

损耗调制型掺铒光纤环形激光器混沌现象 的实验研究

刘 越[†] 张 巍 冯 雪 刘小明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2008 年 9 月 21 日收到, 2008 年 11 月 15 日收到修改稿)

报道了损耗调制型掺铒光纤环形激光器中的混沌现象. 在单频损耗调制型掺铒光纤环形激光器中, 改变调制频率或调制电压, 观察到倍周期分岔和阵发两种进入混沌途径的共存现象, 与抽运调制型掺铒光纤环形激光器的实验结果相一致. 提出了一种采用两个正弦信号驱动的损耗调制型掺铒光纤环形激光器, 在调制信号频率比近似等于黄金分割数和白银分割数时, 增加调制电压, 发现激光器通过准周期途径进入混沌. 当调制信号两频率比不同时, 发生转变所需的调制电压也不同.

关键词: 掺铒光纤环形激光器, 混沌, 倍周期分岔, 准周期

PACC: 0545, 0547, 4255N

1. 引 言

混沌(Chaos)现象是非线性系统中普遍存在的现象, 是确定性非线性系统产生的一种复杂的类随机行为. 自洛伦兹(Lorenz)在气象研究中发现混沌行为以来, 广大研究者在混沌的理论和实验研究上投入了巨大的精力, 在数学、物理学、化学、生命科学、气象学、电子学、光学、力学等众多领域取得了丰富的研究成果. 混沌研究已经成为非线性科学的前沿课题之一. 光学双稳态系统和激光器中的不稳定现象是光学混沌研究的重要内容^[1-6]. 激光器属于非线性系统, 在一定条件下可以产生混沌现象. 近年来, 激光混沌保密通信的应用引起了人们的关注, 大大推动了对激光器混沌行为的研究. 其中, 掺铒光纤激光器因其具有较高增益且工作波长位于光纤的低损耗窗口而备受重视. 掺铒光纤激光器属于 B 类激光器, 可用关于光场和反转粒子数的速率方程描述其动态特性. 它是一个二阶自治系统, 通过调制抽运功率或者腔内损耗等方法增加系统的自由度, 可使激光器产生混沌. 损耗调制型掺铒光纤环形激光器被广泛用于激光器混沌动力学行为和混沌同步的研究^[6-10], 可望用于激光混沌保密通信. 我们在实验中发现, 损耗调制型掺铒光纤环形激光器可以通过倍周

期分岔、阵发和准周期这三种途径进入混沌, 这进一步体现出该型激光器在混沌研究中的重要作用.

2. 倍周期分岔与阵发途径进入混沌

我们首先研究在单一正弦信号调制时, 随着调制频率和调制电压的变化, 损耗调制型掺铒光纤环形激光器产生混沌的途径. 实验装置如图 1 所示, 其结构是一个典型的 Q 调制掺铒光纤环形激光器. 图中的掺铒光纤放大器(EDFA)模块包含一段 25 m 长的掺铒光纤和一个光隔离器, 采用 980 nm 的半导体激光器做抽运源. 光纤光栅(FBG)的中心波长是 1547.3 nm, 3 dB 带宽是 0.6 nm, 反射率是 90%. 光纤光栅与光环行器的 2 端口相连接, 与环行器一起构成一个带通滤波器. 环行器与隔离器共同决定了振荡光的传输方向. 激光器内对光功率起调制作用的是声光调制器(AOM). 为了避免由于 AOM 的移频反馈作用产生自脉动^[11], 我们在腔内放置了移频量相同但是移频方向相反(± 27 MHz)的一对 AOM, 其中产生正移频的 AOM 上加载调制信号对通过的光功率进行调制(即损耗调制), 产生负移频的 AOM 不加载调制信号只起移频作用. AOM 的电调制系数为调制信号的幅值与平均值的比, 幅值等于峰峰值的一半, 平均值就是 AOM 在调制工作模式下的直流偏置

[†] E-mail: liuyue02@mails.thu.edu.cn

电压 本实验中此电压为 438 mV 保持不变,通过调整信号的峰峰值来改变调制系数. PC 为偏振控制器, Coupler 是耦合比为 80:20 的光耦合器. 激光器的总腔长为 57 m. 耦合器 20% 端口输出的光经过光电探测器(PD, Agilent 83440B)转换为电信号,在示波器(OSC, Agilent 54833A)上显示波形,同时利用示波器的快速傅里叶变换(FFT)功能分析输出时间序列的频谱. 频谱分析是在混沌信号特性研究中的常用方法,能够使我们确定激光器的运行状态.

