

多波长混沌掺铒光纤环形激光器实验研究

杨 蓉 张 丽 杨 玲 珍

(太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西 太原 030024)

摘要 利用掺铒光纤环形激光器(EDFRL), 基于光纤的非线性克尔效应, 实验实现了多波长混沌激光输出。实验研究了 EDFRL 在时序上通过倍周期进入混沌的路径, 并进行了理论分析, 理论与实验结果一致。实验结果表明, 随着抽运功率的增加, 其光谱的输出呈现多波长, 激光器最多可输出 5 个不同波长的混沌激光。采用光纤光栅进行滤波后, 各个波长的输出均呈现混沌状态。

关键词 激光光学; 混沌; 多波长; 非线性克尔效应; 光纤激光器

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0114001

Experimental Investigation on Multi-Wavelength Chaos of Erbium-Doped Fiber Ring Laser

Yang Rong Zhang Li Yang Lingzhen

(*Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China*)

Abstract Based on the nonlinear Kerr effect, the multi-wavelength chaos is generated in erbium-doped fiber ring laser (EDFRL) experimentally. Period-doubling route to chaos is observed in time series. Numerical simulation is also carried out, and the numerical results agree with the experimental results well. The experimental results show that the optical spectra of multi-wavelength chaotic fiber laser can output five different wavelengths at most with the pump power increasing, and the output of each wavelength is chaotic after a tunable fiber Bragg grating filter.

Key words laser optics; chaos; multi-wavelength; nonlinear Kerr effect; fiber laser

OCIS codes 140.1540; 140.3500

1 引 言

以掺铒光纤(EDF)作为增益介质的多波长光纤环形激光器在波分复用(WDM)光纤通信和光纤传感网络等方面具有广泛的应用^[1~3]。混沌信号由于具有天然的保密性、抗干扰性和不可预测性等特点, 被广泛应用在保密通信和抗干扰测距等方面^[4~6]。随着光学技术的不断发展, WDM 和波长可调谐的混沌光通信研究成为扩展混沌通信容量的方法。多波长的混沌光源是用于 WDM 混沌光通信的可选光源^[7~9]。自从 1980 年 Ikeda 等^[10]通过理论分析

得出被动非线性环形腔中可产生混沌, 国内外对被动和主动环形光纤激光器的动态特征研究成为热点^[11~14]。目前国际上报道的掺铒光纤环形激光器(EDFRL)混沌产生的机制主要有光延时反馈^[15]、双环耦合^[16]和损耗调制^[17]等, 但通过这些方法产生的混沌带宽较低。1999 年 Abarbanel 等^[18]建立了 EDF 环形腔的非线性克尔效应模型, 指出此系统产生的混沌带宽至少能达到吉赫兹量级。虽然这些研究中产生的混沌已经得到了广泛应用, 但对于多波长混沌 EDFRL 的实验研究目前尚未见报道。

收稿日期: 2011-06-24; **收到修改稿日期:** 2011-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61107033)和山西省青年科技研究基金(2008021008)资助课题。

作者简介: 杨 蓉(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器产生混沌方面的研究。E-mail: yr05238@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)

本文利用非线性克尔效应在 EDFRL 中实验产生了 5 个不同波长的混沌激光。理论和实验研究了随着抽运功率的增加,激光器由倍周期进入混沌的路径,理论和实验结果相一致。

2 理论分析

基于 Abarbanel 等^[18]的单环 EDF 激光器模型,对 EDFRL 产生混沌的理论进行了分析。在光纤环形腔中,光场

$$E(z, t) = \epsilon(z, t) \exp[i(k_0 z - \omega_0 t)],$$

式中 $\epsilon(z, t)$ 是光沿 z 轴方面传播,在时间 t 处的光场包络振幅, $\omega_0 = k_0 c/n$ 为光波角频率, k_0 是光波波矢大小, c 是光在真空中的传播速度, n 是光纤折射率。在相对坐标 $\tau = t - z/v_g$ (v_g 为群速度)下,光场包络的传输方程为

$$\frac{\partial \epsilon_{x,y}(z, \tau)}{\partial z} = gn(\tau)\epsilon_{x,y} + L_{x,y}\epsilon_{x,y} + N_{x,y}\epsilon_{x,y}, \quad (1)$$

