

文章编号: 0258-7025(2005)05-0642-05

双环掺铒光纤激光器混沌相移控制方法研究

颜森林, 何龙庆, 吴海勇, 王海军, 罗 青

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

摘要 提出双环单模掺铒光纤激光器激光混沌相移控制方法以及物理模型, 数值计算出该激光器的最大李亚谱诺夫(Lyapunov)指数, 分析了光耦合器耦合系数对激光由分岔进入混沌的动力学行为的影响。说明了相移控制器是通过控制电光相位调制器外调制电压来控制相移, 从而实现控制激光光场相位以控制偏振耦合效应, 最终实现了控制激光混沌动力学行为; 单相移混沌控制方法能实时、动态、有效地控制激光混沌到稳定态和周期态; 双相移混沌控制方法则可以灵活改变两个相移控制器的相位, 也能实时、动态、有效地控制激光混沌到稳定态和周期态, 并能进一步产生多种丰富的激光动力学行为现象。

关键词 激光技术; 混沌; 控制; 掺铒光纤激光器; 相移

中图分类号 TN25; O415.5 **文献标识码** A

Studies on Method of Phase-Shift Controlling Chaos for Dual-Ring Erbium-Doped Fiber Lasers

YAN Sen-lin, HE Long-qing, WU Hai-yong, WANG Hai-jun, LUO Qing

(Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017, China)

Abstract Method of chaos controlled by phase-shift and its physical model are presented for dual-ring single erbium-doped fiber lasers. The maximum Lyapunov exponent is numerically calculated to analyze the effect of the coupler's coupling coefficient on kinetic behavior from bifurcation into chaos in the laser. The phase-shift controller is explained by controlling external-modulation-voltage of electro-optical phase-modulator. The method can adjust the optical field phase to control the polarization-coupling effect to control laser chaos kinetic behavior. Single-phase-shift can control real-time dynamically effectively laser chaos into stable states and periodic states. Dual-phase-shift can also control real-time dynamically effectively laser chaos into stable states and periodic states by adjusting flexibly phase shifts of two phase-shift controllers. And it can produce a lot of laser kinetic phenomena.

Key words laser technique; chaos; control; erbium-doped fiber laser; phase-shift

1 引 言

混沌是普遍存在的一种自然现象, 其基本特性是它对初值条件极为敏感, 它的变化具有随机特点, 它的长期行为是不可以预测的。虽然混沌表面上呈现无规律性, 但其背后也隐藏着有序的本质特点。所以人们总是期望找到一些方法来控制混沌, 并实现对混沌系统中某个不稳定周期轨道的稳定控制或使其保持在某个希望的平衡态上。20 世纪 90 年代, Ott, Grebogi, Yorke^[1] 共同提出混沌控制 (OGY) 方法后, 混沌控制研究迅速发展, 自适应控制方法、反馈方法和周期扰动方法等相继被提出并实现了对各种混沌系统以及包括激光混沌系统的控制。

20 世纪 90 年代, 掺铒光纤作为新颖的激光光源和光放大器在光纤通信中得到了广泛的应用, 人们对掺铒光纤激光器的动力学行为进行了大量的理论和实验研究^[2~5]。由于光纤芯功率密度高且铒离子的亚稳态寿命长达 1~10 ms, 激光器可以由连续工作状态过渡到自脉动或混沌状态^[6,7]。本文则研究光纤激光器混沌的另一个重要方面——混沌控制。由于双环掺铒光纤激光器具有光偏振耦合的动力学特点, 提出双环掺铒光纤激光器激光混沌的相移控制方法, 它能有效地把混沌控制到稳定态和周期态上, 并可以灵活地改变相移控制器的相移, 产生多种丰富的激光动力学现象。

收稿日期: 2004-01-06; 收到修改稿日期: 2004-04-13

基金项目: 江苏省教育厅资助项目 (04KJD520084)。

作者简介: 颜森林 (1962—), 男, 江苏淮安人, 副教授, 博士后, 主要从事光纤通信系统与技术、光保密通信、光电子器件、激光混沌的研究。E-mail: senlinyan@163.com

