

文章编号: 1001-4322(2011)05-1239-06

# 双环掺铒光纤激光器混沌双环反馈相移控制方法\*

吴 飞<sup>1</sup>, 贾 莉<sup>1</sup>, 吴朝霞<sup>2</sup>, 邝敏敏<sup>1</sup>, 孙雅茜<sup>1</sup>, 李 勇<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学(秦皇岛分校) 自动化系, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 基于单模双环掺铒光纤激光器混沌反馈相移控制方法和物理模型, 分别对两种单环反馈相移的物理模型作了讨论。利用耦合器将系统的输出量反馈到系统中, 选取适当的反馈系数, 并在反馈通道上加入相移控制器控制反馈光的相移, 通过对反馈系数和反馈光相移的控制可以有效地控制激光输出的混沌态、稳定态和周期态。在此基础上, 对激光器双环反馈相移控制方法作了详细分析, 研究了反馈系数和反馈相移对单模双环掺铒光纤激光器激光混沌双环反馈相移控制模型的影响, 并得到一定的规律。

**关键词:** 掺铒光纤激光器; 混沌控制; 单环反馈相移; 双环反馈相移

**中图分类号:** TN25 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20112305.1239

自 20 世纪 OGY 方法<sup>[1]</sup>提出后, 混沌同步和混沌控制理论得到统一, 混沌理论得以迅速发展, 混沌系统的控制方法和实现对混沌系统中某个不稳定周期轨道控制在某个希望的平衡态上或稳定控制引起了众多学者的关注。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和混沌控制方面都进行了大量研究<sup>[2-9]</sup>。2005 年, 颜森林等人首次提出了相移控制和偏振控制方法<sup>[5-6]</sup>, 并通过仿真实验, 得到了某几个数值点能够实现混沌的情况; 2008 年, 杨磊等人提出了反馈控制的方法<sup>[7]</sup>, 该方法利用定向耦合器将系统的输出变量反馈到系统中, 并选取适当的反馈系数, 实现了对系统混沌的控制; 同年, 颜森林等人又提出外部注入等方法<sup>[8]</sup>, 此方法能控制激光到单周期态、双周期态以及多种高周期态。诸多方法中, 利用系统本身输出和定向耦合器构成的耦合反馈相移控制方法进行混沌控制更为方便有效, 目前我们已对该方法中单环反馈相移的控制方法做了一定的研究, 通过对反馈系数和反馈相移的控制有效地控制激光的输出到混沌态、稳定态和周期态, 并分析了系统输出状态随着控制参数变化的演化规律<sup>[9-10]</sup>。在此基础上, 我们对双环反馈相移控制方法作了进一步讨论, 分析了 4 个控制参数在整个定义域上取值时系统的输出状态, 分析了系统输出状态的演变规律, 实现了对双环掺铒光纤激光混沌系统的多参数控制。

## 1 理论模型

单模双环掺铒光纤激光器的非线性动力学行为主要是由两环激光器激光的耦合项的非线性耦合效应产生的。针对这一动力学特性, 结合考虑其双环的结构特点和由此产生的双环光场相互影响的作用, 提出激光混沌耦合反馈相移控制方法。双环掺铒光纤激光器双环反馈相移的控制模型如图 1 所示。在激光器 a 环和 b 环的输出激光场强中分别加入耦合器 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub>, 将两环输出的部分激光场强作为反馈信号, 再通过耦合器 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 进入双环掺铒光纤激光器的 a 环, 并在两个反馈通道上加入相移控制器, 控制反馈光的相移。相移控制器可以采用目前光纤通信中常用的电光相位调制器, 如 LiNbO<sub>3</sub> 晶体、GaAs 晶体及 LiTaO<sub>3</sub> 晶体等。通过直接控制电光相位调制器的外调制电压, 控制反馈量光场的相移。

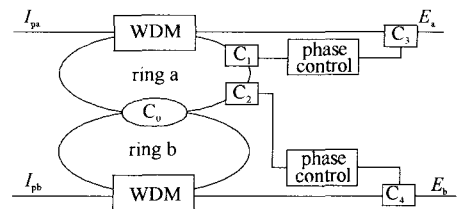


Fig. 1 Model of dual-ring erbium-doped fiber lasers controlled by double-ring feedback phase-shift