式中 g 和 $n(\tau)$ 分别是增益参数和单位体积内粒子反转数, $L_{x,y}$ 为光场传输的线性项算子,包括线性双折射、群速度色散和增益色散, $L_{x,y}$ 通常在频域中具体表示为

$$L_{x,y} = \pm \frac{ik_0 B_m}{2n_0} - \left(\pm \frac{\Delta}{n_0 c} i\omega \right) - \frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 - \frac{gn(\tau)\omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}, \quad (2)$$

式中 ω 为角频率, B_m 表示双折射程度, $B_m = n_x - n_y$, n_x 和 n_y 分别表示 x, y 方向光纤的有效折射率, $\Delta = n_0 \cdot B_m$, $n_0 = (n_x + n_y)/2$, β_2 是群速度色散, τ_2 为 Er^{3+} 横向弛豫时间。

(1)式中 $N_{x,y}$ 为光场传输的非线性项算子, $N_{x,y}$ 与非线性克尔效应有关,通常在空间域表示,具体表达式为

$$N_{x,y}\epsilon_{x,y} = i\gamma \left\{ \left[|\epsilon_{x,y}(z, \tau)|^2 + \frac{2}{3} |\epsilon_{y,x}(z, \tau)|^2 \right] \epsilon_{x,y}(z, \tau) \right\}, \quad (3)$$

式中 γ 为光纤的非线性系数。

在不考虑非线性算子的情况下,对环形激光器中的光场进行调制,可以在一定的调制频率下获得低频的混沌脉冲序列。在考虑非线性项的情况下,需要选择足够强的抽运功率和具有一定非线性系数的足够长 EDF 产生非线性效应。光纤环形激光器的动态演变过程可以由光场的变化和粒子反转数的积分

$$\omega(\tau) = 1/l_A \int_0^{l_A} g(z, \tau) dz$$

(式中 l_A 为 EDF 长度)来表示:

$$\epsilon(z = l_A + l_F, \tau + \tau_R) = \mathbf{R} \mathbf{J}_{\text{PC}} \mathbf{U}_{\text{fiber}} \mathbf{Q} [\epsilon(z = 0, t)], \quad (4)$$

$$\frac{d\omega(\tau)}{d\tau} = P - \frac{\tau_R}{T_1} \{ \omega(\tau) + 1 + |\epsilon(\tau)|^2 \times \{ \exp[2gl_E \omega(\tau)] - 1 \} \}, \quad (5)$$

式中 $\omega(\tau)$ 是增益系数, $\epsilon(c)$ 是光场振幅, l_E 为普通单模光纤长度, τ_R 为光场传输一周所需要的时间, P 为抽运功率, T_1 为激发态的持续时间, \mathbf{Q} 为有源光纤部分的传输矩阵。 $\mathbf{U}_{\text{fiber}} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & -u_1^* \end{bmatrix}$ 为普通光纤部分传输矩阵,其中 u_1^*, u_2^* 是 u_1, u_2 的复共轭, $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$ 。 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{bmatrix}$ 为光纤吸收矩阵,其中 R_x, R_y 分别为光纤在 x, y 方向的吸收系数。 $\mathbf{J}_{\text{PC}} = \mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1) \mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2) \mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3)$ 为偏振控制器的琼斯矩阵,其中 $\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1)$ 和 $\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3)$ 分别为快轴与 x 轴成 θ_1 和 θ_3 角的 $1/4$ 波片的琼斯矩阵,

$$\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1) = \frac{1-i}{2} \begin{bmatrix} i + \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & i - \cos 2\theta_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3) = \frac{1-i}{2} \begin{bmatrix} i + \cos 2\theta_3 & \sin 2\theta_3 \\ \sin 2\theta_3 & i - \cos 2\theta_3 \end{bmatrix},$$

$\mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2)$ 为快轴与 x 轴成 θ_2 角的 $1/2$ 波片的琼斯矩阵, $\mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{bmatrix}$ 。可用上述方程数值研究 EDFRL 输出的混沌动态特性。在数值分析过程中,各个参量值如表 1 所示。

表 1 模拟参量值

Table 1 Numerical parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
l_A/m	10	$\beta_2/(\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	-20
l_F/m	10	R_x	0.45
T_1/ms	10	R_y	0.46
$\gamma/(\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	3	$\theta_1, \theta_2/\text{rad}$	1.0
T_2/ps	1	θ_3/rad	1.5

改变抽运功率,观察 EDFRL 的动态特性。随着抽运功率的增加,激光器经由倍周期进入混沌。图 1 为激光器的周期态输出。图 1(a)~(c)是抽运功率分别在 24.90, 27.60, 30.35 mW 时输出的 1, 2 和 4 倍周期(最大 Lyapunov 指数为 -0.0291, -0.0304 和 -0.0316)。继续改变抽运功率至 42.00 mW 时(最大