2 模 型

双环单模掺铒光纤激光器的非线性动力学行为主要是由两激光场的实部和虚部的正交偏振耦合效应所产生的。针对这一动力学特性,提出激光混沌相移控制方法,图 1 是相移控制混沌的原理图。其中, I_{pa} 和 I_{pb} 是抽运光; E_a 和 E_b 分别是 a 环和 b 环的输出光场; C_0 是耦合器,它使激光产生 $\pi/2$ 相移; WDM 是波分复用器; PC_1 和 PC_2 是相移控制器,它们分别控制进入耦合器的光场的相移。例如,相移控制器可以采用目前光纤通信中常用的 $LiNbO_3$ 晶体, $GaAs$ 晶体, $LiTaO_3$ 晶体等电光相位调制器,利用电光效应原理,通过直接控制电光相位调制器的外调制电压,控制输出光场的相移。这样就建立了受相移控制器控制的双环单模掺铒光纤激光器的非线性归一化方程^[6~10]

$$\frac{d}{dt}E_a = -k_a\{E_a - \eta_0 \eta E_b \exp[j(\pi/2 + \alpha)]\} + g_a E_a D_a, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}E_b = -k_b\{E_b - \eta_0 \eta E_a \exp[j(\pi/2 + \beta)]\} + g_b E_b D_b, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}D_a = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2)D_a + I_{pa} - 1, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}D_b = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2)D_b + I_{pb} - 1, \quad (4)$$

其中 D_a, D_b 分别为两激光器的反转粒子数; k_a, k_b 分别为两激光器的损耗系数; η_0 为光耦合器的耦合系数; η 为两相移控制器的插入损耗系数; g_a, g_b 分别为两激光器的增益系数; α 为 PC_1 相移控制器产生的相移, β 为 PC_2 相移控制器产生的相移。通过调制 α 和 β 值的大小就可以控制混沌进入稳定态和周期态,以及其他状态。

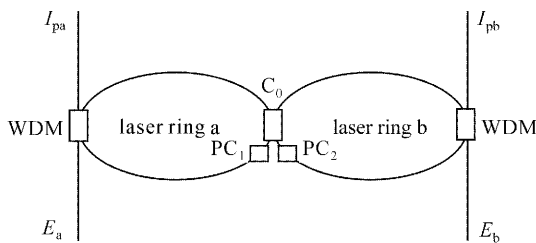


图 1 相移控制系统

Fig. 1 Phase-shift controlling scheme

3 数值模拟结果

光耦合器是影响双环单模掺铒光纤激光器非线性动力学行为特性的主要因素。系统运动轨道的稳

定性通常采用最大李亚谱诺夫 (Lyapunov) 指数 LE_1 来描述, LE_1 是诊断系统是否进入混沌的主要参量,如 $LE_1 < 0$,系统是稳定态, $LE_1 = 0$,系统是周期态, $LE_1 > 0$,系统是混沌态。所以这里给出该激光器随光耦合器耦合系数变化的最大李亚谱诺夫指数 LE_1 ,了解该激光器在何耦合系数条件下进入混沌态。激光器归一化数值取^[6~10]: $I_{pa} = I_{pb} = 4$, $k_a = k_b = 1000$, $g_a = 4800$, $g_b = 10500$ 。现对无相移控制时的方程式 (1)~(4) 数值计算 (即取 $\eta = 1$, $\alpha = 0, \beta = 0$), 结果见表 1。由表 1 可见,光耦合器耦合系数决定了系统由分岔进入混沌的动力学行为道路。当 $0 \leq \mu_0 \leq 0.05$ 时, $LE_1 < 0$,系统是稳定态的; 当 $0.06 \leq \mu_0 \leq 0.07$ 时, $LE_1 = 0$,系统是周期态的; 当 $0.08 \leq \mu_0 \leq 0.15$ 以及 $0.08 \leq \mu_0 \leq 0.15$ 时, $LE_1 > 0$,系统是混沌态的。

表 1 最大李亚谱诺夫指数

Table 1 Maximum Lyapunov exponent

μ_0	LE_1	μ_0	LE_1	μ_0	LE_1
0	-22.7	0.08	4.6	0.16	-0.5
0.01	-18.1	0.09	10.3	0.17	-0.8
0.02	-13.7	0.10	11.0	0.18	11.5
0.03	-9.5	0.11	10.3	0.19	16.2
0.04	-5.8	0.12	11.8	0.20	17.8
0.05	-2.5	0.13	12.1	0.21	17.6
0.06	0	0.14	0.15		
0.07	0	0.15	2.2		