图 1 双环掺铒光纤激光器双环反馈相移控制模型

由双环掺铒光纤激光器的动力学方程<sup>[10-12]</sup>可得到双环掺铒光纤激光器混沌双环反馈相移控制方法的模型

$$dE_a/dt = -k_a[E_a - j\eta_0 E_b + \eta_a E_a \exp(j\varphi_a) + \eta_b E_b \exp(j\varphi_b)] + g_a E_a D_a \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-08-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(N090223001); 河北自然科学基金项目(Fz010001309)

作者简介: 吴 飞(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向包括光纤光栅传感及其解调技术、光纤激光器、混沌系统的控制; ysu-Fiber@163.com。

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

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

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

式中:  $I_{pa}$  和  $I_{pb}$  分别为 a 环和 b 环的泵浦光强;  $E_a$  和  $E_b$  分别是 a 环和 b 环的归一化输出激光场强;  $k_a$  和  $k_b$  分别为两激光器的损耗系数;  $\eta_0$  为定向耦合器  $C_0$  的耦合系数;  $g_a$  和  $g_b$  分别为 a 环和 b 环的增益系数;  $D_a$  和  $D_b$  为归一化反转粒子数;  $\eta_a$  为激光器 a 环反馈量的反馈系数,  $\eta_a = \eta_1 \eta_3$ , 其中  $\eta_1, \eta_3$  为耦合器  $C_1, C_3$  的耦合系数;  $\eta_b$  为激光器 b 环反馈量的反馈系数,  $\eta_b = \eta_2 \eta_4$ ;  $\varphi_a$  为 a 环到 a 环的反馈通道上相移控制器产生的相移;  $\varphi_b$  为 b 环到 a 环的反馈通道上相移控制器产生的相移。

由式(1)可见, 双环掺铒光纤激光器加入反馈相移控制环节后, 通过对 4 个参数  $\varphi_a, \eta_a$  和  $\varphi_b, \eta_b$  的控制就可以改变系统的输出状态, 从而实现双环掺铒光纤激光器的混沌控制。4 个参数同时作用于系统, 系统输出状态的变化较复杂, 为了讨论 4 个参数对系统的控制作用, 通过先对 a 环反馈到 a 环反馈相移控制和 b 环反馈到 a 环反馈相移控制这两种单环反馈的情况进行分析, 得到单环反馈情况下系统的输出状态, 再综合讨论 4 个参数对系统的控制作用, 从而得到双环反馈的情况。

## 2 分析与实验仿真

### 2.1 单环反馈相移控制模型

#### 2.1.1 单环自反馈相移控制模型

双环掺铒光纤激光器 b 环的反馈系数  $\eta_b$  为 0, 此时系统的控制模型为单环耦合自反馈相移控制模型, 如图 2 所示。激光器 a 环的反馈量只有  $E_a$ , 系统的动力学方程中式(1)发生改变, 根据自反馈模型推导得到其动力学方程为

$$dE_b/dt = -k_a[E_a - j\eta_0 E_b + \eta_a E_a \exp(j\varphi_a)] + g_a E_a D_a \quad (5)$$

由式(5)可见, 通过对双环掺铒光纤激光器 a 环反馈相移  $\varphi_a$  和反馈系数  $\eta_a$  的控制就可以有效地调节系统的输出状态, 从而实现混沌控制。

为了得到双环掺铒光纤激光器 a 环反馈相移  $\varphi_a$  和反馈系数  $\eta_a$  在整个定义域上变化时系统的输出状态, 固定反馈系数, 调节反馈相移。例如, 调节反馈系数使  $\eta_a = 0.2$  不变, 反馈相移  $\varphi_a$  在区间  $(0, 2\pi)$  上变化, 系统输出状态的变化规律如图 3 所示。  $\varphi_a = 0$  时, 系统的输出是混沌态, 如图 3(a) 所示; 系统在  $\varphi_a = 0.21$  处进入单周期态, 如图 3(b) 所示;  $0.21 < \varphi_a < 2.89$  时, 系统一直保持单周期态; 系统在  $\varphi_a = 2.90$  处又进入混沌态, 如图 3(c) 所示; 系统在  $2.90 < \varphi_a < 3.42$  时, 呈现出如图 3(d) 和 (e) 的多样态; 经过一段丰富变化的多样态后, 系统在  $\varphi_a = 3.42$  处又进入单周期态, 如图 3(f) 所示;  $3.42 < \varphi_a < 6.09$  时, 系统一直保持单周期态; 在  $\varphi_a = 6.09$  处, 系统又进入混沌态, 一直到  $\varphi_a = 6.28$  为止, 系统一直保持在混沌态, 如图 3(g), 3(h) 和 3(i) 所示。