Lyapunov 指数为 0.1325), 激光器输出混沌光, 如图 2 所示, 图 2(b) 中坐标 $P(N)$ 和 $P(N+1)$ 为在对应的时

序图中第 N 和 $N+1$ 个采样点激光器输出的功率。

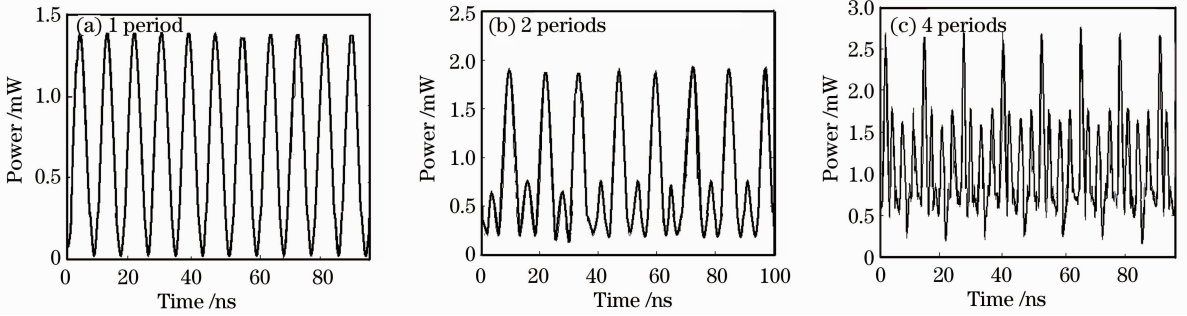


图 1 模拟 EDFRL 的不同周期输出

Fig. 1 Different periods output of EDFRL in numerical simulation

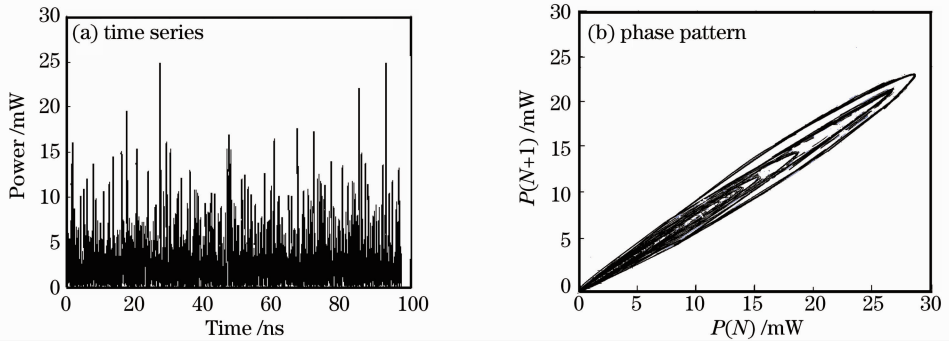


图 2 模拟 EDFRL 的混沌输出

Fig. 2 Chaotic output of EDFRL in numerical simulation

3 实验装置

EDFRL 产生多波长混沌激光的实验装置如图 3 所示。以 980 nm 的半导体激光器作为抽运光源, 其最大输出功率为 250 mW, 抽运光通过 WDM 耦合到 EDF 中。在实验中 EDF 的长度为 8 m, 整个光纤环的长度为 20 m。光隔离器(OI)保证光的单向传输, 偏振控制器(PC)用于控制光的偏振态。

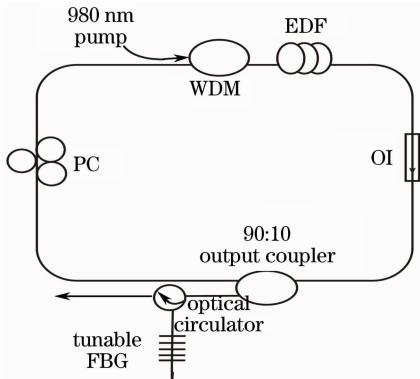


图 3 多波长混沌产生的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of multi-wavelength chaos generation

通过 90:10 的输出耦合器, 90% 的光在环中循环传输, 10% 的光输出用于探测。可调谐反射型光纤布拉格光栅(FBG)与环形器结合用于将不同波长的混沌激光滤出。实验中用带宽为 2 GHz 的光电探测器和 500 MHz 带宽、5 GS/s 采样率的实时示波器 (Tektronix TDS3052B) 探测激光器输出的波形; 用光谱仪 (Agilent 86140B) 观测波长。

