

# 双环掺铒光纤激光器混沌偏振控制方法研究

颜森林 何龙庆 吴海勇 王海军

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

**摘 要** 提出双环掺铒光纤激光器激光混沌的偏振耦合控制以及部分偏振控制方法, 偏振耦合控制能控制耦合相互作用以控制激光混沌, 部分偏振控制是控制部分偏振耦合效应以控制激光混沌. 数值模拟了偏振耦合控制混沌和某一个环的部分偏振控制混沌, 它们都能实现把双环掺铒光纤激光器激光混沌控制到稳定态和周期态上; 通过实时调控光的偏振方向, 这两种混沌控制方法都能实时地、动态地、有效地控制激光混沌进入到稳定态和周期态上.

**关键词** 混沌; 控制; 光纤; 激光器; 偏振

**中图分类号** O415.5 **文献标识码** A

## 0 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特性, 但其背后隐藏着有序的本质特点也逐渐被人们所发现. 其中许多混沌系统对模拟现实世界的不可预测现象是非常有用的. 近年来, 混沌现象在保密通信中显示了良好的应用前景. 但是混沌在许多情况下也有其不稳定的因素, 人们总是期望找到一些方法来控制混沌, 使其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, OGY<sup>[1]</sup> 方法提出后, 混沌控制方法迅速发展, 以后自适应控制方法、非线性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<sup>[2]</sup>.

近年来, 掺铒光纤作为新颖的激光光源和光放大器在光纤通信系统中得到了广泛的应用, 所以人们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<sup>[2~5]</sup>. 由于铒离子的亚稳态寿命长达 1~10ms 且光纤芯功率密度高, 激光器可以由连续工作状态过渡到自脉动或混沌状态, L. Luo 等人观察到了这种非线性动力学现象, 并建立了两耦合激光器的理论模型<sup>[6,7]</sup>. 光纤激光器混沌同步及其在保密通信中的应用研究已有报道<sup>[8~10]</sup>. 本文则研究光纤激光器混沌的另一个重要方面: 即混沌控制. 针对双环掺铒光纤激光器具有光耦合和光偏振的动力学特点, 提出双环掺铒光纤激光器激光混沌的偏振耦合控制以及部分偏振控制方法, 这两种方法都可以有效地把混沌控制到稳定态和周期态上, 并可

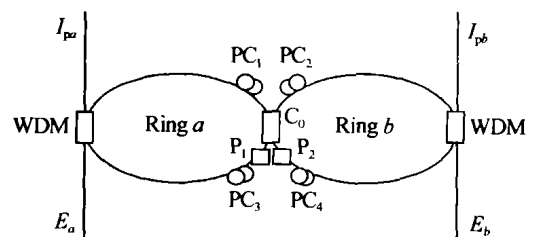
以实时动态控制混沌到稳定态和周期态上.

## 1 模型

单模双环掺铒光纤激光器激光的非线性动力学行为主要是由两激光场的偏振耦合和两激光场的实部和虚部的正交偏振的偏振耦合效应所产生的. 针对这一动力学特点, 提出混沌的偏振耦合控制方法和部分偏振控制方法. 这里首先进行偏振耦合控制方法研究, 然后再进行部分偏振控制方法研究.

### 1.1 偏振耦合控制

由于单模双环掺铒光纤激光器存在着 *a* 环和 *b* 环激光器的激光光场的偏振耦合, 所以可以进行混沌的偏振耦合控制. 图 1 是偏振耦合控制混沌的原理图, 其中,  $I_{pa}$  和  $I_{pb}$  是泵浦光;  $E_a$  和  $E_b$  分别是 *a* 环和 *b* 环的输出光场;  $C_0$  光是耦合器; WDM 是波分复用器;  $PC_1$ 、 $PC_2$ 、 $PC_3$  和  $PC_4$  是偏振控制器, 其中  $PC_1$  和  $PC_2$  分别控制 *a* 环和 *b* 环的光场,  $PC_3$  和  $PC_4$  分别控制进入耦合器的光场;  $P_1$  和  $P_2$  是检偏器, 仅让余弦分量光场进入耦合器. 其中  $PC_3$  和  $P_1$  以及  $PC_4$  和  $P_2$  组成混沌偏振控制光路. 这里通过调制偏振方向来控制混沌进入稳定态和周期态. 这样受偏振耦合控制的单模双环掺铒光纤激光器激光的非线性动力学行为可以有如下方程描述<sup>[6~8,10]</sup>



