

文章编号: 0253-2239(2010)03-0861-05

简并光学参量振荡器的混沌反控制与混沌同步

冯秀琴¹ 姚治海¹ 田作林² 韩秀宇¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; ² 长春理工大学化学与环境工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 针对简并光学参量振荡器的非线性动力学特点,应用两个简并光学参量振荡器之间的互耦合法,研究了简并光学参量振荡器的混沌反控制与混沌同步。数值模拟了简并光学参量振荡器从周期输出到混沌输出的转换,理论计算了对于不同抽运强度的简并光学参量振荡器实现从周期输出到混沌输出的转化需要的最小互耦合系数。数值分析结果说明,具有不同的抽运强度和互耦合系数的简并光学参量振荡器形成的混沌吸引子不同,只要两个互耦合的简并光学参量振荡器实现混沌输出,这两个简并光学参量振荡器之间就能实现混沌精确同步,根据耦合方式的不同,两个简并光学参量振荡器之间存在两种同步方式,即同向同步和反相同步。

关键词 非线性光学; 混沌; 互耦合; 简并光学参量振荡器; 反控制

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0861

Anti-Control and Synchronization of Chaos in Degenerate Optical Parametric Oscillator

Feng Xiuqin¹ Yao Zhihai¹ Tian Zuolin² Han Xiuyu¹

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Chemistry and Environmental Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A chaotic anti-control and synchronization method of mutual coupling between two degenerate optical parametric oscillators is present, based on the nonlinear dynamic characteristics of degenerate optical parametric oscillator. Transforming degenerate optical parametric oscillators from periodic state into chaotic output is simulated numerically. The lowest mutual coupling coefficient of degenerate optical parametric oscillator with different pump field amplitude is calculated. Numerical simulations show that there are different chaotic attractors depending on the different coupling coefficients and pump field amplitudes. Precise chaotic synchronization can be reached only if they have chaotic output. They realize identical synchronization or inversed synchronization because of different coupling types.

Key words nonlinear optics; chaos; mutual coupling; degenerate optical parametric oscillator (DOPO); anti-control

1 引 言

随着混沌控制与同步理论研究的迅速发展,混沌动力学的应用研究不断深入,混沌的应用范围也在不断扩大。光学混沌的应用研究不断出现了新的成果,张培琨等^[1]利用混沌序列构造相位值,对光学图像频域相位进行了加密和解密;颜森林等^[2]研究了掺铒光纤激光器的反相位混沌同步及其编码在保密通信中的应用,同时对半导体混沌双向保密通信

和高速多量子阱混沌保密通信进行了系统研究^[3,4];K. Myneni 等^[5]进行了混沌激光相关测距研究,利用光反馈半导体产生的混沌激光脉冲序列实现了目标距离的测量;将混沌激光转化为电信号,构成混沌微波雷达,可以用于导航、测距、光纤光缆和电缆线路的断点定位检测等^[6~8]。于是混沌反控制的研究越来越受到重视,混沌反控制又称为混沌生成或混沌合成,即将原系统的定态或周期态转化为

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20090309)资助课题。

作者简介: 冯秀琴(1965—),女,博士,教授,主要从事光学混沌方面的研究。E-mail: fengxq@cust.edu.cn

混沌态,或使原系统的混沌加剧^[9]。

光学参量振荡器可以提供从可见光到红外光的可调谐相干辐射,因而是一种非常重要的光源。光学参量振荡与放大是典型的非线性光学效应,对于简并光学参量振荡器(DOPO)的混沌动力学的近期研究成果主要在混沌控制与同步方面,文献[10]研究了简并光学参量振荡器的超混沌控制与周期态同步,文献[11]和文献[12]研究了简并光学参量振荡器的超混沌同步。要使简并光学参量振荡器有混沌输出,必须有强抽运,但强抽运不易实现,即使实现了同时伴随着较高的能量损耗。本文研究在一般条件下,使简并光学参量振荡器的周期输出转化为混沌输出并实现混沌同步,为光学混沌保密通信以及其他方面的应用打下基础。

