

文章编号: 0258-7025(2008)07-0992-05

# 多变量耦合实现双环掺铒光纤激光器混沌同步

杨磊 潘炜 罗斌 张伟利 江宁 周志 杨国标

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

**摘要** 根据双环掺铒光纤激光器的理论模型, 提出多变量单向耦合法实现混沌同步, 对主从系统模型进行数学推导, 研究不同参数条件下双环掺铒光纤激光器的混沌同步, 得到实现混沌同步的条件, 并在 Simulink 平台下动态仿真。结果表明, 衰减系数不同的两个双环掺铒光纤激光器, 主激光器通过定向耦合器驱动从激光器, 主从系统可以实现精确混沌同步, 且随着反馈强度的增大, 实现系统混沌同步的时间越短, 反馈强度的取值范围由衰减系数和耦合系数确定; 选取不同的系统初值, 主从系统可实现混沌同步, 系统初值对达到混沌同步时间的影响可忽略不计; 在主从系统中引入随机高斯噪声, 主从系统仍可实现较好的混沌同步。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 混沌同步; 耦合

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20083507.0992

## Synchronization of Chaotic Erbium-Doped Fiber Lasers by Multivariable Unidirectionally Couple

Yang Lei Pan Wei Luo Bin Zhang Weili Jiang Ning Zhou Zhi Yang Guobiao

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract** Based on the theoretic modal of the erbium-doped fiber dual-ring lasers, the chaotic synchronization by using multivariable unidirectionally coupled scheme is set up. Two different fiber lasers have been investigated and the condition for realizing chaotic synchronization is given. Numerical simulation of the model is established on Simulink and results show that one of the erbium-doped fiber dual-ring lasers as the master laser drives the another slave laser, and they can be completely synchronized even though the decay rate of the two lasers are different and the larger the feedback coefficient is, the faster two lasers achieve synchronization. The feedback coefficient have relationship with decay rate and coupling coefficient. It is also shown that the initial value of the lasers cannot affect the synchronized system, the synchronization is maintained very well. And when the effects of the Gauss noises are considered in the system, they can still reach good synchronization.

**Key words** laser technique; fiber lasers; chaotic synchronization; coupling

## 1 引 言

自 Louis M. Pecora 等<sup>[1]</sup>提出混沌同步, 并在实验室观察到两个混沌电路的同步以后, 混沌同步吸引了众多学者的深入研究。此后, 半导体激光器、垂直腔面发射激光器以及其他激光器<sup>[2~6]</sup>的混沌同步研究相继展开, 提出了许多方法并得到实验验证。掺铒光纤激光器作为新型激光光源在光纤通信中得到广泛应用, 国内外研究人员从理论和实验

上对其动力学行为进行了大量研究<sup>[7~9]</sup>。Sancheez 等<sup>[10~13]</sup>建立了双环掺铒光纤激光器的理论模型, 并在实验中观察到混沌现象。混沌同步在保密通信中具有潜在的应用价值<sup>[14]</sup>, 因此, 对双环掺铒光纤激光器混沌同步的研究也引起人们的重视。目前, 针对双环掺铒光纤激光器混沌同步的研究多数基于驱动-响应同步思想方法, 分别提出了反馈同步法、延时反馈同步法、参数调制同步法等<sup>[15,16]</sup>, 这些方法

收稿日期: 2007-08-17; 收到修改稿日期: 2007-11-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20070613058)资助项目。

作者简介: 杨磊(1981—), 男, 新疆人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和光通信方面的研究。

E-mail: yanglei19811212@sohu.com

导师简介: 潘炜(1959—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事半导体激光器和非线性系统理论、量子通信等方面的研究。E-mail: weipan80@sohu.com

都基于主从系统具有相同参数,而系统参数不同时的情况讨论较少。

本文基于双环掺铒光纤激光器建立多变量单向耦合实现系统混沌同步的理论模型;两个衰减系数不同的双环掺铒光纤激光器通过多个定向耦合器连接在一起,分别为主系统和从系统;主系统的输出光场通过定向耦合器驱动从系统,从而实现混沌同步。讨论衰减系数不同时,选取合适反馈强度可以实现精确混沌同步,确立反馈强度的取值范围由衰减系数和耦合系数共同决定,并且分析衰减系数与达到系统混沌同步时间的关系;研究不同系统初值对混沌同步和同步时间的影响;在系统中加入随机高斯噪声<sup>[17~19]</sup>,通过观察输出光场强度,分析噪声对系统的影响。