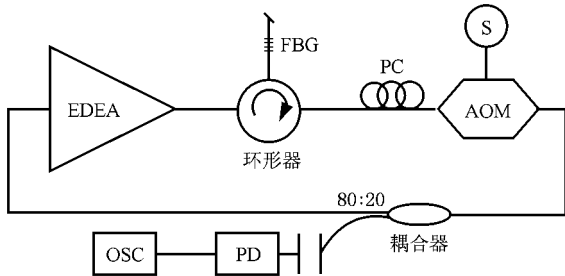


图 1 损耗调制型掺铒光纤环形激光器实验装置结构图

当抽运功率 80 mW、调制电压峰峰值 23 mV、调制频率为 18052 Hz 时获得的脉冲波形如图 2(a)所示,图 2(b)是时间序列经过傅里叶变换(FT)所得的频谱,在频谱图中可以清晰地看到调制信号频率的二分频,即产生了倍周期脉冲.在其他参数不变的情况下,随着调制频率的增加,激光器的输出经过两次倍周期分岔,依次产生四倍周期(图 2(c))和八倍周期(图 2(e))的输出,图 2(d)和(f)分别是相应的频谱,从中可以看到调制信号的四分频和八分频.继续增加调制频率,激光器输出的时域波形如图 2(g)所示,呈现出无规律的脉冲幅度变化,不能分辨出明显的周期.与图 2(b)(d)(f)相比,图 2(h)显示的频谱除包含调制频率及其谐波分量等少数尖峰外,出现了显著提高的连续性宽带背景噪声.时域波形和频谱上的这些特点均符合混沌的特征,上述实验结果证明了随调制频率的增加,损耗调制型掺铒光纤环形激光器经倍周期分岔途径产生混沌.

