界研究的热点课题之一^[1~10]。同时,在耦合的非线性系统中,广义同步^[11,12]和位相同步^[13~15]也受到人们极大的关注。

在大多数研究耦合的激光系统中的混沌行为时,人们主要关注的是激光强度的混沌同步^[3~8]。但在实际应用中,耦合激光器位相差之间的关系决定激光系统相干性的好坏,所以也是需要认真对待

的问题。

本文对在空间上存在耦合的三台固体激光器的一维阵列进行研究。通过对激光场的运动方程进行数值模拟,分析了三台固体激光器的抽运受到调制时,激光场的相干度、激光强度和激光场位相差随激光耦合参量变化的情况。

2 激光场和相干性

当固体激光之间存在耦合,而且激光的抽运受到调制时,第 j 台激光的复电场 E_j 和增益 G_j 随时间 t 的变化由下面的方程组描述

$$\begin{aligned} \frac{dE_j}{dt} &= \frac{1}{\tau_c} [(G_j - \alpha_j)E_j - \kappa_{j,j+1} - \kappa_{j,j-1}E_{j-1}] + i\omega_j E_j, \\ \frac{dG_j}{dt} &= \frac{1}{\tau_f} \{p_j [1 + M\sin(\Omega t)] - G_j(1 + |E_j|^2)\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, τ_c 是光场在腔中传输一个来回所需的时间, τ_f 是离子的荧光寿命, p_j, α_j 和 ω_j 分别是抽运参量、

损失因子和失谐因子, M 是抽运光的调制深度, $\Omega = 2\pi f$ 是调制角频率。

三台排列在一条直线上的激光器最近邻之间存在空间上的耦合, 耦合强度为 κ_{jm} 。如果激光束是高斯光束, 束腰 ω_0 定义为 $I/I_0 = 1/e^2$ 时的值, 那么耦合强度 k_{jm} 可以表示为

$$\kappa_{jm} = \exp\left[-\frac{(\Delta d_{jm})^2}{2\omega_0^2}\right] \quad (2)$$

这里, $\Delta d_{jm} = d_j - d_m$ 是最近邻两台激光器之间的距离。显然, 对三台激光器组成的一维阵列, 最外面的两台激光器之间没有耦合, 即: $j = 1$ 时, $\kappa_{j,j+1} = 0$; $j = 3$ 时, $\kappa_{j,j+1} = 0$ 。

为了描述激光位相差的动力学行为, 耦合激光系统的一阶相干度可定义为

$$V = \frac{\sum_{\substack{j,m=1 \\ j \neq m}}^N |E_j E_m^*|}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (3)$$

式中, $N = 3$ 。在激光系统中, $V = 1.0$ 对应于相干光, $V = 0.0$ 对应于非相干光。 $0.0 < V < 1.0$ 则对应于部分相干光。

第 j 台激光器的强度和位相可表示为

$$I_j = E_{xj}^2 + E_{yj}^2, \quad \theta_j = \arctan(E_{yj}/E_{xj}) \quad (4)$$

$(j = 1, 2, 3)$

根据(1)式和(2)式可以进行数值计算。为了看出激光器之间的差异对数值模拟的影响, 每台激光的损失因子 α_j 在模拟中的取值是不同的。损失之间的相对偏差 $\delta = (\alpha_{j+1} - \alpha_j)/\alpha_j = 2.0\%$ ($j = 1, 2$) 是固定的。在数值计算中, 其它参量选为常数, 如: $p_1 = p_2 = p_3$, τ_c , τ_f , M , f 和 ω_0 等都是常数。激光之间距离相等, 即: $\Delta d = \Delta d_{jm}$, 和 $\kappa = \kappa_{jm}$ 。激光的失谐为 $\Delta\omega = \omega_{j+1} - \omega_j = 5.0 \times 10^5 (1/s)$ ($j = 1, 2$)。

由(1)式~(3)式算出的激光系统的一阶相干度

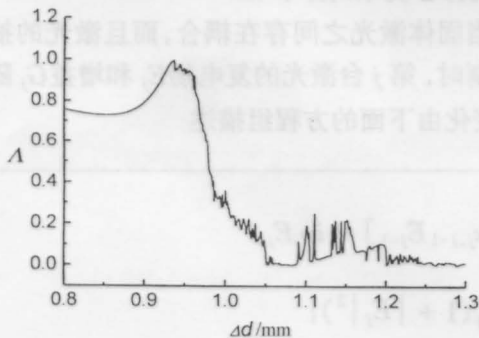


图1 三台耦合固体激光器的一阶相干度

Fig.1 The first order coherence in three coupled solid state lasers

如图1所示。从图1可见, 当激光之间的耦合从很强逐渐减弱时, Δd 增大, 激光从相干度很高 ($V > 0.72$) 的部分相干光变成相干光 ($V = 1.0$), 再变为部分相干光。相干长度在 $\Delta d = 0.97$ mm 附近急剧减小, 直至变成非相干光。