反馈系数  $\eta_a$  取不同值, 反馈相移  $\varphi_a$  在 0 到  $2\pi$  区间变化时, 激光器输出状态的变化趋势亦与  $\eta_a = 0.2$  时大致相同, 输出状态演化过程亦经过混沌态、多样态、单周期态、多样态、混沌态。反馈系数取不同值, 反馈相移在整个定义域上变化时系统的输出状态如表 1 所示。从表 1 可以看出,  $\eta_a = 0.3$  是系统输出状态的一个转折点:  $\eta_a < 0.3$  时, 系统每次进入混沌态所需  $\varphi_a$  越来越大;  $\eta_a \geq 0.3$  时, 系统每次进入单周期态所需  $\varphi_a$  越来越小; 而  $0.2 < \eta_a < 0.3$  范围内  $\eta_a = 0.2900, 0.2990$  和  $0.2999$  的细分就是为了说明这一问题。

以反馈系数  $\eta_a$  为半径, 结合表 1 可画出系统进入单周期态和混沌态时  $\varphi_a$  与  $\eta_a$  的关系, 如图 4 所示。由图 4 可看出, a 环的反馈系数  $\eta_a$  和反馈相移  $\varphi_a$  对系统输出的混沌态和单周期态的影响是不一样的。反馈系数  $\eta_a$  较小, 即图 4 中圆半径较小时, 系统输出状态中单周期态占绝大部分, 随着反馈系数  $\eta_a$  的增加, 系统输出状态中混沌态所占整个定义域区间的比例也越来越大。

从图 4 可以清楚地看到系统的混沌态区间和单周期态区间, 结合表 1 还可知进入混沌态区间和单周期态区间的点, 所以适当地选取  $\eta_a$  和  $\varphi_a$  就可以有效地控制系统的混沌态和单周期态。综合图 4 中的白色区域和阴影区域还可知: a 环的反馈系数  $\eta_a$  和反馈相移  $\varphi_a$  对系统混沌态输出的影响是比较大的。要想得到所需要的混沌态时, 只需适当调节 a 环的反馈系数  $\eta_a$  和反馈相移  $\varphi_a$  即可。

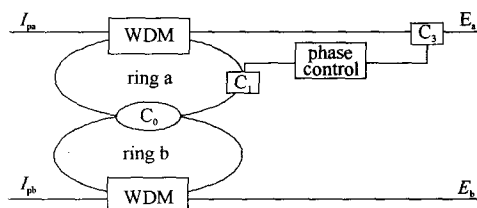


Fig. 2 Model of dual-ring erbium-doped fiber lasers controlled by self-feedback phase-shift