$I_{pa}$ ,  $I_{pb}$ : Pump light;  $C_0$ : Coupler; WDM: Wavelength division multiplexer;  $E_a$ ,  $E_b$ : Lasing fields output from ring *a* and ring *b*;  $PC_1$ ,  $PC_2$ ,  $PC_3$ ,  $PC_4$ : Polarization controllers;  $P_1$ ,  $P_2$ : Polarizers

图 1 偏振控制系统

Fig. 1 Polarization controlling scheme

$$(d/dt)E_a = -k_a(E_a - j\eta_0 E_b \cos \beta) + g_a E_a D_a \quad (1)$$

$$(d/dt)E_b = -k_b(E_b - j\eta_0 E_a \cos \beta) + g_b E_b D_b \quad (2)$$

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

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

该方程已归一化。其中,  $E_a, E_b$  分别是  $a$  环和  $b$  环激光器的激光光场强度;  $D_a, D_b$  分别是两激光器的反转粒子数;  $I_{pa}, I_{pb}$  分别是两激光器抽运参数;  $k_a, k_b$  分别是两激光器的损耗系数;  $\eta_0$  是光耦合器的耦合系数;  $g_a, g_b$  分别是两激光器的增益系数; 其中,  $\cos \beta$  是偏振控制项,  $\beta$  是两偏振控制器共同平行的方向。由于两检偏器仅让余弦分量光场通过, 所以这里主要的物理机制是控制激光光场的方向且仅让余弦偏振方向上的激光进入耦合器以达到控制偏振耦合。所以这里是通过调节控制偏振方向  $\beta$  的数值, 控制混沌进入稳定态和周期态的。

### 1.2 部分偏振控制

针对单模双环掺铒光纤激光器存在着两激光的实部和虚部的正交偏振耦合效应, 这里通过调节偏振控制方向进行混沌的部分偏振控制, 使混沌进入稳定态和周期态。其部分偏振控制结构和图 1 非常相似, 只是只有一个环上有偏振控制光路。如这里仅让  $b$  环上有偏振控制光路。这样受偏振控制的单模双环掺铒光纤激光器激光的非线性动力学行为可以有下列方程描述<sup>[6-8,10]</sup>

$$(d/dt)E_a = -k_a(E_a - j\eta_0 E_b \cos \alpha) + g_a E_a D_a \quad (5)$$

$$(d/dt)E_b = -k_b(E_b - j\eta_0 E_a) + g_b E_b D_b \quad (6)$$

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

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

其中,  $\cos \alpha$  偏振控制项,  $\alpha$  是偏振控制的角度。这里仅偏振控制  $b$  环激光器进入  $a$  环激光器的激光光场的偏振方向且仅让余弦分量上的光进入  $a$  环。但通过调节控制偏振控制方向  $\alpha$  的数值, 也可以控制混沌进入稳定态和周期态, 甚至进入多周期态。

## 2 数值模拟结果

单模双环掺铒光纤激光器在一定条件下可以经过倍周期分岔进入混沌<sup>[6-8,10]</sup>。数值模拟时系统参数可取归一化数值<sup>[6-8,10]</sup>:  $I_{pa} = I_{pb} = 4, k_a = k_b = 1000, \eta_0 = 0.2, g_a = 4800, g_b = 10500$ 。图 2 表示无控制时的单模双环掺铒光纤激光器激光的非线性动力学行为。其中,  $a$  图上的  $E_{ai}$  表示是  $a$  环的激光光场的虚部,  $E_{bi}$  表示是  $b$  环的激光光场的虚部, 由  $(E_{ai}, E_{bi})$  构成的相图显示出混沌双涡旋吸引子。而  $b$  和  $c$  图分别表示  $a$  环的激光光场的虚部  $E_{ai}$  和  $b$  环的激光光场的虚部  $E_{bi}$  随时间变化的轨迹。由于所取的初值不一样,  $E_{ai}$  和  $E_{bi}$  随时间变化的轨迹是不一样的, 其