当 $\eta_0 = 0.2, \alpha = 0$ 和 $\beta = 0$ 时的双环单模掺铒光纤激光器的非线性动力学行为如图 2 所示。其中,

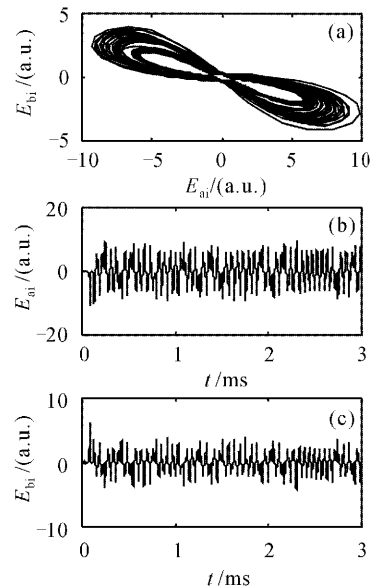


图 2 相轨迹和波形

Fig. 2 Phase space orbit and waveforms

图 2(a)是由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图(E_{ai} 表示 a 环输出激光光场的虚部, E_{bi} 表示 b 环输出激光光场的虚部), 显示出典型的混沌双涡旋吸引子。而图 2(b)和(c)分别表示 E_{bi} 随时间变化的混沌波形。由于 a 环和 b 环所取增益系数的值不一样, E_{ai} 和 E_{bi} 随时间变化的轨迹是不一样的。在进行相移控制混沌数值模拟时, 控制时间选在 1.5 ms 时变化 α 和 β 数值进行控制混沌。

3.1 单相移控制

首先进行单相移控制混沌研究(以下均取 $\eta_0 = 0.2$ 和 $\eta = 0.9$), 让 $\alpha = 0$, 仅仅变化 β 的数值。图 3 中的左右两幅图[图 3(a)~(c)以及(d)~(f)]表示单相移控制时($\beta = \pi$ rad)激光由混沌态被控制到稳

定态上的动力学行为过程。其中, 图 3(a)以及图 3(d)是由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图, 图 3(b)和(c)以及(e)与(f)分别是 E_{ai} 和 E_{bi} 随时间变化的波形。可见由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图在 1.5 ms 后系统已开始逐步进入稳定态, 并最终稳定在稳定态上; 两波形图分别表示在 1.5 ms 后 E_{ai} 和 E_{bi} 随时间变化的轨迹, 可明显看出, 经过一个短暂张弛振荡过程(大约 0.3 ms), 混沌已被控制到稳定态上。同时要指出的是, 左右两幅图所取的初值是不一样的, 它们的初值分别为 $(0.15i, 8.5i, 0.1, 0.1)$ 和 $(1.2i, -0.6i, 0.1, 0.1)$, 可以看到由混沌进入稳定态的动力学行为过程也是不一样的(激光进入了不同的不动点), 这完全是由于混沌对初值具有敏感特性决定的。

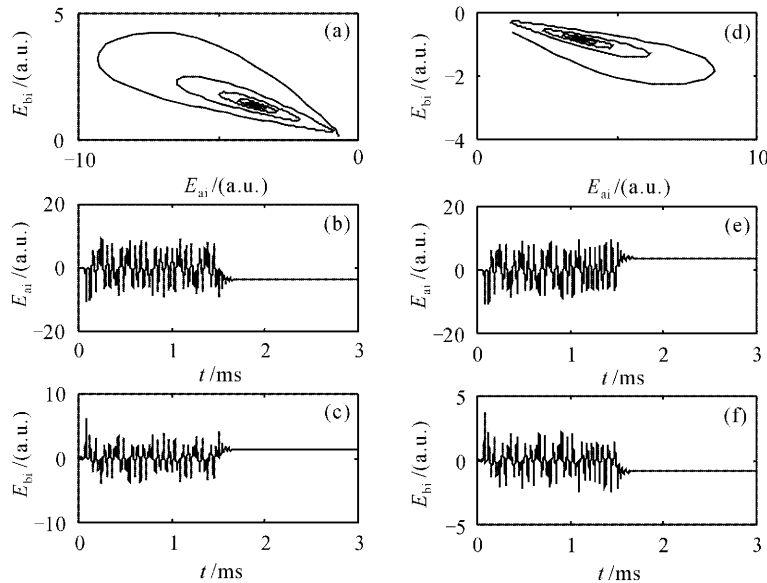


图 3 混沌被控制到稳定态。其中左图和右图所取的初值不同

Fig. 3 Chaos can be controlled into stable states. Here are different starting values in the right and the left

