

文章编号: 1001-4322(2008)04-0542-05

耦合反馈控制双环掺铒光纤激光器混沌^{*}

杨 磊, 潘 炜, 罗 斌, 周 志, 张伟利, 杨国标

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘 要: 提出双环掺铒光纤激光器耦合反馈控制混沌的物理模型,利用定向耦合器将系统的输出变量反馈到系统中,通过间接控制损耗系数,并选取适当的反馈系数,实现对系统混沌的控制。分析了反馈系数对激光器由混沌态进入周期态和稳定态的动力学行为的影响。数值模拟表明:改变系统损耗系数,双环掺铒光纤激光器可由周期态进入混沌态;加入耦合反馈,适当调制反馈系数,可以将双环光纤激光器混沌控制到周期态和稳定态上;提高系统反馈系数,系统进入稳定态的时间变短。选取不同的系统初值,激光器总能得到两种不同的奇怪吸引子,可见双环掺铒光纤激光器具有双稳态特征。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 混沌控制; 耦合反馈

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A

混沌是自然界中普遍存在的一种现象,虽然混沌是无规律性的,但是在实际应用中人们总是期望能够找到一些方法来控制混沌,将动态的、混沌的系统稳定到周期轨道上或使其保持在某个希望的平衡态上。20 世纪 90 年代,美国学者 Ott 等人提出了控制混沌的 OGY 法^[1],并在实验中成功实现了混沌控制,此后众多学者对不同激光混沌系统的控制方法进行了深入研究,在半导体激光器^[2-3]、CO₂ 激光器^[4]、固体激光器^[5]和光纤激光器^[6]中,通过周期调制参数以及加入光学反馈等方法实现了激光混沌系统的稳定控制^[6-7]。

激光混沌系统在保密通信研究领域有着很重要的应用价值^[8],近年来掺铒光纤激光器作为新型激光光源在光纤通信中得到了广泛应用,国内外研究人员从理论和实验上对掺铒光纤激光器的动力学行为进行了大量研究^[9-10]。由于铒离子的亚稳态寿命长达 1~10 ms,而且光纤芯掺杂浓度高,激光器可由连续工作状态(CW)过渡到自脉冲(self-pulsing)或者混沌状态(chaos)。Luo 和 Sanchez^[6,8-9]等人观察到此现象并建立了双环掺铒光纤激光器的理论模型,并进行了实验验证,实现了将混沌态控制到周期态和稳定态上。目前对掺铒光纤激光器混沌控制的相关报道,主要有延时反馈、相移和外部注入等方法^[11-13],但利用系统自身变量和定向耦合器进行混沌控制则更为方便有效。本文基于双环掺铒光纤激光器的理论模型,利用定向耦合器把系统的输出变量反馈到自身系统中,实现间接控制系统损耗系数,并通过调制反馈系数有效地控制混沌系统进入周期态和稳定态。

1 理论模型的扩展

1.1 双环掺铒光纤激光器的理论模型

双环掺铒光纤激光器结构如图 1 所示^[6]。由两个单环掺铒光纤激光器(a 和 b)经定向耦合器 C₀ 耦合而成。其中,WDM 为波分复用器,其作用一方面将泵浦光耦合进掺铒光纤,另一方面将激光腔内部分激光耦合到激光器外。

Luo 等人从铒离子的三能级速率方程出发,建立了单环单模掺铒光纤激光器的动力学方程^[6]。但在图 1 中,考虑到定向耦合器的特性,即光纤中的光场经定向耦合器耦合进入另一光纤中,光场会产生 $\pi/2$ 的相移,因此双环掺铒光纤激光器的动力学方程表示如下

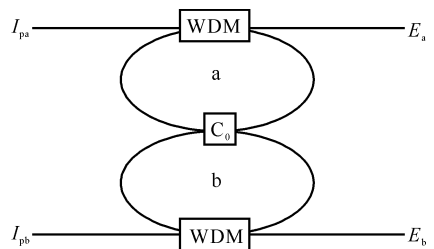


Fig. 1 Dual-ring erbium-doped fiber laser system
图 1 双环掺铒光纤激光器模型

$$\partial E_a / \partial \tau = -k_a (E_a + \eta_b E_b) + g_a E_a D_a \quad (1)$$

