

掺铒光纤环形激光器混沌复杂度分析

杨欢欢¹ 杨玲珍^{1,2} 张 俊¹ 王娟芬¹

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

²新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 本文基于自相关及排列熵函数实验研究了掺铒光纤环形激光器混沌序列的复杂度。通过控制腔内损耗来实现光纤激光器不同的混沌态输出, 并对其复杂度进行详细分析。实验结果表明: 腔内损耗对混沌复杂度影响较大, 随着腔内损耗的增大, 其排列熵复杂度逐渐变大; 自相关曲线上表现出的腔长时延信息也得到有效抑制。通过腔内损耗控制, 混沌序列的周期性被完全隐藏, 其复杂度达到最大值, 这能有效地提高混沌保密通信的安全性, 混沌传感和测距的测量精度。

关键词 激光光学; 混沌; 复杂度; 时延信息; 掺铒光纤激光器

中图分类号 0439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0714002

Chaos Complexity of Erbium-Doped Chaotic Fiber Ring Laser

Yang Huanhuan¹ Yang Lingzhen^{1,2} Zhang Jun¹ Wang Juanfen¹

¹Physics and Optoelectronic Engineering College, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China

²Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The complexity of the erbium doped fiber ring lasers is experimentally investigated based on the autocorrelation function and permutation entropy function. By controlling the loss in the ring cavity, the different chaotic complexity is analyzed in detail. The experimental results show that the intra-cavity loss has great effect on the chaotic complexity of fiber laser. With increase of the loss, the permutation entropy complexity increases gradually and the time-delay signature shown in the autocorrelation curves can also be suppressed. By controlling the intra-cavity loss, the time-delay signature of chaos is completely hidden and its permutation entropy complexity reaches a maximum, which can effectively improve the security of chaotic secure communications and the measurement precision of chaotic sensing or ranging.

Key words laser optics; chaos; complexity; time-delay signature; erbium doped fiber laser

OCSI codes 140.1540; 140.3510; 060.2410

1 引 言

光学混沌因其具有带宽宽、随机性好、抗干扰性强等特点, 在混沌保密通信^[1]、混沌测距和传感^[2-3]、快速随机数的产生^[4]等领域得到广泛应用。产生光学混沌的激光器主要有半导体激光器和光纤激光器。无论是哪种激光器其所产生的混沌序列都带有与腔长或反馈延迟等有关的时延信息, 这些时延信息的存在会影响混沌传感、测距的精度和混沌保密通信的安全性, 还会造成快速随机数发生器产生的比特序列的随机性恶化^[4-6]。

混沌时延信息产生的上述影响实质与混沌序列的复杂度密切相关。作为衡量混沌系统安全性能高低

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61107033)山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(2012lfjyt05)

作者简介: 杨欢欢(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器混沌特性方面的研究。E-mail: momo19891022@163.com

导师简介: 杨玲珍(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光技术与应用等方面的研究。

E-mail: office-science@tyut.edu.cn(通信联系人)

的一个重要标准,混沌序列的复杂度越大,其抗干扰性越强,系统的安全性能越好。因而分析混沌序列的复杂度与其时延信息的变化关系有非常重要的意义。1991年 Pincus 等^[7]提出一种近似熵方法来分析系统复杂度。此后肖芳红等^[8]提出了用符号动力学的方法来分析混沌伪随机序列的复杂度,该方法可以有效判断出不同的混沌伪随机序列的复杂程度,而且比近似熵算法更为优越。孙克辉等^[9]利用模糊熵算法对典型离散混沌系统和连续混沌系统复杂度进行了分析。Kane 等^[10]利用相关维方法讨论外腔反馈半导体激光器产生的混沌信号的复杂度特性,从而有效分析宽带混沌同步特性的质量。这些方法都能有效衡量混沌质量的优劣,但方法繁琐,且计算量大。2002年 Christoph 等^[11]提出一种排列熵算法,这种方法主要是将时间序列相空间重构为等价同构不变量,进而利用 Shannon 信息熵的概念来计算时间序列的复杂性。与其他方法相比这种算法方法简单、计算快,并且对噪声具有稳健性^[12]。