4 实验结果与分析

将 PC 固定在某个合适的位置, 增加抽运功率, 激光器输出经由倍周期进入混沌。当抽运功率分别为 25.17, 27.57, 31.34 mW 时, 激光器输出呈现 1, 2 和 4 倍周期 (最大 Lyapunov 指数分别为 $-0.0296, -0.0302, -0.0385$), 如图 4 所示。继续增加抽运功率到 41.53 mW 时 (最大 Lyapunov 指数是 0.1417), EDFRL 的输出呈现混沌态, 如图 5 所示, 图 5(b) 中 $V(N)$ 和 $V(N+1)$ 分别为在对应的时序图中第 N 和 $N+1$ 个采样点激光器输出的连续峰值幅度。可以看到, 实验结果和理论结果能够很好地符合。

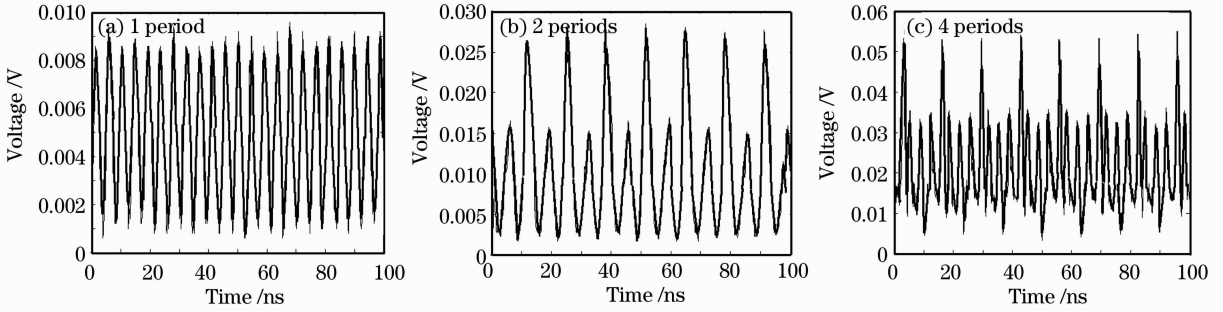


图 4 实验中 EDFRL 的不同周期输出

Fig. 4 Different periods output of EDFRL in experiment

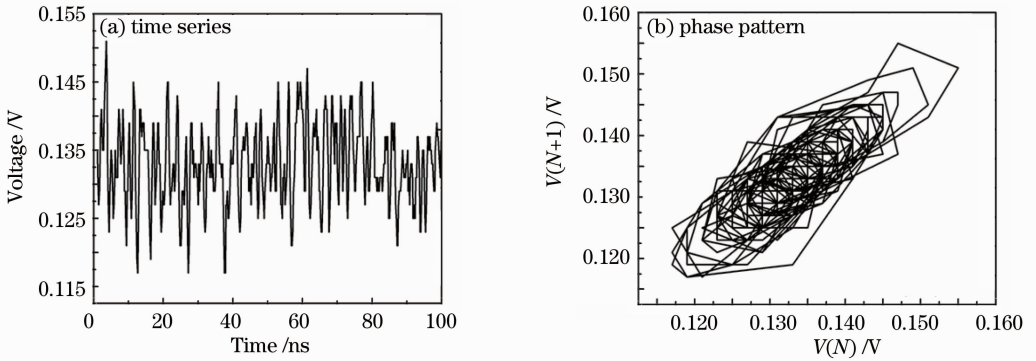


图 5 实验中 EDFRL 的混沌输出

Fig. 5 Chaotic output of EDFRL in experiment

整个过程中,混沌区对应的抽运功率为 41.53~154.70 mW。在此区域中,抽运功率不同,则输出的激光波长也不同,如图 6 所示。抽运功率为 41.53~70.00 mW,输出三波长,中心波长分别为 1564.72, 1565.40, 1566.02 nm;抽运功率为 76.37~112.41 mW,输出五波长,中心波长分别为 1563.37, 1564.05, 1564.72, 1565.40, 1566.02 nm;抽运功率为 120.20~154.70 mW,输出双波长,中心波长分别为 1563.37, 1564.05 nm。因此最多可以得到 5 个不同波长的混沌激光输出,且波长间隔小于 0.8 nm。