^{*} 收稿日期:2007-07-25; 修订日期:2008-03-04
基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20070613058)
作者简介:杨 磊(1981—),男,博士,从事光纤激光器和光通信研究; yanglei19811212@sohu.com。

$$\partial E_b / \partial \tau = -k_b (E_b - \eta_0 E_a) + g_b E_b D_b \tag{2}$$

$$\partial D_a / \partial \tau = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2) D_a + I_{pa} - 1 \tag{3}$$

$$\partial D_b / \partial \tau = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2) D_b + I_{pb} - 1 \tag{4}$$

式中： E_a, E_b 分别为 a 环和 b 环的归一化激光场强，可用 $\sqrt{2\tau_2 Bq}$ 表示， B 为激光器增益系数， q 为光子数量； D_a, D_b 为归一化反转粒子数，可用 N/N_t 表示， N 为反转粒子数， N_t 为各能级粒子数总和； I_{pa}, I_{pb} 为规格化泵浦光强，表示为 $\tau_2 \times W_p$ ，其中 W_p 为泵浦功率， τ_2 为 Er^{3+} 离子亚稳态寿命； $|E_a|^2, |E_b|^2$ 为激光光强； k_a, k_b 为损耗系数，表示为 τ_2/τ_c ，其中 τ_c 是光子衰减时间； g_a, g_b 为增益系数，可用 $\tau_2 V_p B N_t$ 表示， V_p 为发射或吸收体积； η_0 为定向耦合器对 $1.55 \mu m$ 波长光波的耦合系数； τ 为归一化时间， $\tau = t/\tau_2$ 。在需要实验验证时，可依据参考文献[6,9-10]中的方程推导和方程中各个参数详细定义来进行具体分析和取值。

两个单模环形掺铒光纤激光器通过定向耦合器把各自光场耦合到对方系统中，此时双环掺铒光纤激光器可由某定态进入到周期态和混沌态。图 2 给出了激光器 a 环在不同系统损耗系数下奇怪吸引子(strange attractor)在相平面 E_a-E_b 的投影。激光器归一化参数选取如下^[5-6]： $k_b = 1\ 000, g_a = 10\ 500, g_b = 4\ 600, \eta_0 = 0.2, I_{pa} = 4, I_{pb} = 4$ 。系统初值 E_a, E_b, D_a, D_b 分别为 $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ ， k_a 的取值分别为 930, 965, 983, 1 000。