本文提出基于损耗控制的掺铒光纤环形激光器,通过控制光纤激光器的腔内损耗,得到不同的混沌态输出,并利用自相关函数及排列熵函数对其复杂度进行了分析。

2 主要研究内容与结果

2.1 实验原理及装置

图 1 为损耗控制型掺铒光纤环形激光器的实验装置图,980 nm 的半导体激光器作为抽运源,最大抽运功率为 250 mW。抽运光通过 980/1550 的波分复用器(WDM),耦合到 10 m 长的掺铒光纤(EDF)中形成掺铒光纤放大器。偏振控制器(PC)用来控制激光腔内传输光场的偏振态,偏振无关光隔离器(ISO)保证了光场在环形腔内的单向传输。通过调节可调光衰减器(VOA),可以控制腔内损耗,使激光器输出处在不同的混沌态。80:20 的输出耦合器(OC)将 80% 的光留在腔内继续传输,20% 的光作为探测信号输出。输出的光信号通过光电探测器转换为电信号后,由示波器对其进行分析。掺铒光纤环形激光器系统的动力学方程在本课题组先前的研究中已进行了详细的描述分析^[17]。

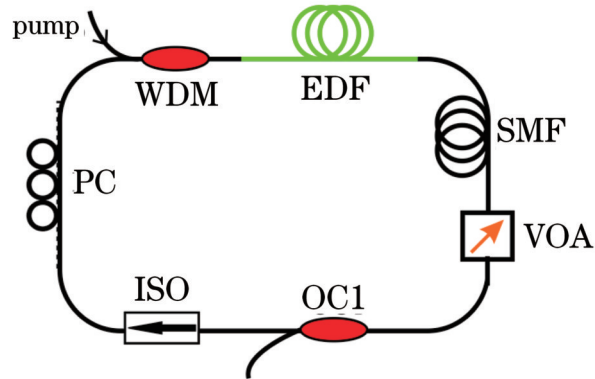


图 1 损耗控制型掺铒光纤环形激光器的实验装置图

Fig.1 Experimental setup of loss-controlled erbium-doped fiber ring laser

为了确定混沌序列时延信息,利用自相关函数对混沌序列进行分析。混沌强度时间序列的自相关函数定义为^[13-14]

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle][P(t) - \langle P(t) \rangle] \rangle}{\left[\langle P(t) - \langle P(t) \rangle \rangle^2 \langle P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle \rangle^2 \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中 $P(t)$ 表示混沌强度时间序列, $\langle \rangle$ 表示时间平均值, t 表示延迟时间。通过自相关图上旁瓣出现的位置可以恢复出混沌序列的时延特性,从而降低混沌系统的安全性。实验中利用自相关图上旁瓣的峰值高度来衡量混沌时延信息被抑制的程度,为方便表述,数据分析时将其记为 ACF。

此外,还引入排列熵对混沌序列的复杂度进行分析。排列熵的定义表述如下^[11,15,16]:

对于一个时间序列 $\{X_i\}_{i=1, \dots, m}$ 首先选定合适的嵌入维数 d 及嵌入延迟 τ 将其进行相空间重构。重构后得到的等价相空间矩阵为

$$\begin{aligned}
 & [x(1) \ x(1 + \tau) \ \cdots \ x(1 + (d - 1)\tau) \ , \\
 & x(2) \ x(2 + \tau) \ \cdots \ x(2 + (d - 1)\tau) \ , \\
 & x(j) \ x(j + \tau) \ \cdots \ x(j + (d - 1)\tau) \ , \\
 & \cdots \ \cdots \\
 & x(M) \ x(M + \tau) \ \cdots \ x(M + (d - 1)\tau) \ , \\
 & j = 1, 2, \dots, M
 \end{aligned}$$