根本的原因是由混沌对初值条件有极为敏感的特性所决定的。

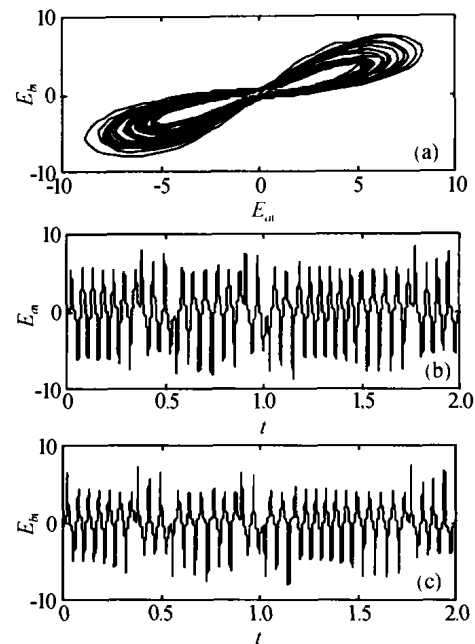


图 2 吸引子和波形  
Fig. 2 Chaotic attractor and waveform

### 2.1 偏振耦合控制结果

在进行偏振耦合控制混沌数值模拟时(对方程(1)~(4)数值积分), 控制时间选在 1 s 时变化  $\beta$  偏振控制方向去控制混沌。图 3 表示有偏振耦合控制时 ( $\beta = 89.94^\circ$ ) 的激光由混沌被控制到稳定态上的动力学行为过程。其中,  $a$  图表示由  $(E_{ai}, E_{bi})$  构成的相图显示出在 1 s 后系统已开始逐步向稳定态进入, 并最终稳定在稳定态上; 而  $b$  和  $c$  图分别表示在 1 s 后  $E_{ai}$  和  $E_{bi}$  随时间变化的轨迹, 它们非常明显出, 经过一个

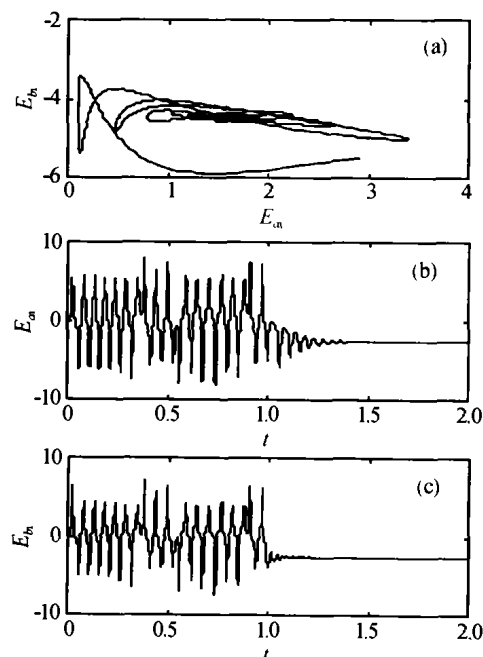


图 3 混沌被耦合偏振控制到稳定态, 其中  $\beta = 89.94^\circ$   
Fig. 3 Chaos is controlled into a stable state by the coupling-polarization with  $\beta = 89.94^\circ$

张弛振荡过程,混沌已被控制到稳定态上.

图 4 显示偏振耦合控制时( $\beta = 73.29^\circ$ )的激光由混沌被控制到周期态的动力学行为过程. 其中, a 图表示由( $E_{ai}, E_{bi}$ )构成的相图显示出系统已被有效地控制在极限环上;而 b 和 c 图分别表示在 1 s 后  $E_{ai}$  和  $E_{bi}$  随时间变化的轨迹,它们非常明显出,经过一个短暂的张弛振荡后,混沌已被控制到稳定的周期态上. 需要指出是,当取不同的初值,混沌可以被控制到另外一个稳定的周期态上,其数值结果如图 5. 显然这一特点是和混沌对初值具有敏感特性所决定的.

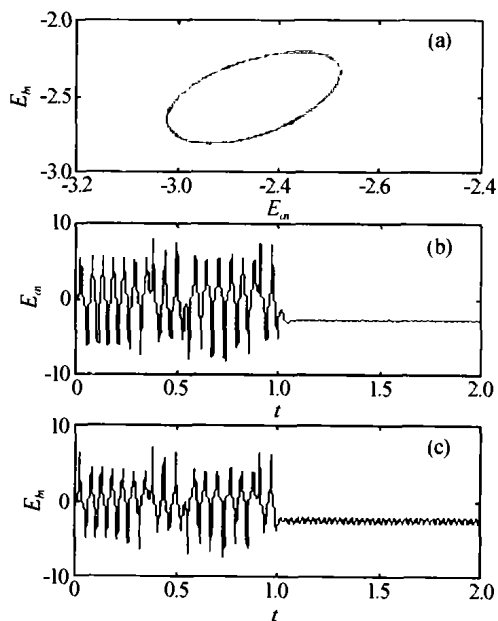


图 4 混沌被耦合偏振控制到周期态,其中  $\beta = 73.29^\circ$   
Fig. 4 Chaos is controlled into a period state by the coupling-polarization with  $\beta = 73.29^\circ$