保持抽运功率 80 mW,调制电压峰峰值为 23 mV

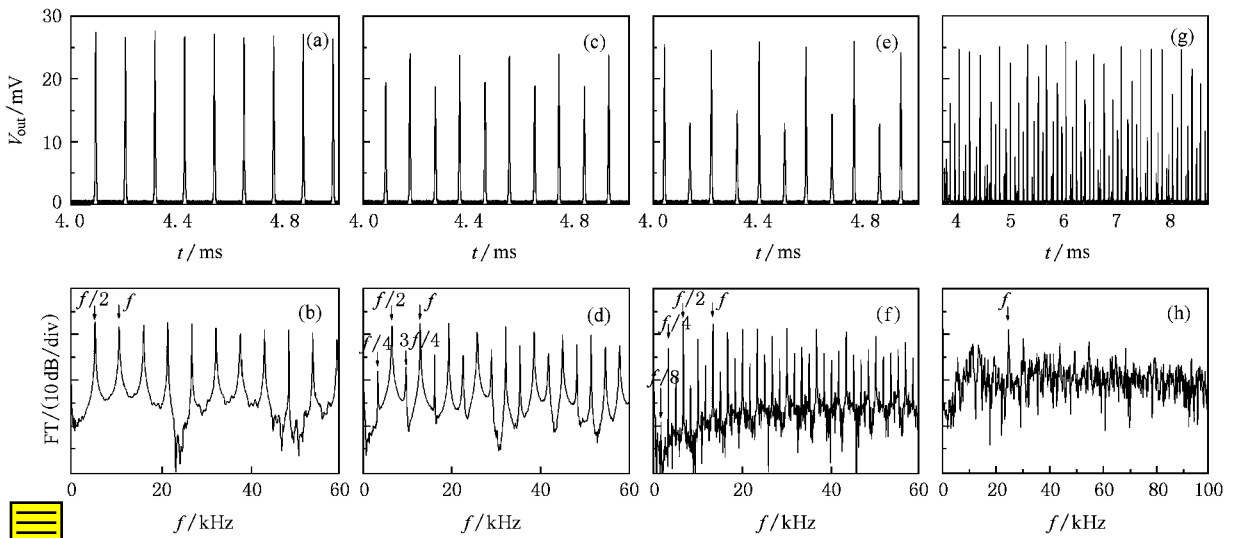


图 2 随调制频率依次增加,单频损耗调制型掺铒光纤环形激光器通过倍周期分岔途径进入混沌.调制频率依次为(a)(b) 18052 Hz,二倍周期(c)(d) 21452 Hz,四倍周期(e)(f) 22353 Hz,八倍周期(g)(h) 24807 Hz,混沌.其中(a)(c)(e)(g)为时间序列,(b)(d)(f)(h)为相应的频谱图

的工作条件不变,实验中观察到激光器随调制频率变化由阵发途径进入混沌的现象,图 3 所示的时域波形显示了这样的演化过程.在图 3 的(a)(c),(e)(g)中我们看到激光器的输出从杂乱无章的状态逐渐过渡到周期序列.从图 3(b)(d)(f)(h)显示的频谱中,可以看到在频率增加的过程中,调制信号的三分频变得清晰起,宽带背景噪声则大大

降低.这样的变化过程是可逆的,即降低调制频率,激光器可以从三倍周期经过阵发途径进入混沌.在阵发的区域内,突发的脉冲会打断序列的周期性(图 3(e)),而且调制频率离开产生稳定周期序列的频率值越远,这种突发性冲击越频繁(图 3(c)),直至周期运动几乎完全消失(图 3(a)).结合图 2 与图 3 可以看出,二倍周期经过倍周期分岔产生的混沌

与三倍周期经过阵发产生的混沌是连在一起的.图 2 与图 3 所示的实验结果表明,改变调制频率,损耗调制型掺铒光纤环形激光器可以通过倍周期分岔和

阵发两种途径进入混沌.这与 Luo 等人在抽运调制型掺铒光纤环形激光器中观察到的现象是相似的^[12].