将矩阵中的每一行看作一个重构分量,重构分量的个数为 $M = n - (d - 1)\tau$ 个。然后对每个重构分量中所包含的元素,进行升序排列,按照排列后各元素的顺序依次提取其在原重构分量中所在位置的索引,从而得到不同的 d 维序号排列, d 维相空间映射总共有 $d!$ 种不同的序号排列。将所有相同的序号排列归为一组,若在 $M = n - (d - 1)\tau$ 组重构分量中一共有 k 种不同序号排列,每种序号排列出现的概率为 $P_{i=1, \dots, k}$,则按照 Shannon 熵的形式,排列熵可以定义为

$$H_{PE}(d) = - \sum_{i=1}^k P_i \lg P_i \quad (2)$$

很明显 $0 \leq H_{PE} \leq \lg(d!)$, 当时间序列是一个单调递增或递减的序列时,排列熵达到下边界值,当序列是完全随机序列时,其排列熵的值达到上边界,即最大值。为方便计算,将 $H_{PE}(d)$ 进行归一化处理,即

$$0 \leq H_{PE} = H_{PE}(d) / \lg(d!) \leq 1 \quad (3)$$

在计算时间序列复杂度的实际应用中,Christoph^[11]等建议选择嵌入延迟 $\tau = 1$,此外嵌入维数应满足 $3 \leq d \leq 7$,并且时间序列的点数 n 要远大于 $d!$ 。本文中为了计算方便,选取 $d = 4, n = 5000$, (满足 $n \gg d!$)。

2.2 实验结果

图2为未加可调衰减器之前,掺铒光纤环形激光器(EDFRL)的输出功率-电流($P-I$)曲线,当抽运电流为85 mA时,达到激光器的阈值。将偏振控制器固定在合适位置,逐渐增大抽运电流到120 mA时,可以得到混沌输出。图3(a)和(b)分别为抽运电流为260 mA时激光器输出的时序及频谱图。

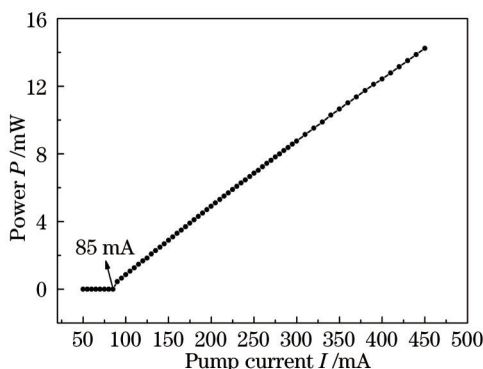


图2 EDFRL的 $P-I$ 曲线

Fig.2 $P-I$ curve of EDFRL

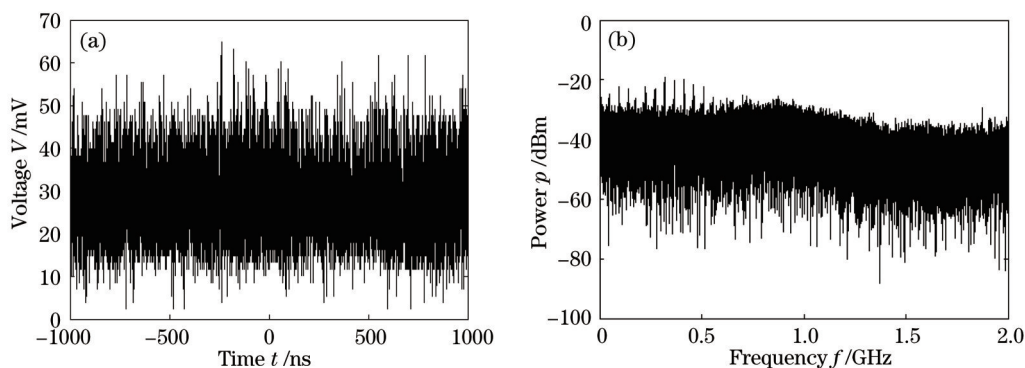


图3 抽运电流为260 mA时激光器输出的混沌序列。(a)时序;(b)频谱

Fig.3 Chaotic states of EDFRL with pump current on 260 mA. (a) Time series; (b) frequency spectrum