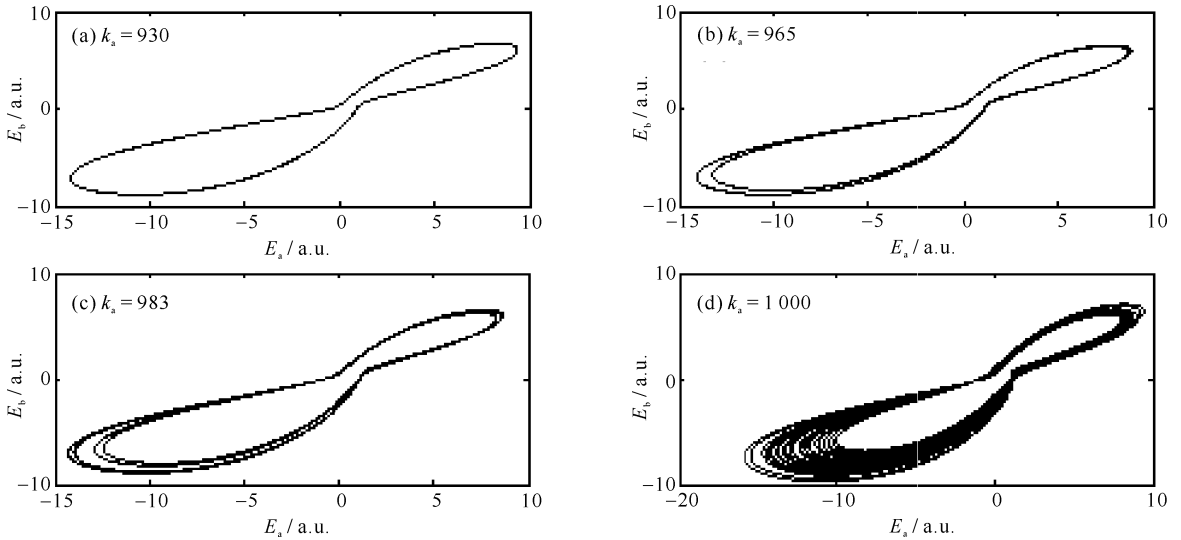


Fig. 2 System is controlled into periodic states and chaos

图 2 系统被控制到周期态和混沌态

由图 2(a), (b) 和 (c) 可以看出，随着 k_a 的变化，系统进入 1 周期态、2 周期态和 4 周期态；图 2(d) 表明系统进入混沌态。因此，利用双环掺铒光纤激光器的这种特点，可以有效地控制激光系统的混沌态，使其进入周期态和期望的稳定态上，这在构建光纤激光器混沌保密通信系统中有着重要意义。

1.2 耦合系数反馈法控制混沌

耦合反馈法控制双环掺铒光纤激光器混沌的模型如图 3 所示。在双环掺铒光纤激光器 a 环中加入耦合器 C_2 ，在 a 环和 b 环的输出激光场强中分别加入定向耦合器 C_1 和 C_3 ，并分别耦合出部分激光场强作为反馈信号，再通过耦合器 C_2 进入双环掺铒光纤激光器的 a 环，对系统进行混沌控制。

耦合器 C_1 和 C_2 控制 a 环输出反馈的强度，耦合器 C_2 和 C_3 控制 b 环输出反馈的强度。因为定向耦合器有 $\pi/2$ 的相移，故该反馈为负反馈。因此该系统的动力学方程表示如下

$$\partial E_a / \partial \tau = -k_a [E_a + \eta_0 E_b - (\beta_a E_a + \beta_b E_b)] + g_a E_a D_a \tag{5}$$

$$\partial E_b / \partial \tau = -k_b (E_b - \eta_0 E_a) + g_b E_b D_b \tag{6}$$

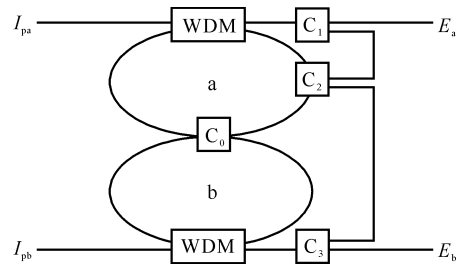


Fig. 3 Coupling feedback controlling scheme

图 3 耦合反馈控制双环掺铒光纤激光器模型

$$\partial D_a / \partial \tau = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2)D_a + I_{pa} - 1 \quad (7)$$

$$\partial D_b / \partial \tau = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2)D_b + I_{pb} - 1 \quad (8)$$

方程中, $\beta_a = C_1 C_2$, 为 a 环输出的反馈系数; $\beta_b = C_2 C_3$, 为 b 环输出的反馈系数。对比看出式(5)相比与式(1)多出一个控制信号: $-(\beta_a E_a + \beta_b E_b)$, 可以将其改写成 $-\beta_a (E_a + \eta E_b)$, 其中, $\eta = \beta_b - \beta_a$, 因此式(5)可改写为

$$\partial E_a / \partial \tau = -k_a [E_a + \eta E_b - \beta_a (E_a + \eta E_b)] + g_a E_a D_a \quad (9)$$

适当选取耦合系数 C_1 与 C_3 , 可使得 $\eta = \eta_0$, 则 $\beta_b = \eta_0 \beta_a$, 那么式(9)可写为

$$\partial E_a / \partial \tau = -k_a [E_a + \eta_0 E_b - \beta_a E_a - \beta_a \eta_0 E_b] + g_a E_a D_a \quad (10)$$

即

$$\partial E_a / \partial \tau = -k_a (1 - \beta_a) (E_a + \eta_0 E_b) + g_a E_a D_a \quad (11)$$