图 4 显示单相移控制时($\beta = 0.28$ rad)的激光由混沌态被控制到稳定周期态的动力学行为过程。其中, 图 4(a)是由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图, 图 4(b)和(c)分别是 E_{ai} 和 E_{bi} 随时间变化的波形。显然, 由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图显示出系统已被有效地控制在稳定的周期态(极限环)上; 而两波形图 4(b)和(c)分别显示出在 1.5 ms 后 E_{ai} 和 E_{bi} 随时间变化的轨迹, 由这些轨迹可以明显看出, 经过一个张弛振荡后(大约 0.5 ms), 混沌已被控制到稳定的周期态上。此后, 激光振荡次数是 13 ms^{-1} 。事实上, 当 β 取 0.28~3.1 rad 时都能有效地把激光混沌控制到稳定

的周期态上, 其控制下的激光振荡周期如表 2 所示。可以发现当 $\beta = 1.2$ rad 时, 有控制时的激光振荡周期最小, 当 $\beta = 3.1$ rad 时, 有控制时的激光振荡周期最大, 意味着激光稳定态即将出现, 因为此时相移已非常接近 $\beta = \pi$ rad 时的稳定态值。图 5 进一步给出 β 分别为 0.01 rad, 0.07 rad, 0.17 rad, 0.18 rad, 0.21 rad 和 0.23 rad 时的激光动力学特点[由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的相图], 它显示出非常丰富的物理现象, 而这样的现象是很难在其他激光系统中见到的。产生这些现象的主要原因有可能是激光对相移变化特别敏感, 但尚需作进一步的深入研究。

表 2 不同相移控制下混沌进入到周期态后的周期
Table 2 Periods with different phase shifts when chaos into periodic states

β /rad	0.28	0.35	0.4	0.5	0.6	0.9	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.1
Period /ms	1/13	1/15	1/17	1/19	1/20	1/20	1/21	1/20	1/15	1/9	0.4	2