图 2 双环掺铒光纤激光器单环自反馈相移控制模型

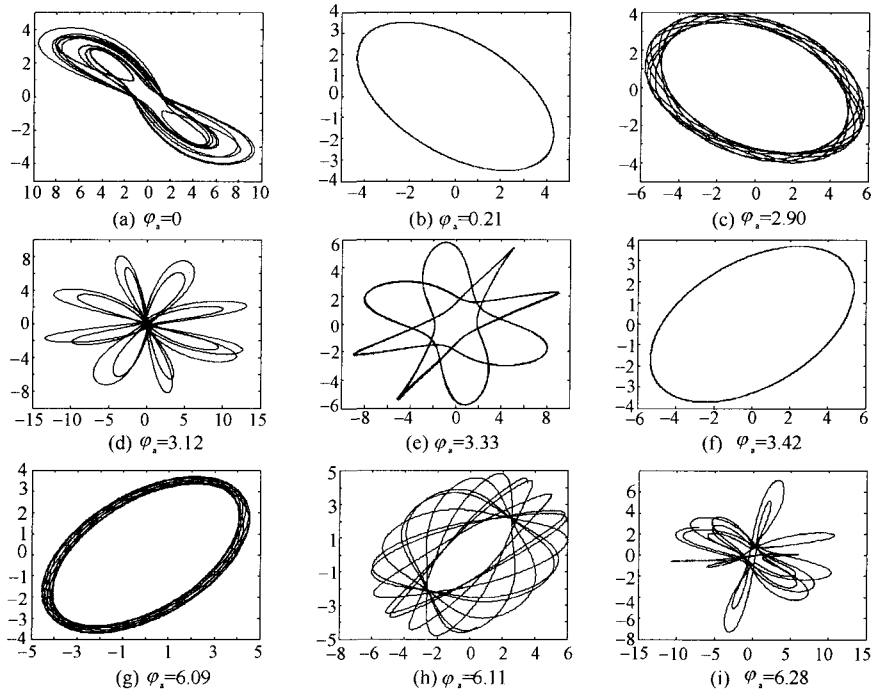


Fig. 3 Variation of system output for feedback coefficient  $\eta_b$  at 0.2 with feedback phase-shift  $\varphi_a$

图 3 反馈系数  $\eta_b=0.2$  不变, 反馈相移  $\varphi_a$  在区间  $(0, 2\pi)$  上变化, 系统输出的变化规律

表 1 相移反馈量  $\varphi_a$  和反馈系数  $\eta_a$  对系统的控制作用

Table 1 Control effect of system corresponding to different feedback phase-shift  $\varphi_a$  and different feedback coefficient  $\eta_a$

$\eta_a$	system output state as $\varphi_a=0$	interval of		interval of		interval of		interval of	
		multipli- city	single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state
0.040 0	multiplicity	—	—	—	—	—	—	—	—
0.050 0	multiplicity	(0, 1.27)	(1.27, 1.83)	(1.83, 4.47)	(4.47, 5.03)	(5.03, $2\pi$ )	—	—	—
0.100 0	multiplicity	(0, 0.47)	(0.47, 2.63)	(2.63, 3.69)	(3.69, 5.83)	(5.83, $2\pi$ )	—	—	—
0.200 0	multiplicity	(0, 0.21)	(0.21, 2.90)	(2.90, 3.42)	(3.42, 6.09)	(6.09, $2\pi$ )	—	—	—
0.290 0	multiplicity	(0, 0.14)	(0.14, 2.99)	(2.99, 3.31)	(3.31, 4.31)	(4.31, 5.64)	(5.64, 6.16)	(6.16, $2\pi$ )	—
0.299 0	multiplicity	(0, 0.13)	(0.13, 3.00)	(3.00, 3.30)	(3.30, 4.28)	(4.28, 5.68)	(5.68, 6.17)	(6.17, $2\pi$ )	—
0.299 9	multiplicity	(0, 0.14)	(0.14, 3.00)	(3.00, 3.30)	(3.30, 4.27)	(4.27, 5.68)	(5.68, 6.17)	(6.17, $2\pi$ )	—
0.300 0	multiplicity	(0, 0.12)	(0.12, 0.63)	(0.63, 2.05)	(2.05, 2.99)	(2.99, 3.31)	(3.31, 6.18)	(6.18, $2\pi$ )	—
0.400 0	multiplicity	(0, 0.08)	(0.08, 0.39)	(0.39, 2.27)	(2.27, 3.08)	(3.08, 3.23)	(3.23, 4.06)	(4.06, 5.93)	(5.93, 6.22)
0.500 0	multiplicity	(0, 0.06)	(0.06, 0.27)	(0.27, 2.37)	(2.37, 3.94)	(3.94, 6.04)	(6.04, 6.23)	(6.23, $2\pi$ )	—
0.600 0	single-period	—	(0, 0.19)	(0.19, 2.44)	(2.43, 3.88)	(3.88, 6.10)	(6.10, 6.25)	(6.25, $2\pi$ )	—
0.700 0	single-period	—	(0, 0.13)	(0.13, 2.45)	(2.45, 3.85)	(3.85, 6.17)	(6.17, 6.26)	(6.26, $2\pi$ )	—
0.800 0	single-period	—	(0, 0.09)	(0.09, 2.45)	(2.45, 3.86)	(3.86, 6.20)	(6.20, 6.26)	(6.26, $2\pi$ )	—
0.900 0	single-period	—	(0, 0.06)	(0.06, 2.45)	(2.45, 3.86)	(3.86, 6.22)	(6.22, $2\pi$ )	—	—
1.000 0	single-period	—	(0, 0.04)	(0.04, 2.42)	(2.42, 3.88)	(3.88, 6.23)	(6.23, $2\pi$ )	—	—