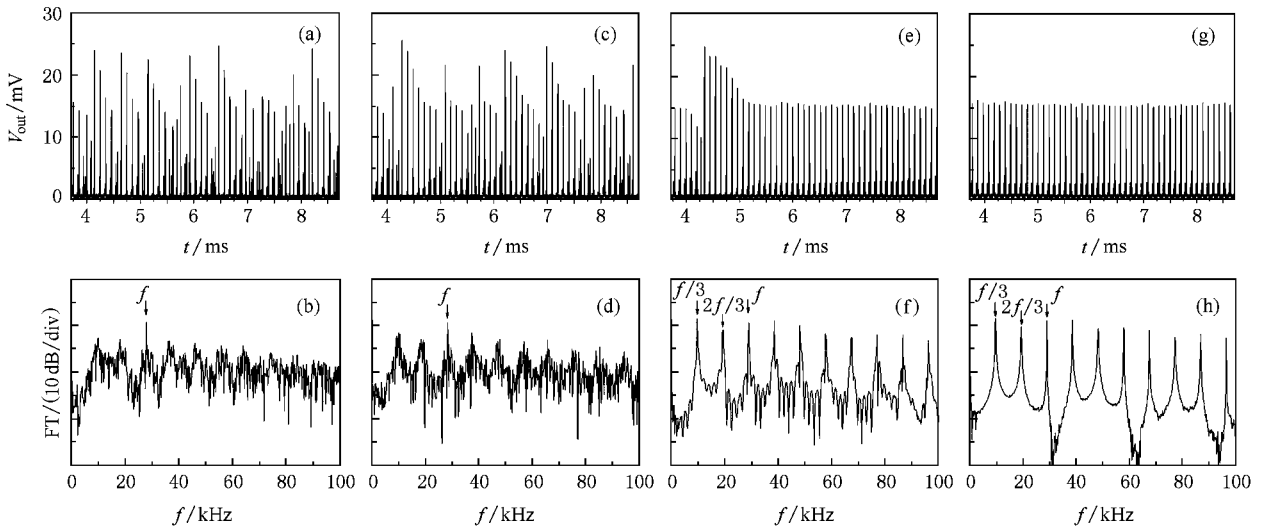


图 3 随调制频率的变化,单频损耗调制型掺铒光纤环形激光器通过阵发途径进入混沌.调制频率依次为(a)(b)28003 Hz,混沌(c)(d)28405 Hz,阵发(e)(f)28898 Hz,轻微阵发(g)(h)28932 Hz,三倍周期.图 3(a)(c)(e)(g)为时域波形,(b)(d)(f)(h)为相应的频谱

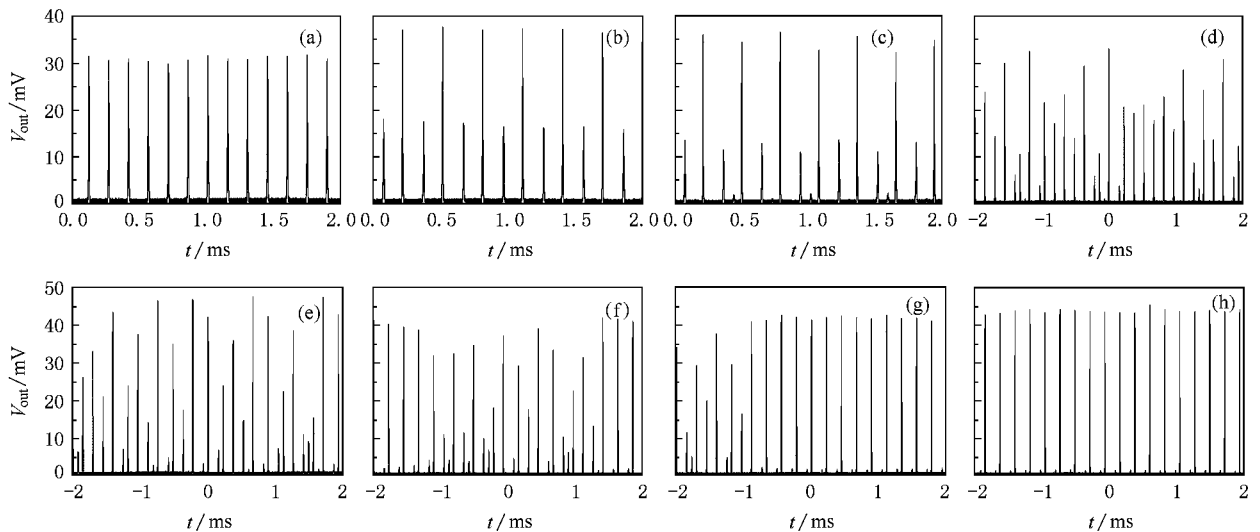


图 4 改变调制电压,单频损耗调制型掺铒光纤环形激光器通过倍周期分岔与阵发途径进入混沌.调制电压峰值依次增加(a)23 mV,二倍周期(b)28 mV,四倍周期(c)33 mV,八倍周期(d)55 mV,混沌(e)70 mV,混沌(f)85 mV,阵发(g)90 mV,轻微阵发(h)95 mV,三倍周期.

以调制电压(调制系数)作为控制参数,也可以观察到与改变调制频率产生混沌的相似过程.在抽运功率为 58 mW、调制频率为 13484 Hz 的条件下,随着调制电压的增加,图 4(a)到(d)所示的时域波形变化显示了激光器从二倍周期经过倍周期分岔进入混沌的过程,(e)到(h)的时域波形变化显示了激光

器从混沌经过阵发演化到三倍周期的过程.图 4(e)到(h)所示的过程是可逆的,即激光器可以随调制电压的降低由三倍周期经过阵发途径进入混沌.这样,通过改变调制频率或调制电压,我们在损耗调制型掺铒光纤环形激光器中实现了倍周期分岔和阵发两种途径进入混沌.