令 $k'_a = k_a (1 - \beta_a)$, 则式(11)为

$$\partial E_a / \partial \tau = -k'_a (E_a + \eta_0 E_b) + g_a E_a D_a \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 双环掺铒光纤激光器加入定向耦合器后, 利用自身输出变量耦合进入系统, 可以使损耗系数变为一个可变参量, 即 $k'_a = k_a (1 - \beta_a)$, 通过对方程(1)~(4)的数值分析看出, 损耗系数不同, 系统可以进入周期态和混沌态上, 那么通过调整 β_a 的值, 即可改变 k'_a 的值, 利用耦合反馈, 双环掺铒光纤激光器可由混沌态进入周期态, 因此, 通过调整反馈系数便可有效地实现混沌控制。

2 数值仿真

耦合反馈双环掺铒光纤激光器的系统参数选取归一化数值^[5-6]: $k_a = 1\ 000$, $k_b = 1\ 000$, $g_a = 10\ 500$, $g_b = 4\ 600$, $\eta_0 = 0.2$, $I_{pa} = 4$, $I_{pb} = 4$; 反馈系数分别选取 $\beta_a = 0.07$, $\beta_b = 0.014$; $\beta_a = 0.03$, $\beta_b = 0.006$; 系统初值为 $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ 。图 4 和图 5 表示系统混沌态被控制到周期态的动力学行为的过程。可以看出在两组不同反馈系数下时, 系统其它参数不变, 通过观察奇怪吸引子在相平面 E_a - E_b 的投影以及 E_a 和 E_b 相对应的时间序列, 可以看出混沌态被控制到 1 周期态和 2 周期态上。由于反馈系数是由耦合系数所确定的, 因此, 利用耦合反馈法在设计系统时, 合理设置耦合器的参数, 可以有效地控制系统状态。