实验中固定抽运电流为 260 mA, 调节 VOA 来控制腔内损耗, 图 4 为调节腔内损耗前, 激光器输出的混沌序列的自相关及复杂度 (H_s)。从自相关图上可以看出, 激光器输出的混沌序列具有很强的周期性, 体现了一定的自同步特性, 这是由于激光腔内的非线性效应及光场相干叠加造成的, 通过公式 $t = nL/c$ (L 为激光器环形腔长度, n 为光纤折射率, c 为真空中光传播速度) 计算可知, 自相关图上旁瓣出现的位置正好对应光场在掺铒光纤激光器环形腔内传输一周的时间 (约为 $15.04 \mu\text{s}$), 相应的激光器的腔长为 3 km。通过计算旁瓣峰值高度为 0.245, 其排列熵复杂度 (PE) 为 0.8506。

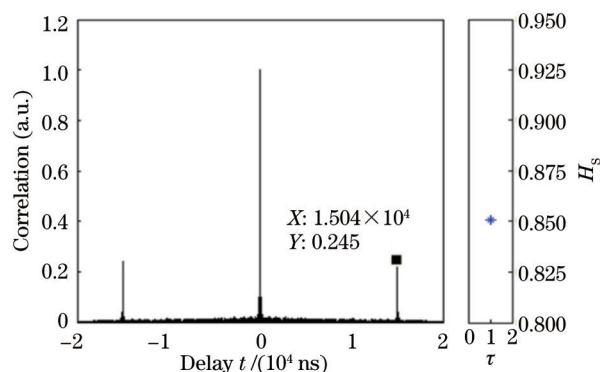


图 4 调节腔内损耗前激光器输出的混沌序列的自相关及复杂度
Fig.4 Auto-correlation and complexity of chaos without loss adjusting

调节 VOA, 当激光器输出功率分别为 $172.0 \mu\text{W}$ 和 $66.2 \mu\text{W}$ 时混沌序列的自相关及复杂度如图 5 所示。从图 5 (a) 和 (b) 可以看出, 控制腔内损耗时, 随着腔内损耗增大, 激光器输出功率逐渐减小, 自相关图上旁瓣高度逐渐降低, 当激光器输出功率下降到 $66.2 \mu\text{W}$ 时, 混沌序列的旁瓣被完全隐藏在噪声基底中。此时混沌序列的复杂度达到最大为 0.9139。

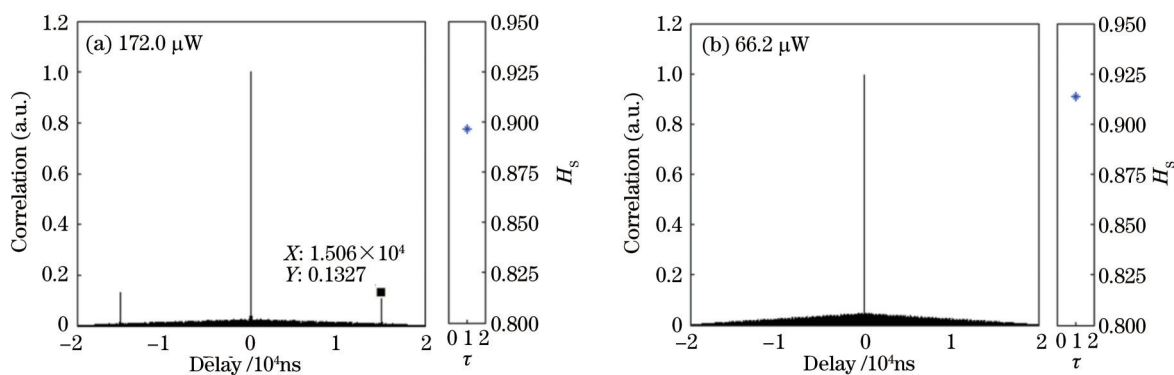


图 5 激光器不同输出功率下混沌序列的自相关和复杂度
Fig.5 Auto-correlation and complexity of chaos with different output powers