3. 准周期向混沌的转变

在非线性系统中,当存在两个频率的竞争作用时,可以出现锁频或者准周期现象^[13].我们发现通过对实验所用的损耗调制型掺铒光纤环形激光器同时施加两个调制信号,同样可以观察到锁频和准周期现象.特别是当频率比近似等于黄金分割数 $\sigma_g = (\sqrt{5} - 1)/2$ 或白银分割数 $\sigma_s = \sqrt{2} - 1$ 的时候,随着调制电压的增加,系统最容易通过准周期途径进入混沌.

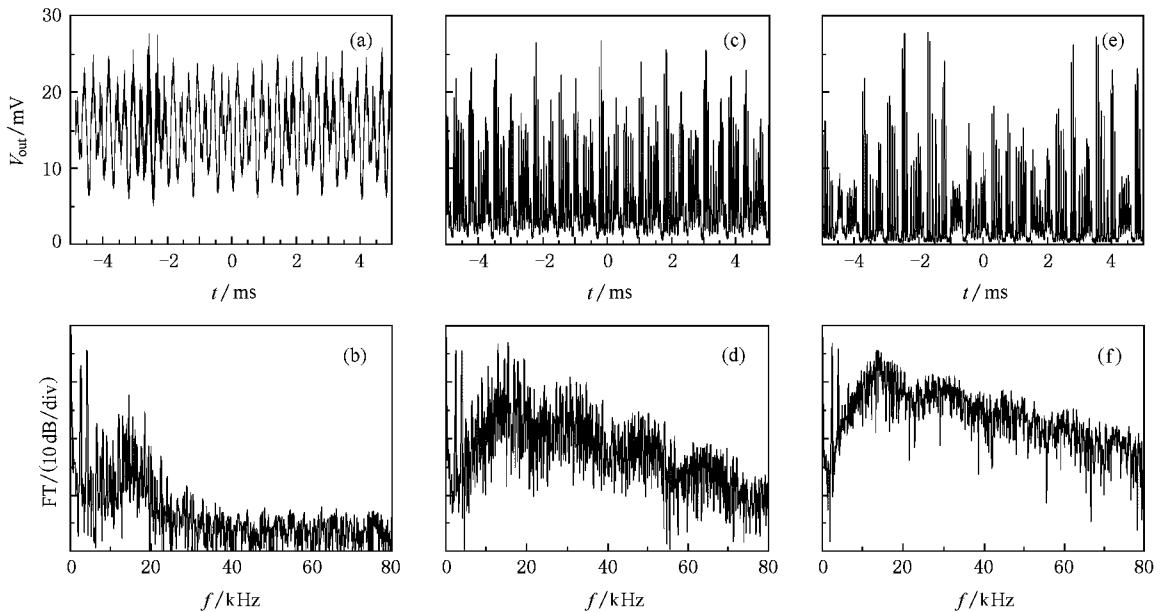


图5 调制信号频率比近似等于黄金分割数时,双频损耗调制型掺铒光纤环形激光器通过准周期途径进入混沌. S_2 的调制电压峰峰值依次增加(a)(b)23 mV,准周期(c)(d)43 mV,临界状态(e)(f)57 mV,混沌.(a)(c)(e)为时域波形(b)(d)(f)为相应的频谱

图5中 $f_2 = 2475$ Hz, $f_1 = 4000$ Hz,两个信号的频率比近似等于 σ_g .保持 S_1 的调制电压峰峰值为 28 mV,当 S_2 的调制电压较低时,激光器的输出处于准周期状态(见图5(a))相应的频谱(见图5(b))中不仅存在两个调制频率,而且存在两个调制频率的各种频率组合所对应的尖峰.提高调制电压到最接近发生混沌转变的数值时,可以看到时间序列的不规则程度明显增加(见图5(c))相应的频谱(见图5(d))中不仅有两个调制频率及其各种频率组合,而且出现了明显的宽带背景噪声.进一步增加调制电压,输出的时间序列进入了混沌状态(见图5(e)),相应的频谱(见图5(f))主要是增强了连续宽带背