## 2 多变量单向耦合同步法的理论模型

### 2.1 模型建立

建立多变量单向耦合同步法的模型如图 1 所示。其中,WDM 为波分复用器,其作用一方面将抽运光耦合进掺铒光纤,另一方面将激光腔内部分激光耦合到激光器外。两个单环掺铒光纤激光器经定向耦合器  $C_0$  耦合成双环掺铒光纤激光器。选择三个定向耦合器  $C_1, C_2, C_3$  分别放入主系统  $m$  的输出端和从系统  $s$  的环  $a$  内,主系统激光器环  $a$  和环  $b$  的输出光场分别经  $C_1, C_2$  进入加法器  $S$ ,其作用是控制主系统用于驱动从系统同步的驱动信号,两个光场经加法器后的驱动信号经  $C_3$  反馈到从系统激光器的环  $a$  中,并控制单向耦合进入从系统的驱动信号的大小。

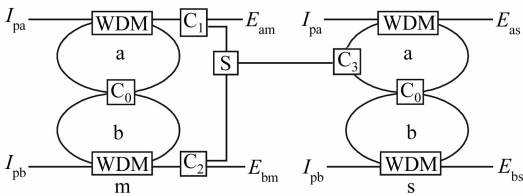


图 1 多变量单向耦合同步法的模型图

Fig. 1 Synchrony scheme of multivariable unidirectionally couple

图 1 所示的两个双环掺铒光纤激光器动力学方程为:

主系统的动力学方程

$$\frac{\partial E_{am}}{\partial \tau} = -k_{am}(E_{am} + \eta_{0m}E_{bm}) + g_{am}E_{am}D_{am}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_{bm}}{\partial \tau} = -k_{bm}(E_{bm} - \eta_{0m}E_{am}) + g_{bm}E_{bm}D_{bm}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial D_{am}}{\partial \tau} = -(1 + I_{pam} + |E_{am}|^2)D_{am} + I_{pam} - 1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial D_{bm}}{\partial \tau} = -(1 + I_{pbm} + |E_{bm}|^2)D_{bm} + I_{pbm} - 1, \quad (4)$$

从系统的动力学方程

$$\frac{\partial E_{as}}{\partial \tau} = -k_{as}(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs} - \beta E_{am} - \gamma E_{bm}) + g_{as}E_{as}D_{as}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_{bs}}{\partial \tau} = -k_{bs}(E_{bs} - \eta_{0s}E_{as}) + g_{bs}E_{bs}D_{bs}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial D_{as}}{\partial \tau} = -(1 + I_{pas} + |E_{as}|^2)D_{as} + I_{pas} - 1, \quad (7)$$

$$\frac{\partial D_{bs}}{\partial \tau} = -(1 + I_{pbs} + |E_{bs}|^2)D_{bs} + I_{pbs} - 1, \quad (8)$$

式中下标  $m$  和  $s$  分别代表主系统和从系统;  $E_a, E_b, D_a, D_b, I_{pa}, I_{pb}, k_a, k_b, g_a, g_b$  分别为环  $a$  和环  $b$  的规格化激光场强、规格化反转粒子数、抽运光光强、衰减系数和增益系数<sup>[2,9]</sup>;  $\eta_0$  为定向耦合器  $C_0$  对  $1.55 \mu\text{m}$  波长光波的耦合系数;  $\tau$  为归一化时间,  $\tau = t/\tau_2$ ,  $\tau_2$  为  $\text{Er}^{3+}$  离子亚稳态寿命,  $\tau_2 \approx 10 \text{ ms}$ ;  $\beta = C_1 \cdot C_3$  为主系统环  $a$  输出激光场强的反馈系数,  $\gamma = C_2 \cdot C_3$  为主系统环  $b$  输出激光场强的反馈系数。

### 2.2 理论推导

从(1)~(8)式可以看出,该方法对于参数完全相同的两个主从系统,即使是系统初值相同也无法实现混沌同步,因为主系统与从系统的动力学方程始终不平衡。(5)式相比(1)式多了  $(-\beta E_{am} - \gamma E_{bm})$  项,但在  $\beta, \gamma$  非常小的情况下,参数相同的主从系统之间可以实现广义混沌同步。但对于两个不同的激光器,在主从系统环  $a$  衰减系数不同的情况下,应用多变量单向耦合法,通过适当选取耦合系数和衰减系数的值确定  $\beta$  和  $\gamma$  的值,可以实现系统精确的混沌同步,而且多变量控制更增加了系统的整体性和可控性。