图 6 为激光器输出 $172.0 \mu\text{W}$ 和 $66.2 \mu\text{W}$ 时混沌序列的光谱图。比较图 6(a) 及 (b) 可以看出, 随着输出功率的降低, 混沌序列光谱范围逐渐减小, 激光器输出 $172.0 \mu\text{W}$ 时其混沌序列光谱为双波长; 当激光器输出功率为 $66.2 \mu\text{W}$ 时, 混沌序列旁瓣被完全隐藏, 此时激光器输出光谱变为单波长。出现上述结果的原因主要是由于均匀加宽激光腔内会产生模式竞争和模式跳变, 如果未对模式竞争进行控制, 激光腔内只能产生少数几个波长振荡。而当激光腔内非线性效应很强时, 光强与腔内损耗直接相关, 因此控制腔内不同损耗时, 不同波长间的功率会被增益损耗机制自动加以平衡, 这样就出现了不同波长的激光振荡^[17]。

图 7 为混沌序列自相关旁瓣峰值及复杂度随输出功率的变化曲线。可以看出随着输出功率的降低, 混沌序列的周期性逐渐减小, 并且其复杂度逐渐增大, 当输出功率为 $66.2 \mu\text{W}$ 时, 混沌序列的周期性被完全隐藏, 其复杂度达到最大值。这能有效地提高混沌保密通信的安全性以及混沌传感和测距的测量精度。

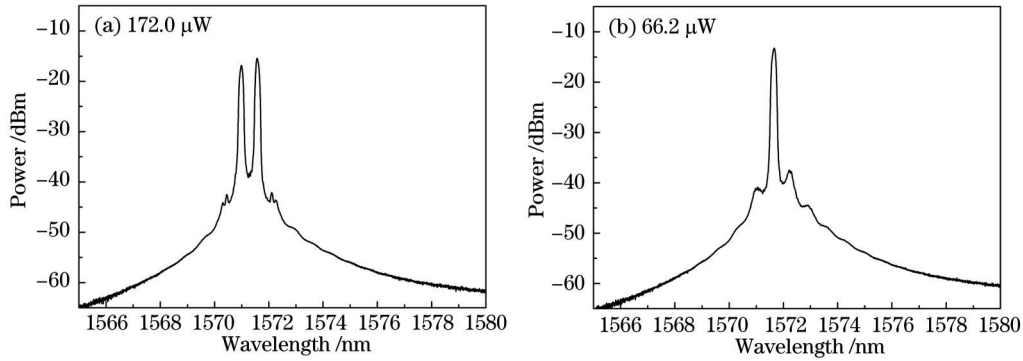


图 6 激光器不同输出功率时混沌序列的光谱图

Fig.6 Optical spectrum of chaos with different output powers

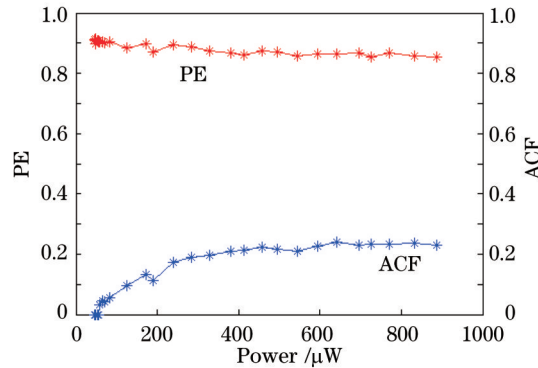


图 7 混沌序列复杂度及自相关旁瓣峰值随输出功率变化的曲线

Fig.1 Curves of chaos complexity and autocorrelation sidelobe peak versus output power