为了观察单个不同波长的输出,通过 FBG 滤

波,滤出的 5 个不同单波长光在时序上仍然呈现出混沌,如图 7 所示。

EDFRL 的增益介质 EDF 具有很宽的激光增益谱,但在常温下,EDF 中的均匀加宽占主导地位,不可避免地存在模式竞争和模式跳变,因此在不采取任何控制模式竞争技术的情况下,只能产生少数几个波长的激光振荡。在光纤的非线性效应很强时,腔内的损耗和光强有关,随着光强的改变,增益损耗机制就会自动平衡不同波长间的功率,这样就会在不同的抽运功率范围内出现双波长、三波长及五波长激光振荡。

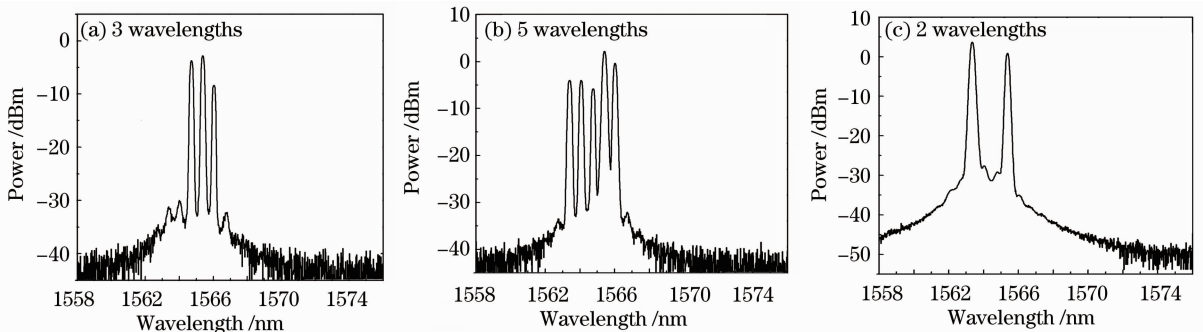


图 6 EDFRL 不同抽运电流下的输出光谱

Fig. 6 Optical spectra of EDFRL with different pump currents

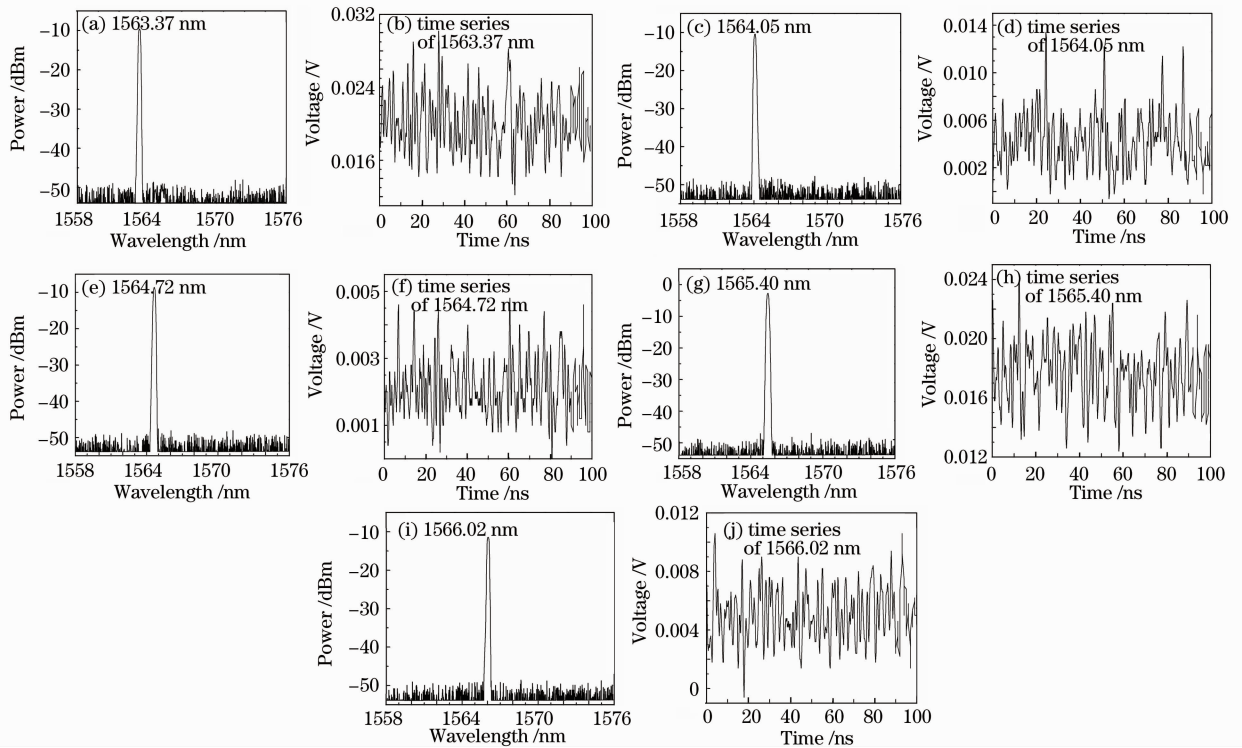


图7 单个波长混沌光输出

Fig. 7 Chaotic output of single wavelength

5 结 论

理论和实验研究了 EDFRL 产生混沌激光的路径,结果表明,随着抽运功率的增加,激光器输出经倍周期态进入混沌区,模拟和实验相一致。实验结果表明,当抽运功率在一定的范围内时,激光器可输出多个不同波长的混沌激光。多波长混沌激光可作为混沌光通信光源或用于 WDM 无源光网络的混沌光时域反射网络断点检测。

参 考 文 献

- 1 Woojin Shin, B. Yu, Y. Lak Lee *et al.*. Wavelength tunable optical time-domain reflectometry based on wavelength swept fiber laser employing two-dimensional digital micro-mirror array [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **282**(6): 1191~1195
- 2 Yu. O. Barmenkov, A. Ortigosa-Blanch, A. Diez *et al.*. Time-domain fiber laser hydrogen sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2461~2463
- 3 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of Panda fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 4 Liao Jianfei, Xia Guangqiong, Wu Jiagui *et al.*. Investigation on the cascade synchronization system based on the optoelectronic negative feedback chaotic lasers [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2006, **56**(11): 6301~6306
廖建飞, 夏光琼, 吴加贵等. 基于光电反馈的激光混沌串联同步系统研究 [J]. *物理学报*, 2006, **56**(11): 6301~6306

- 5 F. Lin, M. Tsai. Chaotic communication in radio-over-fiber transmission based on optoelectronic feedback semiconductor lasers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 302~311
- 6 J. Zhang, Y. Wang, A. Wang. Improving performance of optical fibre chaotic communication by dispersion compensation techniques [J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(9): 3264~3269
- 7 T. Matsuura, A. Uchida, S. Yoshimori. Chaotic wavelength division multiplexing for optical communication [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2731~2733