仅讨论衰减系数不同的两个激光器。(1)~(8)式主从系统动力学方程中  $k_{am} \neq k_{as}$ , 其余系统参数相同,令  $m = |(k_{as} - k_{am})/k_{as}|$  ( $m$  值是推导动力学方程而引入的项),当  $k_{am} \leq k_{as}$  时,可以得到  $k_{am} = k_{as}(1 - m)$ ,当  $k_{am} \geq k_{as}$  时,可以得到  $k_{am} = k_{as}(1 + m)$ 。(5)式可改写为

$$\begin{aligned} \dot{E}_{as} = & -k_{as}[(1 - m)(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) + \\ & m(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \beta E_{am} - \gamma E_{bm}] + g_{as}E_{as}D_{as}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{as} = & -k_{as}[(1+m)(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \\ & m(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \beta E_{am} - \gamma E_{bm}] + g_{as}E_{as}D_{as}, \end{aligned} \quad (10)$$

进一步整理(9),(10)式,可以得到

$$\begin{aligned} \dot{E}_{as} = & -k_{am}(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) + g_{as}E_{as}D_{as} \pm \\ & k_{as}[m(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \beta E_{am} - \gamma E_{bm}]. \end{aligned} \quad (11)$$

主从系统混沌同步,即  $E_{as} = E_{am}$ ,  $E_{bs} = E_{bm}$ ,  $D_{as} = D_{am}$ ,  $D_{bs} = D_{bm}$ ,那么主从系统的动力学方程必须对称相同,因此只有(5)式中  $-k_{as}[m(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \beta E_{am} - \gamma E_{bm}]$  这一项恒为零,才能与(1)式相等。

因为,  $k_{as} \neq 0$ ,所以

$$m(E_{as} + \eta_{0s}E_{bs}) - \beta E_{am} - \gamma E_{bm} = 0, \quad (12)$$

(12)式是关于变量  $E_{as}$ ,  $E_{bs}$ ,  $E_{am}$ ,  $E_{bm}$  的方程,  $m$ ,  $\eta_{0s}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  都是常数且值都不为零。当激光器正常工作时,主从系统为混沌态,即  $E_{am} \neq E_{bm}$ ,  $E_{as} \neq E_{bs}$ ,系统同步时才有  $E_{as} = E_{am}$ ,  $E_{bs} = E_{bm}$ ,因为  $E_{as} \neq E_{bm}$ ,  $E_{bs} \neq E_{am}$ ,所以,为了使(12)式为零,只能通过以下形式实现

$$\begin{cases} mE_{as} - \beta E_{am} = 0 \\ m\eta_{0s}E_{bs} - \gamma E_{bm} = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

即

$$\begin{cases} m = \beta \\ m\eta_{0m} = \gamma \end{cases}, \quad (14)$$

(14)式即为满足实现系统混沌同步的条件。式中  $m = |(k_{as} - k_{am})/k_{as}|$ ,对于确定的系统,  $k_{am}$ ,  $k_{as}$  为主从系统的衰减系数,由系统确定。 $m$  值是推导动力学方程而引入的项,因此反馈强度的取值根据(14)式的要求而定。其中  $\beta = C_1 \cdot C_3$  和  $\gamma = C_2 \cdot C_3$ ,设计系统时,通过给定的系统衰减系数来选取合适的耦合器的耦合系数,并满足(14)式的要求,即能使系统实现精确的混沌同步。

参数  $m = |(k_{as} - k_{am})/k_{as}|$  是主从系统环 a 衰减系数差值与从系统环 a 衰减系数的比值,而  $\eta_{0s}$  对于给定的系统则是不变的。由此可以看出,要窃取混沌载波信号中的有效信号,必须同时知道主从系统的确切参数,仅知道主系统参数或从系统参数无法达到目的,因此该方法应用在保密通信中,可增强系统的不可复制性,提高保密程度。

主从系统环 b 衰减系数不同的情况,只需主系统输出激光场强反馈到从系统环 b 内,同样可以实现精确的混沌同步。

### 3 数值仿真

主从系统参数选取为:  $k_{am} = 1000$ ,  $k_{bm} = k_{bs} = 1000$ ,  $g_{am} = g_{as} = 10500$ ,  $g_{bm} = g_{bs} = 4600$ ,  $\eta_{0m} = \eta_{0s} = 0.2$ ,  $I_{pam} = I_{pas} = 4$ ,  $I_{pbm} = I_{pbs} = 4$ 。