2.1.2 单环互反馈相移控制模型

双环掺铒光纤激光器 a 环的反馈系数  $\eta_a=0$ , 系统的控制模型如图 5 所示, 激光器 a 环的反馈量只有  $E_b$ , 系统的动力学方程中式(1)发生改变, 根据互反馈模型推导可得到系统的动力学方程为

$$dE_a/dt = -k_a[E_a - j\eta_b E_b + \eta_b E_b \exp(j\varphi_b)] + g_s E_s D_a \tag{6}$$

由式(6)可见, 互反馈模型对双环掺铒光纤激光器的混沌控制可以通过对反馈相移  $\varphi_b$  和反馈系数  $\eta_b$  的调节来实现。双环掺铒光纤激光器单环耦合反馈相移控制方法中  $\eta_a=0$  的情况我们已经讨论过<sup>[11]</sup>, 但仅限于  $\eta_b$  在  $(0, \pi)$  范围内的情况。为了更好地说明反馈相移控制方法的有效性, 把反馈相移  $\eta_b$  的范围扩大到  $(0, 2\pi)$  区间。

现同时控制反馈相移  $\varphi_b$  和反馈系数  $\eta_b$  两个参数: 让  $\eta_b$  取一固定值, 改变  $\varphi_b$  的值从 0 变化到  $2\pi$ , 在此变

化过程中,观察系统的输出状态。取一定步长,让  $\eta_b$  从 0 变化到 1,重复此步骤,得到如表 2 所示的结果。

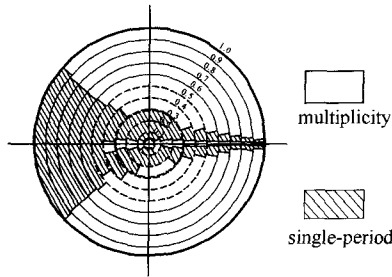


Fig. 4 Relation schema between  $\eta_b$  and  $\phi_a$  corresponding to feedback coefficient  $\eta_b$  at zero

图 4 反馈系数  $\eta_b=0$  时,  $\eta_b$  和  $\phi_a$  的关系图

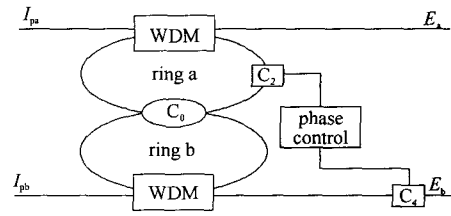


Fig. 5 Model of dual-ring erbium-doped fiber laser controlled by inter-feedback phase-shift

图 5 双环掺铒光纤激光器单环反馈相移控制模型

表 2 相移反馈量  $\phi_b$  和反馈系数  $\eta_b$  对系统的控制作用

Table 2 Control effect of system corresponding to different phase-shift  $\phi_b$  and different feedback coefficient  $\eta_b$

$\eta_b$	system output state as $\phi_b=0$	interval of single periodic state		interval of multiplicity		interval of single periodic state		interval of multiplicity	
		single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state	interval of multiplicity	single periodic state	interval of multiplicity
0.044	multiplicity	—	(0, 2 $\pi$ )	—	—	—	—	—	—
0.045	multiplicity	—	(0, 2 $\pi$ )	—	—	—	—	—	—
0.046	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 0.29)	(0.29, 2.86)	(2.86, 3.27)	(3.27, 6.16)	—	—	—
0.050	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 0.67)	(0.67, 2.59)	(2.59, 3.55)	(3.55, 5.88)	—	—	—
0.060	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 0.86)	(0.86, 2.30)	(2.30, 3.88)	(3.88, 5.56)	—	—	—
0.070	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 1.02)	(1.02, 2.13)	(2.13, 4.24)	(4.24, 5.37)	—	—	—
0.080	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 1.14)	(1.14, 2.02)	(2.02, 4.42)	(4.42, 5.01)	—	—	—
0.090	multiplicity	(0, 0.01)	(0.01, 1.22)	(1.22, 1.93)	(1.93, 4.55)	(4.55, 4.88)	—	—	—
0.100	single-period	—	(0, 1.29)	(1.29, 1.57)	(1.57, 1.58)	(1.58, 1.87)	(1.87, 4.62)	(4.62, 4.81)	(4.81, 2 $\pi$ )
0.200	multiplicity	(0, 0.06)	(0.06, 6.23)	(6.23, 2 $\pi$ )	—	—	—	—	—
0.300	multiplicity	(0, 0.02)	(0.02, 2 $\pi$ )	—	—	—	—	—	—
0.400	multiplicity	(0, 0.02)	(0.02, 2 $\pi$ )	—	—	—	—	—	—