2 简并光学参量振荡器的混沌反控制与混沌同步系统

简并光学参量振荡器是典型的非线性光学系统,描述此系统非线性方程为^[13]

$$\frac{dA_1}{dt} = -(1 + i\Delta_1)A_1 + A_1^* A_0, \quad (1)$$

$$\frac{dA_0}{dt} = -(\gamma + i\Delta_0)A_0 + E_A - A_1^2, \quad (2)$$

式中 A_1 和 A_0 分别表示亚谐波模和基模的复振幅, Δ_1 和 Δ_0 分别为亚谐波模和基模的调谐参数, γ 为基模的衰减率, E_A 为抽运光场强度。当参数分别为 $\gamma = \Delta_0 = 1.0$, $\Delta_1 = -5.0$, $E_A \leq 7.4$ 时系统为定态, $7.4 < E_A < 10.0$ 时简并光学参量振荡器系统处于周期或准周期态,当 $E_A > 10.0$ 时系统处于混沌或超混沌态^[12]。为使低抽运情形下的简并光学参量振荡器有混沌输出,将两台简并光学参量振荡器(DOPO_A, DOPO_B)进行互耦合,即把两台简并光学参量振荡器的输出以特定的方式按一定的比例相互耦合到对方的系统中,如图 1 所示。图 1(a)为两个简并光学参量振荡器直接互耦合,图 1(b)为经过相位调制器(Phase modulator, PM)调制后耦合,耦合后对应图 1(a)的系统动力学方程为

DOPO_A

$$\frac{dA_1}{dt} = -(1 + i\Delta_1)(A_1 + \epsilon B_1) + A_1^* A_0, \quad (3)$$

$$\frac{dA_0}{dt} = -(\gamma + i\Delta_0)A_0 + E_A - A_1^2, \quad (4)$$

DOPO_B

$$\frac{dB_1}{dt} = -(1 + i\Delta_1)(B_1 + \epsilon A_1) + B_1^* B_0, \quad (5)$$

$$\frac{dB_0}{dt} = -(\gamma + i\Delta_0)B_0 + E_B - B_1^2. \quad (6)$$

在图 1(b)中,由于加入了相位调制器使亚谐波的输出相位改变 π ,亚谐波模光场改变了原来的方向,与原方向相反,基模光没有互耦合,对应的动力学方程不变,则对应的耦合后的系统动力学方程为

DOPO_A

$$\frac{dA_1}{dt} = -(1 + i\Delta_1)(A_1 - \epsilon B_1) + A_1^* A_0, \quad (7)$$

$$\frac{dA_0}{dt} = -(\gamma + i\Delta_0)A_0 + E_A - A_1^2, \quad (8)$$

DOPO_B

$$\frac{dB_1}{dt} = -(1 + i\Delta_1)(B_1 - \epsilon A_1) + B_1^* B_0, \quad (9)$$

$$\frac{dB_0}{dt} = -(\gamma + i\Delta_0)B_0 + E_B - B_1^2, \quad (10)$$

式中 ϵ 为耦合系数。由于耦合的作用,使互耦合的两个简并光学参量振荡器从周期态转化为混沌态,在特定条件下可以实现混沌同步。

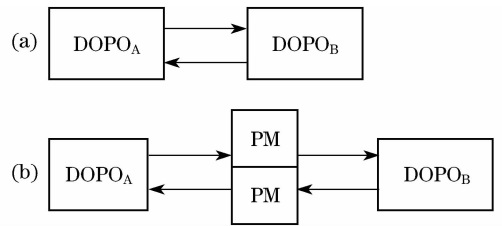


图 1 简并光学参量振荡器互耦合系统。(a)简并光学参量振荡器直接互耦合;(b)经过相位调制器调制后互耦合

Fig. 1 Mutual coupling system of degenerate optical parametric oscillators. (a) Mutual coupling directly; (b) mutual coupling after phase modulator

3 数值实验

3.1 互耦合后简并光学参量振荡器的混沌生成

在数值实验中,采用四阶龙格-库塔法,当系统参数 $\gamma = \Delta_0 = 1.0$, $\Delta_1 = -5.0$ 时,两个简并光学参量振荡器均处于周期态,抽运强度可以相同,也可以不同。当互耦合系数比较小时,耦合后系统仍然是周期态,随着调制系数的增加,系统逐渐从周期态转化为混沌态。图 2(a)为 $E_A = E_B = 8.5$ 时输出光强度随耦合系数变化的分岔图,从图中可见,随着耦合系数的增大,简并光学参量振荡器的输出从周期状态经过倍周期分岔进入混沌状态,但在 $0.168 \leq \epsilon \leq 0.192$ 之间存在周期窗口,图 2(b)为对应周期窗口放大图。图 2(c)为 $E_A = 7.5$, $E_B = 8.0$ 时输出光强