图 2 表示当主从系统环 a 衰减系数不同时,系统实现同步前后,主系统和从系统输出光场强度的变化。其中,选取  $k_{as} = 1250$ ,主系统初值  $(E_{am}, E_{bm}, D_{am}, D_{bm})$  为  $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ ,从系统初值  $(E_{as}, E_{bs}, D_{as}, D_{bs})$  为  $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ 。从图 2(b),(c)可以看出,主从系统都处在混沌状态,但没有加入定向耦合器,即使两个独立系统的初始值相同,由于衰减系数不同,也不能实现混沌同步。图 2(a)显示  $E_{am}$  和  $E_{as}$  在  $E_{am} - E_{as}$  平面上关系十分混乱,两者差值较大;图 2(b),(c)显示相平面  $E_a - E_b$  上主从系统的奇怪吸引子都处在混沌态,但完全不同。加上定向耦合器后,主系统输出光场驱动从系统,并使  $m = \beta = 0.2$ ,  $m\eta_{0m} = \gamma = 0.04$ ,可以从图 2(d)看出  $E_{am} - E_{as}$  平面上  $E_{am}$  和  $E_{as}$  的关系变成一条斜率为 1 的直线,主从系统的奇怪吸引子在相平面  $E_a - E_b$  的投影上也相同,系统即实现混沌同步。

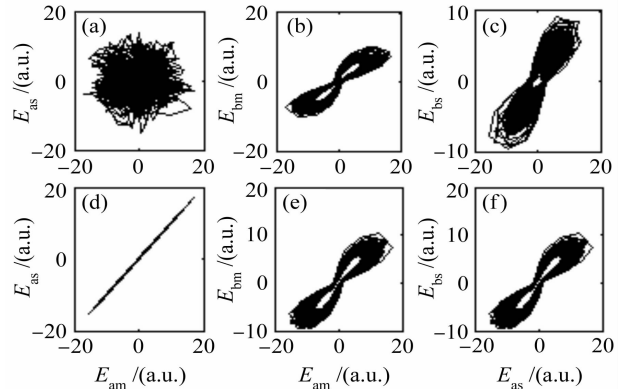


图 2 激光器 m 和 s 的奇怪吸引子在相平面  $E_{am} - E_{as}$  的投影及  $E_{am}$  与  $E_{as}$  的关系。(a)~(c) 驱动前;(d)~(f) 驱动后

Fig. 2 Strange attractors of m and s lasers and relation between  $E_{am}$  and  $E_{as}$ . (a)~(c) before driving; (d)~(f) after driving

图 3 表示衰减系数不同,即反馈强度  $\beta$  变化时,主从激光器输出光场差值  $\Delta E = 10 \times \lg|E_{am} - E_{as}|$  的时间序列。主系统初值为  $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ ,从系统初值为  $(13.5, 13.5, 0.1, 0.1)$ 。当  $k_{as} = 1040$ ,  $\beta = 40/1040$  时,输出光场差值  $\Delta E$  的数量级在  $10^{-5} \sim 10^{-7}$  之间变化,系统达到一般混沌同步,如图 3(a)所示;当  $k_{as} = 1060$  或  $1100$ ,对应  $\beta = 60/1060$  或  $100/1100$  时,主从系统达到精

确混沌同步,但后者达到混沌同步的时间和效果要优于前者;当  $k_{as} = 1250, \beta = 250/1250$  时,系统在 2 ms 左右达到精确同步。由此可见,增大反馈强度可以提高系统混沌同步的时间。