3 强度和位相差的广义同步

对方程(1)和(2)进行数值计算后, 根据(4)式可以得到每台激光的强度 I_j 和位相 θ_j , 激光器之间的位相差 $\theta_j - \theta_m$ 也能方便地算出。

激光强度和位相差之间的关系如图2所示。从图2(A)可见, 当激光器之间的距离 $\Delta d = 0.937$ mm 时, 耦合较强, 耦合常数 $\kappa = 1.15 \times 10^{-4}$, 激光强度呈现周期性同步, 激光位相差锁定, 在位相差关系的平面上位于等腰直角三角形的三个顶点, 相干度 $V = 1.0$, 输出相干光。从图2(B)可见, 当激光器之间的距离 $\Delta d = 0.940$ mm 时, 耦合中等, $\kappa = 1.09 \times 10^{-4}$, 激光强度呈现混沌状态, 激光位相差出现拉长的六角形图案, 呈现广义同步现象, 这时, 相干度 $V = 0.95$, 输出相干度很高的部分相干光。从图2(C)可见, 当激光器之间的距离 $\Delta d = 0.960$ mm 时, 耦合减弱, $\kappa = 7.33 \times 10^{-5}$, 激光强度呈现混沌同步状态, 激光位相差出现带柄的近似长方形的六角形图案, 仍然呈现广义同步现象, 这时, 相干度 $V = 0.926$, 输出仍是相干度很高的部分相干光。从图2(D)可见, 当激光器之间的距离 $\Delta d = 1.204$ mm 时, 耦合很弱, $\kappa = 3.14 \times 10^{-7}$, 激光强度再次出现混沌同步状态, 但激光位相差则处于杂乱无章的状态, 这时, 相干度 $V = 0.0337$, 输出非相干光。

4 讨论

对三台在空间上存在耦合的固体激光的理论分析表明, 当激光器之间耦合很强时, 激光强度呈现周期性同步, 激光场的位相差相对固定, 相干度较高, 在某个特定的耦合常数时, 输出完全相干光。当耦合中等时, 激光强度处于混沌和混沌同步状态, 激光场的位相差呈现有规律的几何图案, 出现广义同步现象。输出相干度较高的部分相干光。当耦合减弱时, 激光强度处于混沌状态, 激光场的位相差失去广义同步, 输出相干度较低的部分相干光。当耦合很弱时, 激光强度可能再次出现混沌同步现象, 但位相差完全失去广义同步, 输出非相干光。所以, 在利用固体激光的混沌同步时, 必须对激光场的位相作认