- 8 J. Zhang, A. Wang, J. Wang *et al.*. Wavelength division multiplexing of chaotic secure and fiber-optic communications [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6357~6367
- 9 Hu Zongfu, Wang Hao. Multi-wavelength laser generated by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 833~838
胡宗福, 王浩. 有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 833~838
- 10 K. Ikeda, H. Daido. Optical turbulence: chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(9): 709~712
- 11 L. Yang, J. Zhu, Z. Qiao *et al.*. Periodic intensity variations on the pulse-train of a passively mode-locked fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(19): 3798~3802
- 12 Song Chuangxing, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Tunable mode-locked pulsed erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1292~1295
宋创兴, 徐文成, 罗智超等. 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1292~1295
- 13 Yang Lingzhen, Qiao Zhanduo, Wu Yunqiao *et al.*. Study of chaotic bandwidth in erbium-doped ring fiber laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2010, **59**(6): 3965~3972
杨玲珍, 乔占朵, 郇云翘等. 掺铒光纤环形激光器混沌带宽特性数值研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 3965~3972

- 14 Liu Pengzu, Hou Jing, Zhang Bin *et al.*. 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702017
刘鹏祖, 侯静, 张斌等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702017
- 15 W. Fan, X. Tian, J. Chen *et al.*. Dynamics of erbium-doped fibre laser with optical delay feedback and chaotic synchronization [J]. *Chin. Phys. B*, 2007, **16**(10): 2908~2912
- 16 Wu Fei, Kuang Minmin, Sun Yuchao *et al.*. Coupling feedback phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 165~170
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
- 17 Y. Liu, X. Feng, W. Zhang *et al.*. An experiment of dynamical behaviours in an erbium-doped fibre-ring laser with loss modulation [J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(8): 3318~3324
- 18 H. Abarbanel, M. Kennel, M. Buhl *et al.*. Chaotic dynamics in erbium-doped fiber ring lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **60**(3): 2360~2374

栏目编辑: 宋梅梅