用于研究准周期途径进入混沌的双频损耗调制型掺铒光纤环形激光器的实验装置结构与图1相同,抽运功率 55 mW.光纤光栅更换为 3 dB 带宽 0.2 mm,不过这对激光器的混沌没有影响.采用了两个正弦信号同时驱动 AOM,其中一个调制信号(S_1)的参数取为固定值,调制频率为 $f_1 = 4000$ Hz,调制电压的峰峰值为 28 mV;另一个调制信号(S_2)的频率为 $f_2 = 2475$ Hz 或 $f_2 = 1656$ Hz 使得两个信号的频率比 f_2/f_1 近似等于 σ_g 或 σ_s .图5和图6分别演示了当 f_2/f_1 近似等于 σ_g 和 σ_s 时激光器随 S_2 调制电压的增加通过准周期途径进入混沌的过程.

景噪声,除调制频率本身对应的尖峰外,调制频率的其他各种频率组合基本上消失,这是典型的混沌信号的频谱.图6中 $f_2 = 1656$ Hz, $f_1 = 4000$ Hz,两个信号的频率比接近 σ_s .保持 S_1 的调制电压峰峰值为 28 mV,增加 S_2 的调制电压也可以观察到与图5类似的准周期到混沌的转变过程,但是达到临界状态和混沌态的调制电压要高于频率比约等于 σ_g 时的值.这说明频率比等于 σ_g 时更容易通过准周期途径进入混沌.在实验中,保持 S_1 的参数条件不变,改变 f_2 在非锁频状态的其他频率比条件下,也可以观察到激光器随 S_2 调制电压的增加从准周期到混沌的

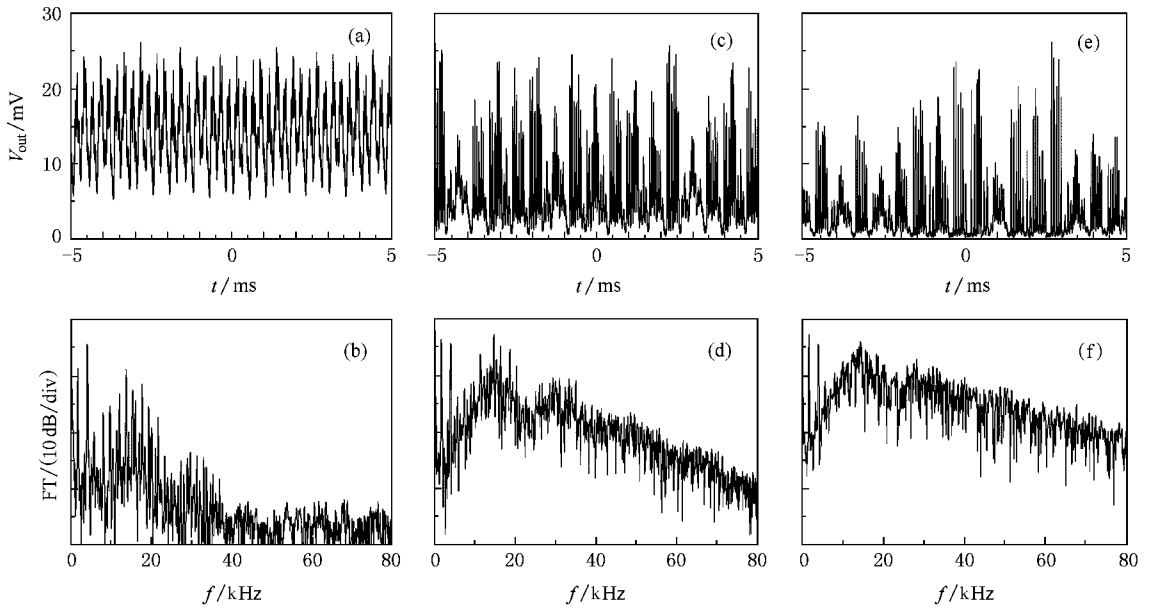


图 6 调制信号频率比近似等于白银分割数时, 双频损耗调制型掺铒光纤环形激光器通过准周期途径进入混沌. S_2 的调制电压峰值依次增加 (a)(b) 23 mV, 准周期 (c)(d) 75 mV, 临界状态 (e)(f) 85 mV, 混沌. (a)(c)(e) 为时域波形 (b)(d)(f) 为相应的频谱

转变过程, 但是通过比较发现频率比等于 σ_g 时进入混沌所需的调制电压最小.