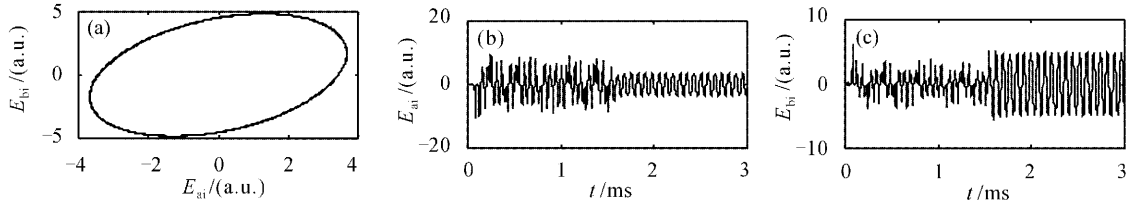


图 4 混沌被控制到周期态

Fig. 4 Chaos can be controlled into a periodic state

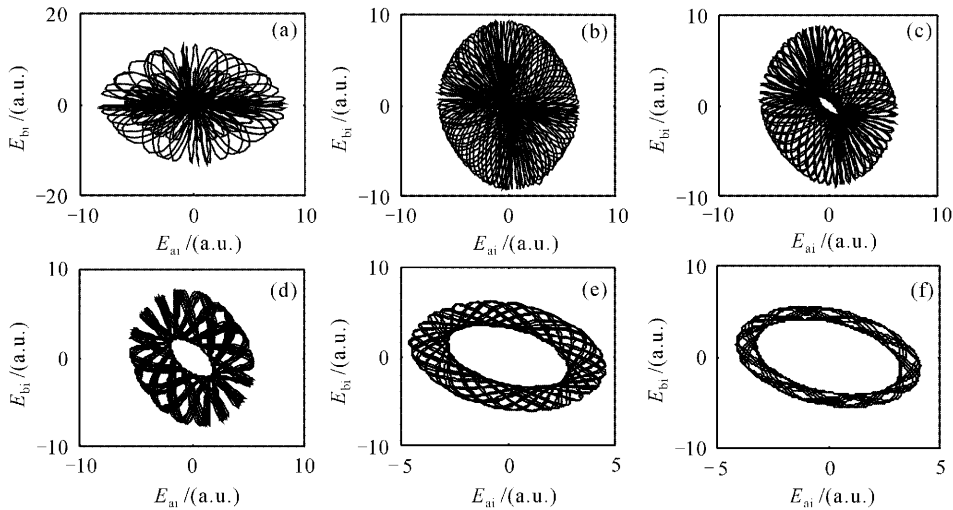


图 5 多样形式的相轨迹。(a)~(f)的 β 值分别取 0.01, 0.07, 0.17, 0.18, 0.21 和 0.23

Fig. 5 Different phase space orbits where β are 0.01, 0.07, 0.17, 0.18, 0.21 and 0.23 for (a)~(f), respectively

3.2 双相移控制

在进行双相移控制混沌研究时,就是让 α 和 β 的数值变化。控制时间选在 1.5 ms 时变化 α 和 β 的数值以控制混沌。图 6 表示有控制时 ($\alpha = \pi/2$ rad 和 $\beta = \pi/2$ rad) 的激光由混沌被控制到稳定态上的动力学行为过程。其中,由 (E_{ai}, E_{bi}) 构成的

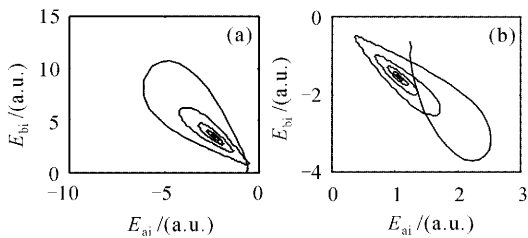


图 6 双相移控制混沌到稳定态。其中(a),(b)所取的初值不同

Fig. 6 Chaos can be controlled into stable states under dual-phase-shift controlling. Here are different starting values for (a) and (b), respectively

两相图[图 6(a)和(b)]分别显示出在 1.5 ms 后系统逐步向稳定态进入的动力学轨迹,并最终进入到稳定态上;由于两相图所取的初值不一样,它们分别是 $(-0.65i, 0.15i, 0.1, 0.1)$ 和 $(-0.65i, 1.2i, 0.1, 0.1)$, 所以由混沌进入稳定态的动力学行为过程变化也是不一样的(激光进入了不同的不动点)。进一步研究表明,当 $\alpha = -\pi/2$ rad 和 $\beta = -\pi/2$ rad 以及

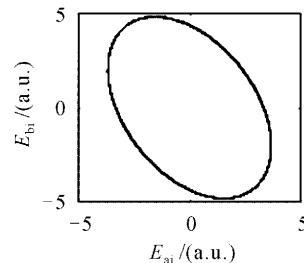


图 7 双相移控制混沌到周期态

Fig. 7 Chaos can be controlled into a periodic state under dual-phase-shift controlling

$\alpha = \pm\pi$ rad 和 $\beta = 0$ rad 时,混沌都能被有效地控制到其他稳定态上(其他的不动点)。

图 7 为双相移控制时($\alpha = \pi/30$ rad 和 $\beta = \pi/20$ rad)激光由混沌被控制到周期态(极限环)的动力学行为过程。由(E_{ai}, E_{bi})构成的相图显示出系统已被有效地控制在极限环上。而当 $\alpha = \pi/22$ rad 和 $\beta = \pi/22$ rad 时,混沌也能被控制到稳定态上。进一步研究表明, α 和 β 大约在 $\pi/22$ rad, $\pi/22$ rad 和

($\pi/2 \sim 0.1$) rad, ($\pi/2 \sim 0.1$) rad 区间,都可以有效地把混沌控制到周期态(极限环)(但具有不同的振荡周期)上。