真的分析。

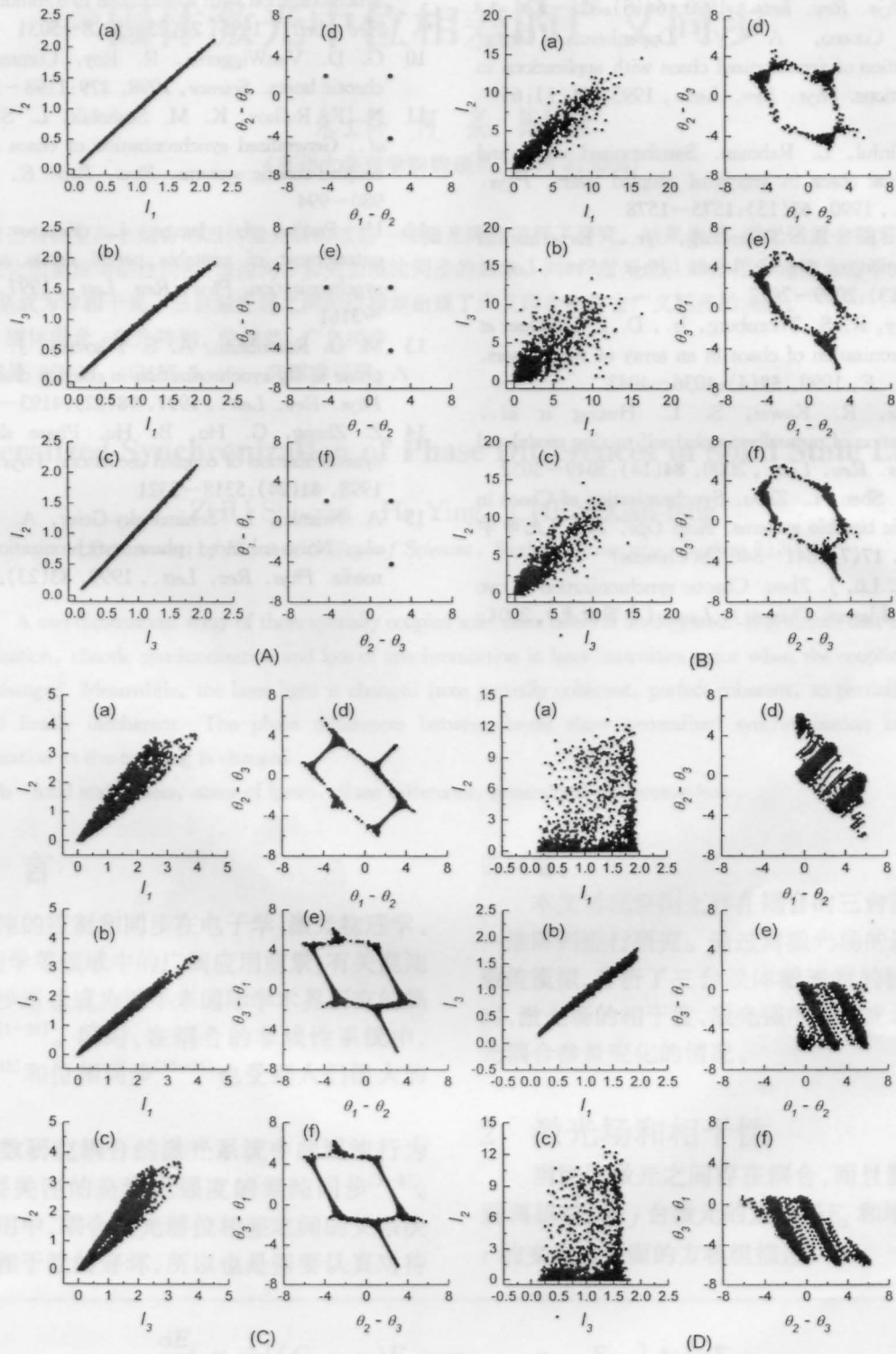


图2 三台耦合固体激光的强度和位相差之间的关系。(A) $\Delta d = 0.937$ mm; (B) $\Delta d = 0.940$ mm;
(C) $\Delta d = 0.960$ mm; (D) $\Delta d = 1.204$ mm

Fig. 2 The relations of intensities and phase differences in three coupled solid state lasers. (A) $\Delta d = 0.937$ mm;
(B) $\Delta d = 0.940$ mm; (C) $\Delta d = 0.960$ mm; (D) $\Delta d = 1.204$ mm

参考文献

- 1 L. M. Pecora, T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(8):821~824
- 2 K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(1):65~68
- 3 H. G. Winful, L. Rahman. Synchronized chaos and spatiotemporal chaos in arrays of coupled lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(13):1575~1578
- 4 R. Roy, K. S. Thornburg, Jr.. Experimental synchronization of chaotic lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**(13):2009~2012
- 5 J. R. Terry, K. S. Thornburg, Jr., D. J. DeShazer *et al.*. Synchronization of chaos in an array of three lasers. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**(4):4036~4043
- 6 K. Otsuka, R. Kawai, S. L. Hwang *et al.*. Synchronization of mutually coupled self-mixing modulated lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(14):3049~3052
- 7 J. Liu, K. Shen, L. Zhou. Synchronization of Chaos in acousto-optic bistable systems. *Acta Opt. Sin.* (光学学报), 1997, **17**(7):841~846 (in Chinese)
- 8 S. Zhu, X. Lü, J. Zhou. Chaotic synchronization in two non-identical lasers. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 2001, **A28**(4):343~346 (in Chinese)
- 9 L. Kocarev, U. Parlitz. General approach for chaotic synchronization with applications to communication. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(25):5028~5031
- 10 G. D. VanWiggeren, R. Roy. Communication with chaotic lasers. *Science*, 1998, **279**:1198~1200
- 11 N. F. Rulkov, K. M. Sushchik, L. S. Tsimiring *et al.*. Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 1995, **51**(2):980~994
- 12 U. Parlitz, L. Junge, L. Kocarev. Subharmonic entrainment of unstable period orbits and generalized synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(17):3158~3161
- 13 M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, J. Kurths. From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(22):4193~4196
- 14 Z. Zheng, G. Hu, B. Hu. Phase slips and phase synchronization of coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(24):5318~5321
- 15 A. Neiman, L. Schimansky-Geier, A. Cornell-Bell *et al.*. Noise-enhanced phase synchronization in excitable media. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(23):4896~4899