度随耦合系数变化的分岔图, 比较图 2(a) 和图 2(c) 可见, 不同抽运强度对应进入混沌状态的耦合系数范围不同。经过反复数值实验验证, 随着耦合系数的增加, 从周期状态经过倍周期分岔进入混沌状态中间均有周期窗口, 抽运强度越大, 实现混沌输出需要的耦合系数越小, 不同抽运强度与实现混沌生成

的最小互耦合系数的关系曲线, 如图 2(d) 所示。图 3 为不同抽运强度和互耦合系数所对应的混沌吸引子, 从中可见不同抽运强度和互耦合系数得到不同的混沌输出。以上图形是以直接互耦合得到的, 对于 (7)~(10) 式的结果与此类似。

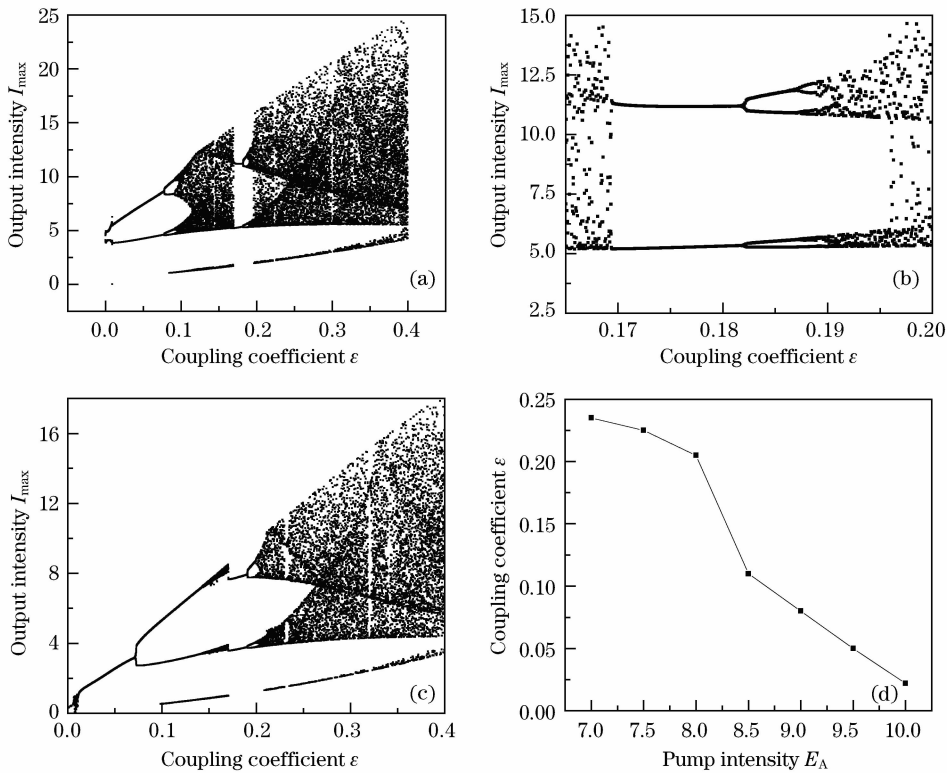


图 2 (a) $E_A = E_B = 8.5$ 时的分岔图; (b) $E_A = E_B = 8.5$ 时的放大分岔图; (c) $E_A = 7.5, E_B = 8.0$ 时的分岔图; (d) 抽运强度与实现混沌生成的最小互耦合系数的关系曲线

Fig. 2 (a) Bifurcation diagram of system via ϵ when, $E_A = E_B = 8.5$; (b) enlarged bifurcation diagram when $E_A = E_B = 8.5$; (c) bifurcation diagrams of system via ϵ when $E_A = 7.5, E_B = 8.0$; (d) pump intensity varies with the lowest coupling coefficient for chaotic generation