图 8(a)~(f) 是当 α 和 β 分别取 $\pi/60$ rad 和 $\pi/60$ rad, $\pi/40$ rad 和 $\pi/40$ rad, $\pi/37$ rad 和 $\pi/42$ rad, $\pi/35$ rad 和 $\pi/35$ rad, $\pi/30$ rad 和 $\pi/30$ rad, $\pi/30$ rad 和 $\pi/24$ rad 时激光的相轨迹[由(E_{ai}, E_{bi})构成的相图],它又显示出新的物理现象。

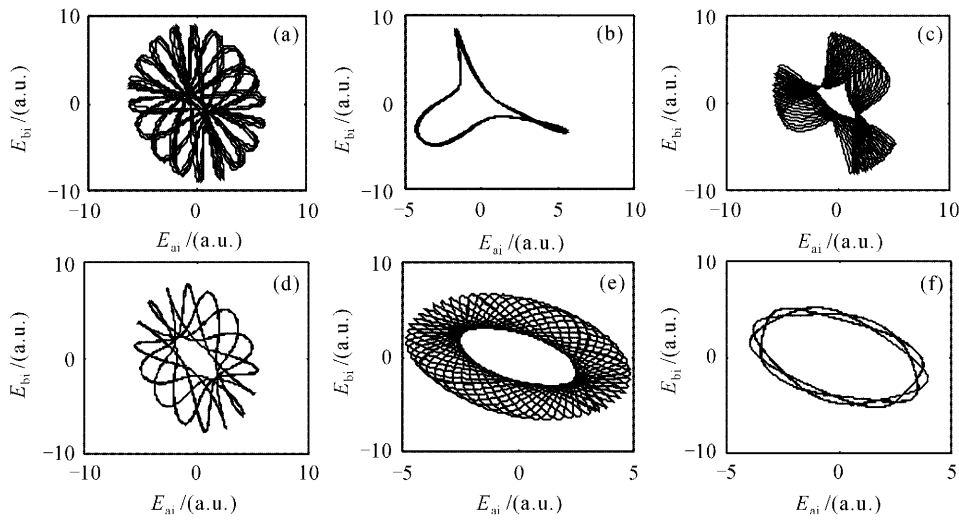


图 8 双相移控制下出现的多样相轨迹

Fig. 8 Different phase space orbits under dual-phase-shift controlling

4 结 论

提出了双环单模掺铒光纤激光器混沌的相移控制方法,该方法能有效地把混沌控制到稳定态和周期态上,而且可以实时变化相移动态地控制到混沌到稳定态和不同的振荡周期上,拓展了该激光器的应用范围。而激光展示出的物理现象,还要做进一步的深入研究。

参 考 文 献

- 1 E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke. Controlling chaos [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(11): 1196~1199
- 2 Luo Jiatong, Qian Jingren. Spectrum analysis of inner-phase-modulated optical fiber resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 231~235
罗家童,钱景仁. 激光输入光纤环形腔内相位调制输出功率谱分析 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 231~235
- 3 Lu Ling, Li Chengren. Direct chaotic system towards periodic oscillation solution based on perturbation amplitude. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 322~324
吕翎,李成仁. 扰动幅度引导混沌系统周期振荡解 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 322~324
- 4 Tan Zhongwei, Liu Yan, Fu Yongjun *et al.*. Analysis of chaotic phenomena in the fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 311~314
谭中伟,刘艳,傅永军等. 光纤激光器的混沌现象分析 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 311~314
- 5 Zhuang Jun, Tan Weihai. Unstability and chaos of a detuned two-mode homogeneously broadened laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9): 1185~1188
庄军,谭维翰. 双模含失谐均匀加宽激光的不稳定性与混沌 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(9): 1185~1188
- 6 Luo Liguang, Nie Dezhen. Chaos behaviours in dual coupled class-B laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1735~1737
罗利国,聂得真. 双耦合 B 类激光器的混沌动力学行为 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1735~1737
- 7 F. Sanchez, G. Stephan. General analysis of instabilities in erbium-doped fiber laser [J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **53**(3): 2110~2122
- 8 O. L. Williams, J. G. Ojalvo, R. Roy. Fast intracavity polarization dynamics of an erbium-doped fiber ring laser: inclusion of stochastic effects [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(3): 2376~2385
- 9 L. G. Luo, P. L. Chu. Optical secure communications with chaotic erbium-doped fiber lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(10): 2524~2530
- 10 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