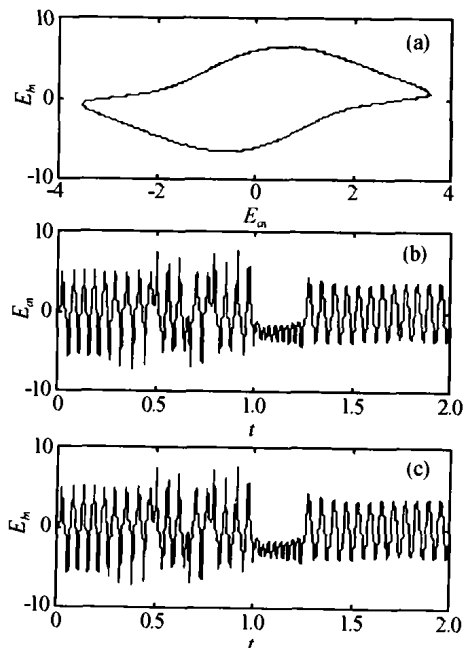


图 5 混沌被耦合偏振控制到另一个周期态,其中  $\beta = 73.29^\circ$   
Fig. 5 Chaos is controlled into a another period state by the coupling-polarization with  $\beta = 73.29^\circ$

## 2.2 部分偏振控制结果

在进行部分偏振控制混沌数值模拟时(对式(5)~(8)数值积分),控制时间选在 1 s 时变化偏振控制的方向以控制混沌. 图 6 表示有偏振控制时( $\alpha = 45^\circ$ )的激光由混沌被控制到稳定态上的动力学行为过程的. 其中,图 6(a)表示由( $E_{ai}, E_{bi}$ )构成的相图显示出系统在 1 s 后系统已开始逐步向稳定态进入,并最终进入到稳定态上;而图 6(b)、(c)分别表示在 1 s 后  $E_{ai}$  和  $E_{bi}$  随时间变化的轨迹,由图中可以看出,经过一个张弛振荡过程,混沌已被控制到稳定态上.

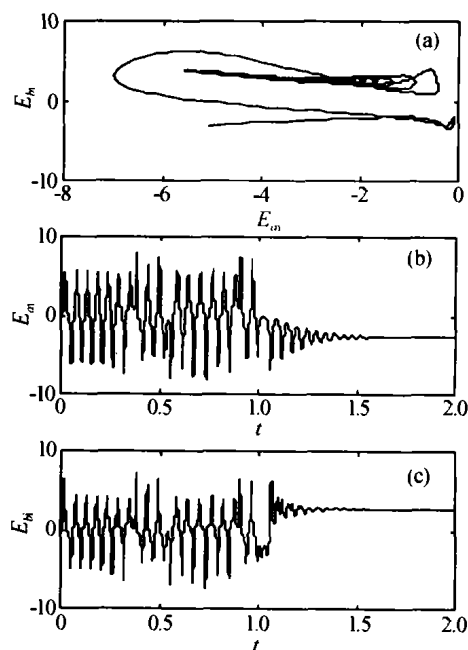


图 6 混沌被部分偏振控制到稳定态,其中  $\alpha = 45^\circ$   
Fig. 6 Chaos is controlled into a stable state by the fractional-polarization with  $\alpha = 45^\circ$

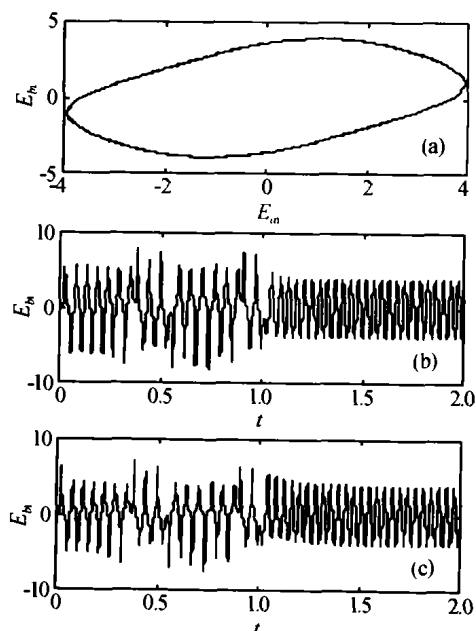


图 7 混沌被部分偏振控制到周期态,其中  $\alpha = 30^\circ$   
Fig. 7 Chaos is controlled into a period state by the fractional-polarization with  $\alpha = 30^\circ$

图7显示部分偏振控制时( $\alpha = 30^\circ$ )的激光由混沌被控制到周期态的动力学行为过程. 其中,图7(a)表示由( $E_{a_i}, E_{b_i}$ )构成的相图显示出系统已被有效地控制在极限环上;而图7(b)、(c)分别表示在1 s后  $E_{a_i}$  和  $E_{b_i}$  随时间变化的轨迹,它们非常明显,经过一个短暂的张弛振荡后,混沌已被控制到稳定的周期态上. 类似图5,当取不同的初值,混沌也可以被控制到另外一个稳定的周期态上.