3.2 互耦合后简并光学参量振荡器的混沌同步与反向同步

在图 1 的互耦合系统里, 当 $DOPO_A$ 和 $DOPO_B$ 有相同的系统参数和抽运强度, 尽管初始条件不同, 只要互耦合系数满足使 $DOPO_A$ 和 $DOPO_B$ 从周期态转化为混沌态, 即可实现混沌同步。当系统参数 $\gamma = \Delta_0 = 1.0, \Delta_1 = -5.0, E_A = E_B = 9.5, \epsilon = 0.1, A_1^0 = 0.5 + i0.5, A_0^0 = 0.2 + i0.2, B_1^0 = 0.2 + i0.2, B_0^0 = 0.1 + i0.1$ 时, 对应图 1(a) 的亚谐波模实现反向同步, 基模光没有耦合, 实现同步, 同步过程演化如图 4(a)~(d) 所示。图 5(a)~(d) 为对应图 1(b) 同步过程演化结果, 从图中可见, 亚谐波模与基模光均实现混沌同步, 系统参数和初始条件分别为 $\gamma =$

$\Delta_0 = 1.0, \Delta_1 = -5.0, E_A = E_B = 8.5, \epsilon = 0.1$, 初始条件 $A_1^0 = 1.0 + i1.0, A_0^0 = 0.2 + i0.2, B_1^0 = 0.2 + i0.2, B_0^0 = 2.0 + i2.0$ 。这里相位调制器的作用只改变光场的方向, 不改变输出光强度。

4 结 论

互耦合在光学系统的混沌控制与同步研究中起着重要作用, 是实际中行之有效的方法。以往的研究应用互耦合主要在于混沌的控制与同步研究, 本文将这种方法应用于混沌反控制, 在低抽运情形下实现混沌输出并达到同步, 对光学混沌保密通讯和非线性光学问题研究具有一定的应用价值。

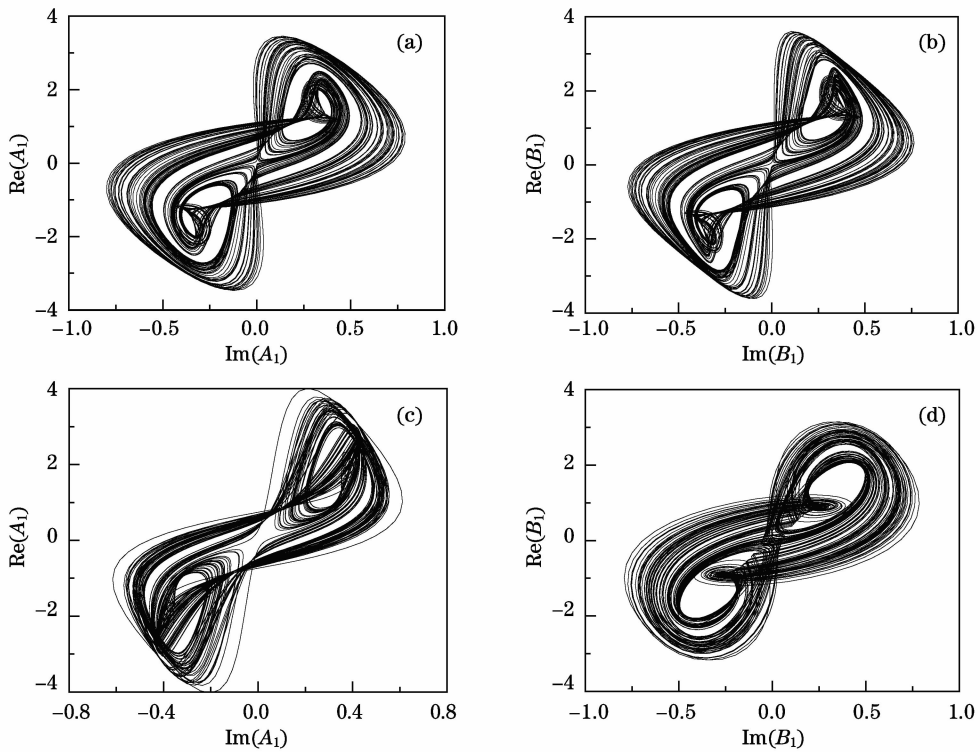


图 3 互耦合后生成的混沌吸引子(a)(b) $E_A=7.5, E_B=8.0, \epsilon=0.25$; (c)(d) $E_A=9.5, E_B=8.0, \epsilon=0.1$