根据表 2 呈现的规律可绘出系统进入单周期态和混沌态时 a 环的相移  $\phi_b$  与半径  $\eta_b$  的关系,如图 6 所示。从图 6 可看出,  $\eta_b > 0.200$  时,系统的输出状态几乎全为混沌态。为了清楚地看到系统输出状态,把图 6 中心的圆即  $\eta_b = 0.100$  之内的范围扩大,如图 7 所示。从图 7 可看出这样的规律:  $\eta_b \leq 0.045$  时,系统的输出状态一直维持在混沌态;从  $\eta_b > 0.045$  开始,系统的输出状态开始呈现出一定的规律。  $0.045 < \eta_b < 0.100$  时,系统首次进入单周期态时, b 环的反馈相移  $\phi_b$  都为 0.010,系统再次进入单周期态所需  $\phi_b$  越来越大,而系统以后进入混沌态所需  $\phi_b$  越来越小。  $\eta_b = 0.100$  是系统输出状态的一个特殊点,此时若  $\phi_b = 0$ ,系统的输出状态为单周期态,从  $\phi_b = 1.29$  开始系统的输出状态便呈现混沌态和单周期态交替出现的情况。  $\eta_b > 0.100$  时,系统输出状态的单周期态区间随着  $\eta_b$  的增加越来越大。当  $\eta_b > 0.400$  时,系统的输出状态一直维持在单周期态。

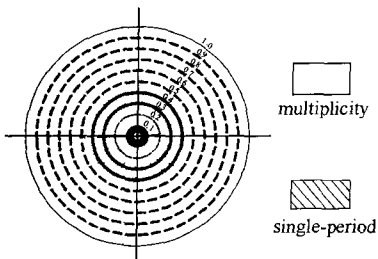


Fig. 6 Relation schema between  $\eta_b$  and  $\phi_b$  corresponding to feedback coefficient  $\eta_a$  at zero ( $0 < \eta_b < 1$ )

图 6 反馈系数  $\eta_a=0$  时,  $\eta_b$  和  $\phi_b$  的关系图 ( $0 < \eta_b < 1$ )

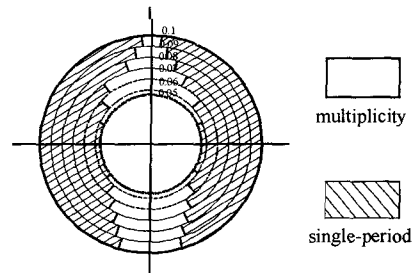


Fig. 7 Relation schema between  $\eta_b$  and  $\phi_b$  corresponding to feedback coefficient  $\eta_a$  at zero ( $0 < \eta_b < 0.100$ )

图 7 反馈系数  $\eta_a=0$  时,  $\eta_b$  和  $\phi_b$  的关系图 ( $0 < \eta_b < 0.100$ )

### 2.2 双环反馈相移控制模型

通过对以上两种单环模型的分析,可推出反馈系数和反馈相移对系统输出状态的影响是不同的。结合图 4 和图 6 可以看出,激光器的双环的反馈系数和反馈相移对系统的混沌态和单周期态输出影响是不同的。在

此基础上,对双环模型分析及仿真。

双环掺铒光纤激光器双环都有反馈量( $\eta_a, \eta_b, \varphi_b$  和  $\varphi_a$  都不为 0)时属于双环模型,此时的控制模型如图 1 所示,其动力学方程可用式(1)来表示。综合单环反馈相移的结果,可得出双环反馈相移的研究思路:固定 a 环的反馈系数在某一个非零值,改变 b 环的反馈系数和反馈相移,在这个变化过程中,观察系统的输出状态。 $\varphi_b$  的取值范围可从 0 变化到  $2\pi$ ,  $\eta_b$  也可从 0 变化到 1。鉴于此,选择中间值  $\eta_a=0.573$ ,在取值范围内改变  $\eta_b$  和  $\varphi_b$  的值,经仿真分析可得系统的输出状态如表 3 所示。