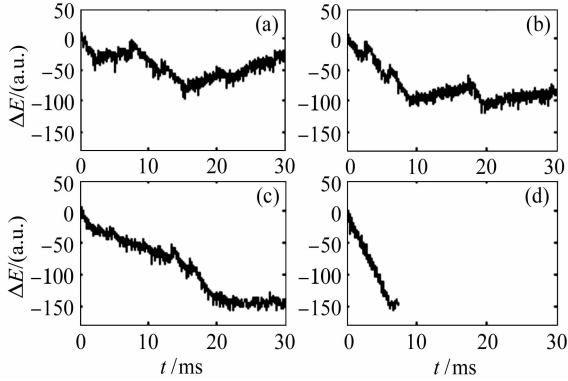


图 3 输出光场的差值  $\Delta E$  的时间序列

Fig. 3 Time trace of  $\Delta E$  of the output laser

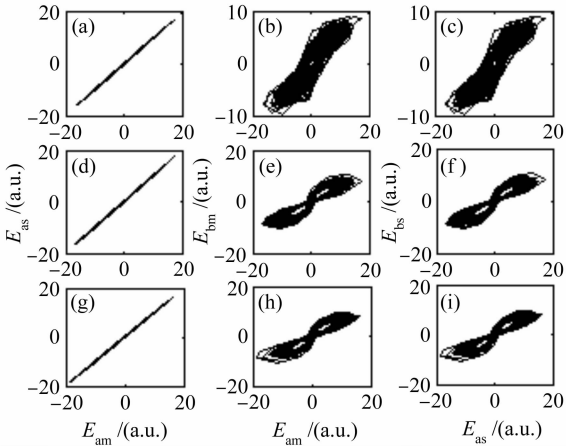


图 4 初值不同,激光器 m 和 s 的奇怪吸引子在相平面  $E_{am} - E_{as}$  的投影及  $E_{am}$  与  $E_{as}$  的关系

Fig. 4 Strange attractors of m and s lasers and relationship between  $E_{am}$  and  $E_{as}$  with different initial inputs

图 4 表示系统初值对主从系统混沌同步的影响。随机选取三组初值,主系统初值分别为  $(13.5, 13.5, 10, 10), (10, 0.1, 0.1, 13.5), (0.1, 10, 13.5, 0.1)$ , 从系统初值对应为  $(0.1, 13.5, 10, 10), (13.5, 0.1, 0.1, 13.5), (10, 10, 10, 0.1)$ , 当  $k_{as} = 1250, \beta = 250/1250$  时,从图 4 中可以看出,初值选取不同但并没有影响系统混沌同步。应用多变量耦合合法时系统混沌同步与系统初值无关,这不仅提高了设计系统的简易性而且增强了保密通信系统的灵活性。

图 5 为分别取上面三组系统初值,主从激光器输出光场差值  $\Delta E = 10 \times \lg |E_{am} - E_{as}|$  的时间序列图。图 5(a) 显示系统进入混沌同步的时间要略大于图 4(b), (c) 所示系统进入混沌同步的时间,但

从  $\Delta E$  的数量级上分析,当  $\Delta E$  的数量级大于  $10^{-7}$  时系统达到精确同步,系统初值不同对系统达到混沌同步的时间差别不大。因此,在保密通信系统中,应用多变量单向耦合法,初值对系统混沌同步的影响几乎可以忽略不计。

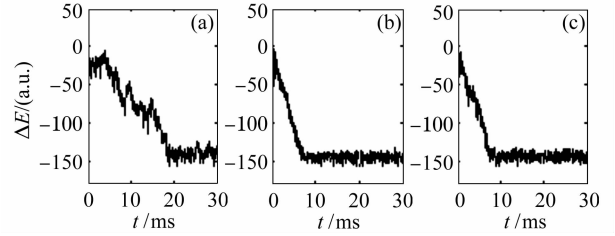


图 5 初值不同,输出光场的差值  $\Delta E$  的时间序列  
Fig. 5 Time trace of  $\Delta E$  with different initial input

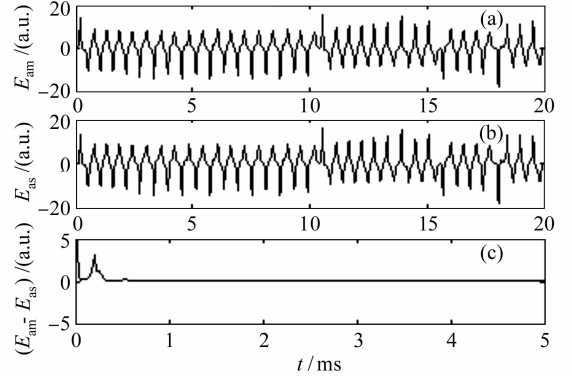


图 6 主激光器(a)和从激光器(b)输出光场强度的时间序列及两者差值的时间序列图(c)

Fig. 6 Time trace of the master laser output (a), slave laser output (b) and difference of them (c)

图 6 为考虑高斯噪声情况下,  $E_{am}$  与  $E_{as}$  的时间序列及差值时间序列的示意图。选取  $k_{as} = 1250$ , 主系统初值为  $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ , 从系统初值为  $(13.5, 13.5, 0.1, 0.1)$ 。在方程(1), (2), (5), (6)右端各加入服从高斯分布且均值为零、方差为 1 的随机数,从图 6(c)中可以看到,系统经过一个暂态后,主从激光器的光场差值为零,两个激光器达到精确同步。在实际通信系统中,总会存在一些噪声,多变量耦合模型可以有效地抑制噪声对系统的影响,在有噪声的情况下仍可实现较好的混沌同步。