Alexander 等人在抽运调制的自脉动掺铒光纤激光器中观察到锁频现象和准周期到混沌的转变过程^[14, 15]. 本文首次建立了双频损耗调制型掺铒光纤环形激光器, 观察到了准周期到混沌的转变过程以及频率比不同时混沌转变条件不同的现象. 实验中调制器驱动信号电压的最大峰峰值为 85 mV, 直流偏置为 438 mV, 即电调制系数在 10% 以内就可以观察到激光器通过准周期进入混沌的现象, 实验中还观察到系统可以在更大的调制系数范围内保持混沌状态.

4. 结 论

我们报道了单频损耗调制型掺铒光纤环形激光器中实验观察到随调制参数变化的倍周期分岔、阵发和混沌行为, 这与已报道的抽运调制型掺铒光纤激光器的实验结果一致. 在双频损耗调制型掺铒光纤激光器中实验观察到随调制参数变化的准周期和混沌行为. 对损耗调制型掺铒光纤环形激光器混沌行为的研究, 有助于更深入地了解该类激光器的工作特性, 并推动掺铒光纤激光器在混沌保密通信中的应用.

- [1] Weiss C O 1991 *Dynamics of lasers* (Weinheim)
- [2] Zhang H J 1997 *Optical Chaos* (Shanghai Sci. and Tech. Edu. Pub. House) (in Chinese) [张洪钧编著 1997 光学混沌 (上海科技教育出版社)]
- [3] Zhang S H, Shen K 2003 *Chin. Phys.* **12** 149
- [4] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴、王安帮、王海红、王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [5] Li G H, Zhou S P, Xu D M, Lai J W 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 736 (in Chinese) [李国辉、周世明、徐得名、赖建文 2002 物理学报 **51** 736]
- [6] Luo L G, Tee T J, Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2524
- [7] Saucedo-Solorio J M, Pisarchik A N, Kir'yanov A V, Aboites V 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 490
- [8] Luo L G, Chu P L, Whitbread T, Peng R F 2000 *Opt. Comm.* **176** 213
- [9] Kim S, Lee B, Kim D H 2001 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **13** 290
- [10] Imai Y, Murakawa H, Imoto T 2003 *Opt. Comm.* **217** 415
- [11] Maran J, Besnard P, LaRochelle S 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 1302
- [12] Luo L G, Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 972
- [13] He D R, Yeh W J, Kao Y H 1984 *Phys. Rev. B* **30** 172

[14] Pisarchik A N , Barmenkov Y O , Kir 'yanov A V 2004 *OSA/ASSP*

[15] Pisarchik A N , Barmenkov Y O 2005 *Opt. Comm.* **254** 128

94 135

Experimental investigation on chaotic behaviors in loss-modulated erbium-doped fiber-ring lasers^{*}

Liu Yue[†] Zhang Wei Feng Xue Liu Xiao-Ming

(*Department of Electronic Engineering , Tsinghua University Beijing 100084 , China*)

(Received 21 September 2008 ; revised manuscript received 15 November 2008)

Abstract

Chaotic behaviors in loss-modulated erbium-doped fiber-ring lasers are reported. In a single-frequency loss-modulated erbium-doped fiber-ring laser , the coexistence of period-doubling bifurcation and intermittency routes to chaos is observed by changing the modulation frequency or the modulation voltage. The results are in agreement with those in an erbium-doped fiber-ring laser subjected to pump modulation. Dual-frequency loss-modulated erbium-doped fiber-ring lasers are proposed. When the value of the frequency ratio is approximately equal to the gold mean and the silver mean , respectively , the transition to chaos via quasiperiodicity is found when the modulation voltage is increased. The modulation voltages for the transition are different for the varied values of the frequency ratio.

Keywords : erbium-doped fiber ring laser , chaos , period-doubling bifurcation , quasiperiodicity

PACC : 0545 , 0547 , 4255N

[†] E-mail : liuyue02@mails.thu.edu.cn