表 3  $\eta_a=0.573$ ,同时改变  $\eta_b$  和  $\varphi_b$  时系统的控制作用

Table 3 Control effect of system corresponding to different phase-shift  $\varphi_b$ , different feedback coefficient  $\eta_b$  and constant  $\eta_a$  at 0.573

$\eta_b$	system output state as $\varphi_b=0$	interval of multiplicity	interval of single periodic state	interval of multiplicity	interval of single periodic state	interval of multiplicity
0.1	multiplicity	(0, 0.31)	(0.31, 2.32)	(2.32, 3.81)	(3.81, 6.14)	(6.14, $2\pi$ )
0.2	multiplicity	(0, 0.33)	(0.33, 2.24)	(2.24, 3.46)	(3.46, 3.58)	(3.58, 3.72)
0.3	multiplicity	(0, 0.39)	(0.39, 2.16)	(2.16, 3.36)	(3.36, 5.77)	(5.77, $2\pi$ )
0.4	multiplicity	(0, 0.45)	(0.45, 2.09)	(2.09, 3.68)	(3.68, 5.58)	(5.58, $2\pi$ )
0.5	multiplicity	(0, 0.51)	(0.51, 2.01)	(2.01, 3.82)	(3.82, 5.38)	(5.38, $2\pi$ )
0.6	multiplicity	(0, 0.59)	(0.59, 1.92)	(1.92, 3.99)	(3.99, 5.13)	(5.13, $2\pi$ )
0.7	multiplicity	(0, 0.66)	(0.66, 1.88)	(1.88, 4.28)	(4.28, 4.86)	(4.86, $2\pi$ )
0.8	multiplicity	(0, 0.77)	(0.77, 1.84)	(1.84, $2\pi$ )	—	—
0.9	multiplicity	(0, 0.87)	(0.87, 1.78)	(1.78, $2\pi$ )	—	—
1.0	multiplicity	(0, 0.97)	(0.97, 1.69)	(1.69, $2\pi$ )	—	—

从表 3 可以看出,随着反馈系数  $\eta_b$  的增加,系统输出单周期区间和混沌区间都呈现出一定的规律。为了更清楚地了解此规律,根据表 3 绘出系统单周期态和混沌态时 b 环的相移  $\varphi_b$  与半径  $\eta_b$  的关系,如图 8 所示。由图 8 看出,随着圆半径的增大,系统的混沌区域越来越大。其具体变化规律是:系统第 1 次进入混沌态所需 b 环的相移越来越大,而系统第 1 次进入单周期态所需 b 环的相移则是越来越小。

由图 4 和图 6~8 可见,  $\eta_a, \varphi_a, \varphi_b$  和  $\eta_b$  对系统输出状态的影响是不同的。图 6 中混沌态的区域(图中的白色部分)较多,证明 a 环的反馈系数  $\eta_a$  和反馈相移  $\varphi_a$  对系统输出状态中混沌态的影响比较大,而图 8 单周期态的区域(图中阴影部分)较多,证明 b 环的反馈系数  $\eta_b$  和反馈相移  $\varphi_b$  对系统输出状态中单周期态的影响比较大。

结合图 6 和图 8 还可看出:随着双环掺铒激光器 a 环的反馈系数  $\eta_a$  的增加,系统输出状态中混沌态的区域也增加。这进一步说明反馈系数  $\eta_a$  对系统输出状态中混沌态的影响较大。

### 3 结 论

本文提出了单模双环掺铒光纤激光器激光混沌双环反馈相移控制方法,给出了双环反馈相移和单环反馈相移的理论控制模型,并在整个定义域  $(0, 2\pi)$  上全面分析了系统的输出状态,还给出了数值仿真结果。通过对仿真结果的综合分析,对反馈环节中 4 个参数:激光器 a 环反馈系数  $\eta_a$  和相移控制器产生的相移  $\varphi_a$ , 激光器 b 环反馈系数  $\eta_b$  和相移控制器产生的相移  $\varphi_b$  的控制都能够很好地调节双环掺铒光纤激光器的输出状态。适当地调节这 4 个参数,可以控制系统从混沌态到周期态或者稳定态,也可以控制系统从周期态或者稳定态到混沌态,从而有效地实现了混沌的多参数控制。分别调节激光器两个环的反馈系数和反馈相移,所得系统输出状态也是不同的。这种方法为混沌的实际应用提供了更广阔的空间。

### 参考文献:

[1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**(11): 1196-1199.