## 4 结 论

针对衰减系数不同的两个双环掺铒光纤激光器,提出多变量单向耦合法实现系统混沌同步,并借助 Simulink 平台开发的动态仿真模型对双环掺铒光纤激光器混沌同步问题进行了研究。分析表明,主从系统初值不同,增大反馈强度,可以提高系统实

现混沌同步的时间,确定了反馈强度与耦合系数和衰减系数的关系;系统初值不同时,不同的初值对系统实现混沌同步的影响可以忽略;在系统中加入随机高斯噪声,模型可以有效抑止噪声对系统的影响,两个激光器仍然达到精确混沌同步。可以看出在实际应用中,考虑到系统的整体性和更加全面的设计、控制系统,多变量耦合合法可以通过选取多个耦合器来实现系统混沌同步,并且使初值和噪声对系统的影响非常有限。

### 参 考 文 献

- Louis M. Pecora, Thomas L. Carroll. Synchronization in chaotic systems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(8):821~824
- Pere Colet, Rajarshi Roy. Digital communication with synchronized chaotic lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24):2056~2058
- Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Study of parameter for higher order bifurcation and chaos behavior of VCSELS control [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(11):1789~1792  
潘 炜,张晚霞,罗 斌等. VCSELS 高阶分岔及混沌行为的参数控制[J]. *电子学报*, 2004, **32**(11):1789~1792
- Zhu Shiqun, Lü Xiang, Zhou Jianlan. Chaotic synchronization in two non-identical lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):343~346  
朱士群,吕 翔,周建兰. 两台非全同激光器的混沌同步[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):343~346
- Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Chaos synchronization in polarization selective mutually coupled semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):55~60  
张伟利,潘 炜,罗 斌等. 偏振选择互注入半导体激光器的混沌同步[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):55~60
- Yan Senlin. Controlling chaos in Semiconductor lasers by phase conjugation feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1043~1046  
颜森林. 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1043~1046
- Y. Imai, H. Murakawa, T. Imoto. Chaos synchronization characteristics in erbium-doped fiber laser systems [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **217**:415~420
- Henry D. I. Abarbanel, Matthew B. Kennel, Michael Buhl *et al.*. Chaotic dynamics in erbium-doped fiber ring lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **60**(3):2360~2374
- Jia-Ming Liu, How-Foo Chen, Shuo Tang. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1184~1196
- Francois Sanchez, Patrice Le Boudec, Pierre-Luc Francois *et al.*. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **48**(3):2220~2229
- Sungchul Kim, Byoungcho Lee, Senior Member *et al.*. Experiments on chaos synchronization in two separate erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4):290~292
- Liguo Luo, T. J. Tee, P. L. Chu. Chaotic behavior in erbium-doped fiber-ring lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(3):972~978
- Liguo Luo, P. L. Chu, T. Whitbread *et al.*. Experimental observation of synchronization of chaos in erbium-doped fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**:213~217
- Fang Nian, Wang Lutang, Guo Shuqin *et al.*. Security of polarization-shift keying chaos optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):812~817  
方 捻,王陆唐,郭淑琴等. 偏振态移位键控光混沌通信系统的保密性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):812~817
- Rong Wang, Ke Shen. Synchronization of chaotic systems modulated by another chaotic system in an erbium-doped fiber dual-ring laser system [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(8):960~963
- Yan Senlin, Chi Zeying, 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
- Clifford Tureman Lewis, Henry D. I. Abarbanel, Matthew B. Kennel *et al.*. Synchronization of chaotic oscillations in doped fiber ring lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **63**(1):016215
- Li Xiaofeng, Pan Wei, Ma Dong *et al.*. Effects of spontaneous emission noise in semiconductor lasers on chaotic optical communication systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10):5094~5104  
李孝峰,潘 炜,马 冬等. 激光器自发辐射噪声对混沌光通信系统的影响[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10):5094~5104
- Deng Guo, Pan Wei, Luo Bin. Influence of spontaneous emission factor on the bifurcation and chaos behavior of VCSEL under large signal modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):293~296  
邓 果,潘 炜,罗 斌. 自发辐射因子对 VCSEL 在大信号调制下的分岔及混沌行为的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):293~296