Fig. 3 Chaotic attractors after mutual coupling for (a)(b) $E_A=7.5, E_B=8.0, \epsilon=0.25$; (c)(d) $E_A=9.5, E_B=8.0, \epsilon=0.1$

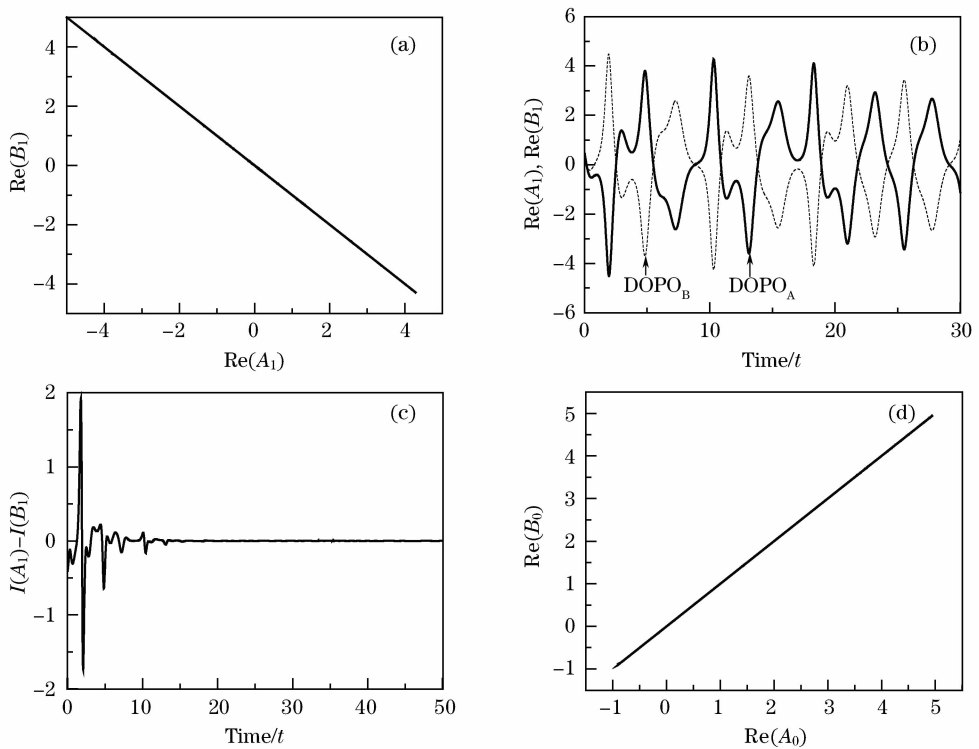


图 4 直接互耦合同步过程演化。(a)(b)亚谐波模反向同步;(c) $DOPO_A$ 与 $DOPO_B$ 的亚谐波模光强度差;(d)基模同步
 Fig. 4 Synchronization evolution after mutual coupling directly. (a)(b) Chaotic inversed synchronization of subharmonic mode; (c) the difference of intensity of the subharmonic mode $I(A_1)-I(B_1)$ versus time t ; (d) chaotic synchronization of fundamental mode