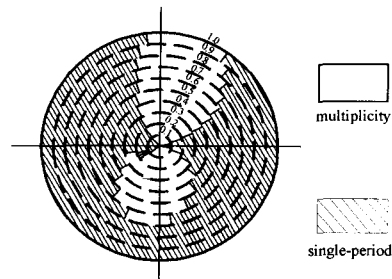


Fig. 8 Relation schema between  $\eta_b$  and  $\eta_a$  corresponding to feedback coefficient at 0.573

图 8 反馈系数  $\eta_a=0.573$  时,  $\eta_b$  和  $\eta_a$  的关系图

- [2] 方锦清,姚伟光.非线性环型腔反馈激光系统的动力学特性及其混沌控制[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2): 155-163. (Fang Jinqing, Yao Weiguang. Chaotic dynamics and chaos control in nonlinear laser systems. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 155-163)
- [3] 颜森林. 双环掺铒光纤激光器混沌控制产生周期脉冲及多周期现象研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 636-643. (Yan Senlin. Controlling chaos to produce periodic-pulses and multi-periodic states phenomena in dual-ring Er-doped fiber laser. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 636-643)
- [4] 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. (Tan Zhongwei, Liu Yan, Fu Yongjun, et al. Analysis of chaotic phenomena in the fiber laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(4): 311-314)
- [5] 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 Senlin, He Longqing, Wu Haiyong, et al. Studies on method of phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber lasers. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(5): 642-646)
- [6] 颜森林,何龙庆,吴海勇,等. 双环掺铒光纤激光器混沌偏振控制方法研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 191-194. (Yan Senlin, He Longqing, Wu Haiyong, et al. Studies on methods of polarization controlling chaos in dual-ring Er-doped fiber lasers. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 191-194)
- [7] 杨磊,潘炜,罗斌,等. 耦合反馈控制双环掺铒光纤激光器混沌[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(4): 542-546. (Yang Lei, Pan Wei, Luo Bin, et al. Controlling chaotic behavior in erbium-doped fiber dual-ring laser with coupling feedback. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(4): 542-546)
- [8] 李丰,潘炜,罗斌. 基于互注入的双环掺铒光纤激光器的混沌控制及同步[J]. 量子光学学报, 2008, **14**(2): 207-212. (Li Feng, Pan Wei, Luo Bin. Chaos control and synchronization of dual-ring erbium-doped fiber lasers based on mutual injection. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, **14**(2): 207-212)
- [9] Yan Senlin. Study on the method of controlling chaos in an Er-doped fiber dual-ring laser via external optical injection and shifting optical feedback light[J]. *Chaos*, 2007, (17): 1-5.
- [10] 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. (Luo Liguang, Nie Dezhen. Chaos behaviours in dual coupled class-B laser. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1735-1737)
- [11] 吴飞,邝敏敏,孙宇超,等. 双环掺铒光纤激光器混沌耦合反馈相移控制[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(1): 165-170. (Wu Fei, Kuang Minmin, Sun Yuchao, et al. coupling feedback phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 165-170)
- [12] 杨磊,潘炜,罗斌,等. 多变量耦合实现双环掺铒光纤激光器混沌同步[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 992-996. (Yang Lei, Pan Wei, Luo Bin, et al. Synchronization of chaotic erbium-doped fiber lasers by multivariable unidirectionally couple. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(7): 992-996)

## Method of double-ring feedback phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber laser

Wu Fei<sup>1</sup>, Jia Li<sup>1</sup>, Wu Zhaoxia<sup>2</sup>, Kuang Minmin<sup>1</sup>, Sun Yaqian<sup>1</sup>, Li Yong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Automation Department, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Two physical models of single-ring feedback phase-shift controlling chaos are discussed based on the method of chaos controlled by coupling-feedback phase-shift and its physical model. The coupler feeds the output back and the phase-shift controller controls the phase of feedback. Suitable feedback coefficient and apt feedback phase-shift can control the laser output into chaos state, stable state or periodic state effectively. Moreover, the paper analyzes the method of double-ring feedback phase-shift controlling chaos in detail, and the impact of feedback coefficient and feedback phase-shift on the model of double-ring is studied.

**Key words:** erbium-doped fiber laser; chaos controlling; single-ring feedback phase-shift; double-ring feedback phase-shift