### 3 结论

本文提出了单模双环掺铒光纤激光器激光混沌的偏振耦合控制以及部分偏振控制方法,这两种混沌控制方法都能有效地把混沌控制到稳定态和周期态上,而且可以动态控制混沌到稳定态和周期态上. 另外,偏振耦合控制也可以分别控制两偏振控制器方向,部分偏振控制也可以控制由  $a$  环进入  $b$  环的激光偏振态进行混沌控制. 总的看来,偏振控制方法的确可以有效地控制混沌.

#### 参考文献

- Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**(11): 1196 ~ 1199
- 夏江珍, 蔡海文, 任虹, 等. 全光纤调  $Q$  掺铒光纤激光器的脉冲研究. *光子学报*, 2002, **31**(8): 989 ~ 992  
Xia J Z, Cai H W, Ren H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 989 ~ 992
- 冉曾令, 饶云江, 朱涛, 等. 基于新型长周期光纤光栅的掺铒光纤放大器. *光子学报*, 2003, **32**(1): 72 ~ 75

- Ran Z L, Rao Y J, Zhu T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 72 ~ 75
- 谭中伟, 刘艳, 傅永军, 等. 光纤激光器的混沌现象分析. *中国激光*, 2003, **30**(4): 311 ~ 314  
Tan Z W, Liu Y, Fu Y J, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(4): 311 ~ 314
- 周亚训, 聂秋华, 徐铁峰, 等. 碲基掺铒光纤放大器增益饱和特性的数值模拟. *光子学报*, 2003, **32**(6): 679 ~ 682  
Zhou Y X, Nie Q H, Xu T F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 679 ~ 682
- Sanchez F, Stephan G. General analysis of instabilities in erbium-doped fiber laser. *Phys Rev E*, 1996, **53**(3): 2110 ~ 2122
- Williams O L, Ojalvo J G, Roy R. Fast intercavity polarization dynamics of an erbium-doped fiber ring laser: inclusion of stochastic effects. *Phys Rev A*, 1997, **55**(3): 2376 ~ 2385
- Luo L G, Chu P L. Optical secure communications with chaotic erbium-doped fiber lasers. *J Opt Soc Am B*, 1998, **15**(1): 2524 ~ 2530
- 罗李国, 聂得真. 双耦合 B 类激光器的混沌动力学行为. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1735 ~ 1737  
Luo L G, Nie D Z. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(15): 1735 ~ 1737
- Wang R, Shen K. Synchronization of chaotic systems modulated by another chaotic system in an erbium-doped fiber dual-ring laser system. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, **37**(8): 960 ~ 963

## Studies on Methods of Polarization Controlling Chaos in Dual-ring Er-doped Fiber Lasers

Yan Senlin, He Longqing, Wang Haijun, Wu Haiyong

Department of physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017

Received date: 2004-01-05

**Abstract** Methods of chaos controlled with coupling-polarization and fractional-polarization are presented. The coupling-polarization controlling can control the coupling interaction to control chaotic lasing, and the fractional-polarization controlling can control the fractional coupling polarization effect to control chaotic lasing. Numerically simulations illustrate that chaos laser can be controlled into stable states and periodic states by parallel adjusting the direction of the two coupling-polarization, or adjusting the direction of the fractional-polarization of a ring in dual-ring erbium-doped fiber. The methods can be real-time dynamically effectively control chaotic lasing into stable states and periodic states by adjusting real-time optical polarization angle.

**Keywords** Chaos; Control; Optical fiber; Laser; Polarization

**Yan Senlin** was born in 1962 in Jiangsu Province, China. He received the B. S. degree from the Department of Physics, Nanjing Normal University in 1983, the M. S. degree from the Department of Physics, Jiangxi Normal University in 1995 and Ph. D. degree from the Department of Technology and Engineering, Southeast University in 2001, respectively. He is now an associate professor in Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College. His interests of research are optical fiber secure communication, chaos, nonlinear optics and laser.