3 结 论

本文利用腔内的可调衰减器控制环形腔内损耗,实现不同的混沌态输出。通过自相关及排列熵函数对掺铒光纤环形激光器混沌序列的特性及复杂度进行了分析。实验结果表明随着腔内损耗的增大,混沌序列的时延特性逐渐被抑制,其排列熵复杂度逐渐变大,混沌序列的光谱也发生了一定改变。通过腔内损耗控制,当激光器输出为 66.2 μW 输出时,混沌序列的时延特性被完全隐藏,其排列熵复杂度达到最大值,输出光谱由双波长变为单波长。

参 考 文 献

- 1 Apostolos Argyris, Dimitris Syvridis, Laurent Larger, *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343-346.
- 2 Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- 3 Wang Feifei, Zhang Li, Yang Lingzhen, *et al.*. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensing network based on fiber chaotic laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806006.
王斐斐, 张 丽, 杨玲珍, 等. 基于混沌光纤激光的准分布式布拉格传感网络[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806006.
- 4 Atsushi Uchida, Kazuya Amano, Masaki Inoue, *et al.*. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- 5 Vladimir S Udaltsov, Jean-Pierre Goedgebuer, Laurent Larger, *et al.*. Cracking chaos-based encryption systems ruled by nonlinear time delay differential equations[J]. Physics Letters A, 2003, 308(1): 54-60.
- 6 Qingchun Zhao, Yuncai Wang, Anbang Wang. Eavesdropping in chaotic optical communication using the feedback length of an external-cavity laser as a key[J]. Appl Opt, 2009, 48(18): 3515-3520.
- 7 Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Mathematics, 1991, 88(6): 2297-2301.
- 8 Xiao Fanghong, Yan Guirong, Han Yuhang. A symbolic dynamics approach for the complexity analysis of chaotic pseudo_random

- sequences[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(9): 2877–2881.
- 肖方红, 阎桂荣, 韩宇航. 混沌伪随机序列复杂度分析的符号动力学方法[J]. *物理学报*, 2004, 53(9): 2877–2881.
- 9 Sun Kehui, He Shaobo, Yin Linzi, *et al.*. The application of fuzzy entropy algorithm in the complexity analysis of chaotic sequence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 130507.
- 孙克辉, 贺少波, 尹林子, 等. 模糊熵算法在混沌序列复杂度分析中的应用[J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 130507.
- 10 Kane D M, Toomey J P, Lee M W, *et al.*. Correlation dimension signature of wideband chaos synchronization of semiconductor lasers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1): 20–22.
- 11 Christoph Bandt, Bernd Pompe. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(17): 174102.
- 12 Li Y, Wu Z M, Zhong Z Q, *et al.*. Time–delay signature of chaos in 1550 nm VCSELs with variable–polarization FBG feedback[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19610–19620.
- 13 Damien Rontani, Alexandre Locquet, Marc Sciamanna, *et al.*. Loss of time–delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2007, 32 (20): 2960–2962.
- 14 Damien Rontani, Alexandre Locquet, Marc Sciamanna, *et al.*. Time–delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 879–891.
- 15 Sun Kehui, Tan Guoqiang, Sheng Liyuan. The complexity analysis of TD–ERCS discrete chaotic pseudo–random sequences[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6): 3359–3366.
- 孙克辉, 谈国强, 盛利元. TD–ERCS 离散混沌伪随机序列的复杂性分析[J]. *物理学报*, 2008, 57(6): 3359–3366.
- 16 Rao Guoqiang, Feng Fuzhou, Si Aiwei, *et al.*. Method for optical determination of parameters in permutation entropy algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(1): 188–193.
- 饶国强, 冯辅周, 司爱威, 等. 排列熵算法参数的优化确定方法研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(1): 188–193.
- 17 Yang Rong, Zhang Li, Yang Lingzhen. Experimental investigation on multi–wavelength chaos of erbium–doped fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0114001.
- 杨 蓉, 张 丽, 杨玲珍. 多波长混沌掺铒光纤环形激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0114001.

栏目编辑: 宋梅梅