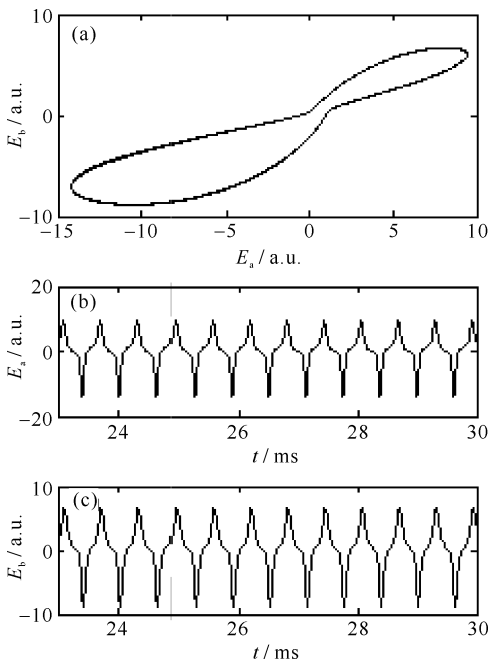


Fig. 4 Chaos is controlled into single-periodic states

图 4 控制混沌到 1 周期态

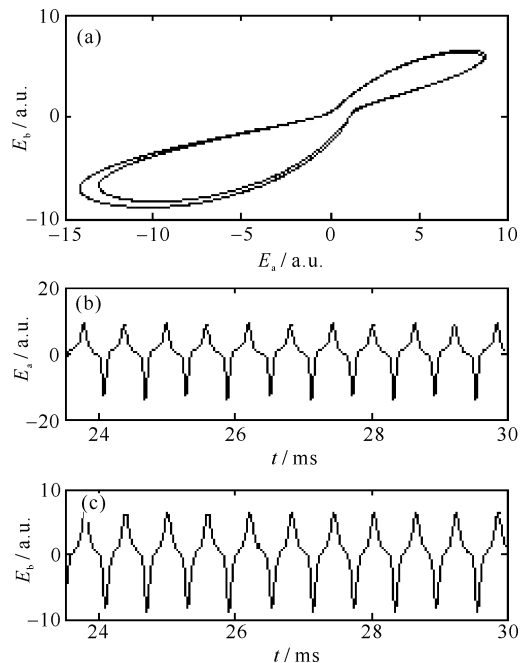


Fig. 5 Chaos is controlled into dual-periodic states

图 5 控制混沌到 2 周期态

在计算奇怪吸引子的过程中, 系统各个参数完全相同条件下, 选取不同的初始值会得到不同的吸引子。在初始值为 $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ 时, 得到的吸引子如图 2(b) 所示, 其为 2 周期相图; 初始值为 $(13.5, 13.5, 0.1, 0.1)$ 时得到的吸引子如图 6 所示。同为 2 周期相图, 但相轨迹不相同, 这是因为在所选的参数条件下, 系统有两个吸引域, 不同的初始值得到的吸引子在不同的吸引域内, 而且无论初始值如何选取, 总能得到这两种

吸引子。因此,对于系统处于周期态中,在所选参数相同的情况下,双环掺铒光纤激光器具有双稳态特征。图 7 为反馈系数与系统进入稳态时间的关系。系统初始值选取为(0.1, 0.1, 0.1, 0.1),反馈系数 β_a 分别取 0.30, 0.50, 0.65。从图中可以看出,系统经过一个短暂的张弛振荡过程后,混沌被控制到稳定态上,而且,反馈系数 β_a 越大,系统进入稳态的时间越快。在实际设计系统时,通过耦合反馈,选取适当的耦合系数控制反馈,可使混沌系统达到某个期望的平衡态上,并能控制达到平衡态的时间。

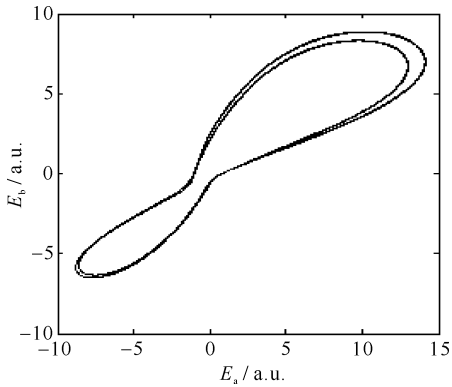


Fig. 6 Phase diagram of dual-periodic states

图 6 2 周期态相轨迹

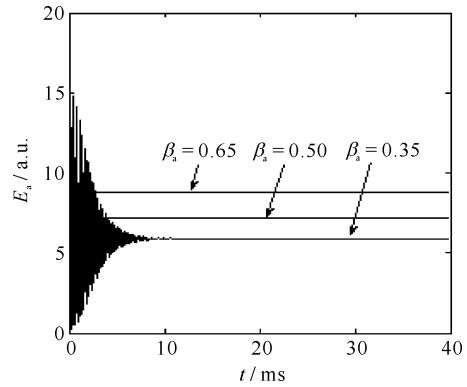


Fig. 7 Relationship between time of laser entering into stable state and feedback coefficient

图 7 反馈系数与系统进入稳态的时间的关系

3 结 论

本文根据改变双环掺铒光纤激光器的损耗系数可以控制混沌到周期态和稳定态的原理,提出了一种改进的混沌控制方法——耦合反馈法,给出了分析过程和数值仿真结果。该方法通过选取合适的耦合系数,可控制反馈系数,间接实现了系统衰减系数的调制,把激光器混沌态控制到周期态,同样也可以实现把混沌控制到稳定态;且增大反馈系数,双环掺铒激光器进入稳定态的时间缩短。由数值模拟结果可知,选取不同的系统初值,激光器总能得到两种不同的奇怪吸引子,可见双环掺铒光纤激光器具有双稳态特征。

参考文献:

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**(11):1196-1199.
- [2] Levy G, Hardy A A. Control and suppression of chaos in flared laser system: a numerical analysis[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1998, **34**(1):1-6.
- [3] Simmendinger C, Hess O. Controlling delay-induced chaotic behavior of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Phys Lett A*, 1996, **216**:97-105.
- [4] Labate A, Ciofini M, Meucci R. Controlling quasiperiodicity in a CO₂ laser with delayed feedback[J]. *Phys Rev E*, 1998, **57**(5):5230-5236.
- [5] Colet P, Braiman Y. Control of chaos in multimode solid state lasers by the use of small periodic perturbations[J]. *Phys Rev E*, 1996, **53**(1):200-206.
- [6] Luo L G, Tee T J, Chu P L. Chaotic behavior in erbium-doped fiber-ring lasers[J]. *Opt Soc Am B*, 1998, **15**(3):972-978.
- [7] 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. (Pan W, Zhang X X, Luo B, et al. Study of parameter for higher order bifurcation and chaos behavior of VCSELs control. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(11):1789-1792)
- [8] Luo L G, Chu P L, Liu H F. 1-GHz optical communication system using chaos in erbium-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(3):269-271.
- [9] Sanchez F, Boudec P L, Francois P L, et al. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers[J]. *Phys Rev A*, 1993, **48**(3):2220-2229.
- [10] Abarbanel H D I, Kennel M B, Buhl M, et al. Chaotic dynamics in erbium-doped fiber ring lasers[J]. *Phys Rev A*, 1999, **60**(3):2360-2374.
- [11] 王荣,沈柯. 延时线性反馈法控制双环掺铒光纤激光器混沌[J]. 物理学报, 2001, **50**(6):1024-1026. (Wang R, Shen K. Controlling chaotic behaviour in erbium-doped fiber dual-ring laser with linear time-delayed feedback. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(6):1024-1026)
- [12] 张胜海,杨华,钱兴中. 一种控制掺铒光纤激光器超混沌的方法-非线性延时反馈参数调制法[J]. 物理学报, 2004, **53**(11):3706-3708. (Zhang S H, Yang H, Qian X Z. A method for controlling hyperchaos of Er-doped fiber laser-nonlinear time-delay feedback modulating-pa-

parameter. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11):3706-3708)

- [13] 颜森林,何龙庆,吴海勇,等. 双环掺铒光纤激光器混沌相移控制方法研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(5):642-646. (Yan S L, He L Q, Wu H Y, et al. Studies on method of phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber lasers. *Chinese J Lasers*, 2005, **32**(5):642-646)
- [14] Myneni K, Barr T A. New method for the control of fast chaotic oscillations[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**(11):2175-2178.
- [15] 周志,潘炜,罗斌,等. 两种调制方式下主从激光器同步性能的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(8):1237-1241. (Zhou Z, Pan W, Luo B, et al. Theoretical analysis on synchronization performances of master-slave laser subjected to two modulation methods. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8):1237-1241)
- [16] 张伟利,潘炜,罗斌,等. 相位共轭反馈下垂直腔面发射激光器动态分岔特性的理论研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(5):632-636. (Zhang W L, Pan W, Luo B, et al. Theoretical analysis on dynamics and bifurcations characteristics of VCSELs with phase conjugate optical feedback. *Chinese J Lasers*, 2005, **32**(5):632-636)
- [17] 李孝峰,潘炜,罗斌,等. 多次外光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(12):1450-1454. (Li X F, Pan W, Luo B, et al. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedbacks. *Chinese J Lasers*, 2004, **31**(12):1450-1454)
- [18] 冯振中,陈建国,严地勇,等. 两个半导体激光器交叉注入的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(4):545-548. (Feng Z Z, Chen J G, Yan D Y, et al. Theory analysis of cross-injection locking of two diode laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):545-548)

Controlling chaotic behaviour in erbium-doped fiber dual-ring laser with coupling feedback

YANG Lei, PAN Wei, LUO Bin, ZHOU Zhi, ZHANG Wei-li, YANG Guo-biao

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

Abstract: A method of controlling chaotic behavior in erbium-doped fiber dual-ring laser is proposed by using couplers to feed the laser outputs back into the system and control the decay rate of the system indirectly. The chaotic fiber laser is controlled by selecting appropriate feedback coefficients which are defined by the decay rate and the coupling coefficient of the system. The simulation results show that couplers are used to modulate the decay rate and the feedback coefficient, and the chaotic fiber can be controlled into the single-period, dual-period and stable states respectively. The larger the feedback coefficients is, the faster the laser enters into a stable state.

Key words: Laser technology; Fiber laser; Chaos control; Coupling feedback