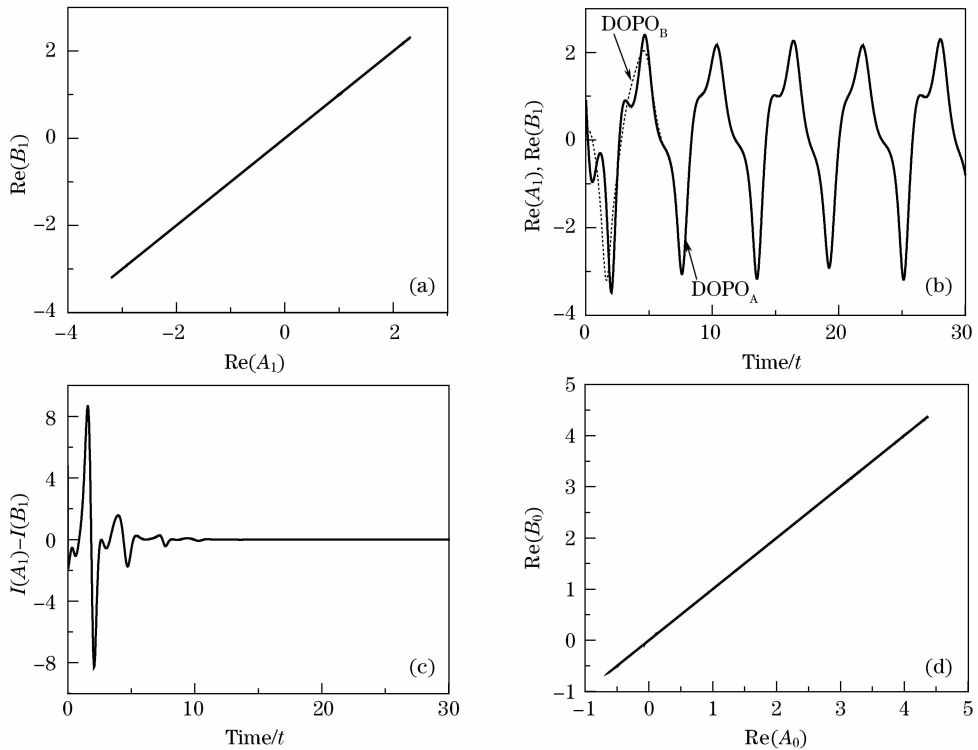


图 5 经过相位调制器调制后互耦合同步过程演化。(a)(b)亚谐波模同步；(c)DOPO_A与 DOPO_B的亚谐波模光强度差；(d)基模同步

Fig. 5 Synchronization evolution after mutual coupling through phase modulator. (a) (b) chaotic synchronization of subharmonic mode; (c) the difference of intensity of the subharmonic mode $I(A_1) - I(B_1)$ versus time t ; (d) chaotic synchronization of fundamental mode

参 考 文 献

- Zhang Peikun, Li Yulin, Liu Jiaying *et al.*. Study on the rotative invariance in the phase encrypted image and the phase-ring decryption [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3): 224~228
- 张培琨, 刘育林, 刘家英 等. 光学图像相位加密中旋转不变性实现及环形相位解密[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3): 224~228
- Yan Senlin, Chi Zeyang, Chen Wenjian. Chaos synchronization through reverse phase and its encoding in Erbium-doped fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 29~32
- 颜森林, 迟泽英, 陈文建. 掺铒光纤激光器反相位混沌同步及其编码[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 29~32
- Yan Senlin. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual-directional secure communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1503~1509
- 颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1503~1509
- Yan Senlin. High rate chaos secure communication system of multiple-quantum-well lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 179~185
- 颜森林. 高速多量子阱激光器混沌双向保密通信系统研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 179~185
- K. Myneni, T. A. Barr, B. R. Reed *et al.*. High-precision ranging using a chaotic radar pulse train [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(11): 1496~1498
- F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820
- F. Y. Lin, J. M. Liu. Ambiguity functions of laser-based chaotic radar [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(12): 1732~1738
- M. I. Sobhy, A. R. Shehata. Chaotic radar system [J]. *IEEE MTT-s Int. Microwave Symp. Dig.*, 2000, **3**, TH4A-5, 1701~1704
- Wang Xiaofang, Chen Guanrong, Yu Xinghua. Anticontrol of chaos in continuous-time systems via time-delay feedback [J]. *Chaos*, 2000, **10**(4): 771~779
- Feng Xiuqin, Shen Ke. Controlling hyperchaos and synchronizing periodic states in the DOPO [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2005, **37**(7): 695~703
- Feng Xiuqin, Shen Ke. Phase synchronization and anti-phase synchronization of chaos for degenerate optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics*, 2005, **14**(8): 1526~1532
- Feng Xiuqin. Control and synchronization of hyperchaos in optical parametric oscillator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006: 56~72
- 冯秀琴. 光学参量振荡器的超混沌控制与同步研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 56~72
- N. P. Pettiaux, R. D. Li, M. Paul. Instabilities of the degenerate optical parametric oscillator [J]. *Opt. Commun.*, 1989, **72**(3): 256~260