

光注入掺铒光纤激光器的混沌特性

任静峰¹, 杨玲珍^{1,2*}, 祝王华¹, 樊林林¹, 丁伟杰^{1,3}, 王娟芬¹¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;³忻州师范学院, 山西 忻州 034000

摘要 对光注入情况下混沌光纤激光器的输出特性进行实验研究。混沌光纤激光器采用环形腔结构, 利用光纤的非线性克尔效应产生混沌激光。主激光器产生的混沌激光通过光隔离器和光纤耦合器注入到混沌掺铒光纤激光器实现外光注入。将主激光器产生的不同功率的混沌信号注入从激光器, 研究光注入后从激光器混沌信号时序、频谱、自相关以及稳定性与复杂度等特性。结果表明, 光注入后的混沌信号时序随机且幅度频数呈高斯分布, 频谱无明显的周期特性, 自相关特性优良。光注入掺铒光纤激光器混沌输出在保证混沌源高复杂度的同时提高了混沌源的稳定性。

关键词 激光器; 掺铒光纤激光器; 光注入; 混沌信号; 稳定性; 复杂性

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2114002

Chaotic Characteristics of Erbium-Doped Fiber Laser with Optical Injection

Ren Jingfeng¹, Yang Lingzhen^{1,2*}, Zhu Wanghua¹, Fan Linlin¹,
Ding Weijie^{1,3}, Wang Juanfen¹¹ College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;² Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;³ Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000, China

Abstract The output characteristics of a chaotic fiber laser with optical injection were studied experimentally. After a chaotic fiber laser with a ring cavity was built, the nonlinear Kerr effect of the fibers was employed for generation of chaotic laser. The chaotic laser generated by the master laser was injected into a chaotic erbium-doped fiber laser via an optical isolator and a fiber coupler to achieve external optical injection. The time series, spectra, autocorrelations, stabilities, and complexities of the chaotic signals generated by the slave laser were studied after chaotic signals of different power were injected from the master laser to the slave laser. The results show that the time series of chaotic signals after optical injection are random and the amplitude frequency distributions fit Gaussian distribution. The spectra have no obvious periodic characteristics, and the autocorrelations are excellent. The chaotic output of an erbium-doped fiber laser with optical injection ensures a complex and more stable chaotic source.

Key words lasers; erbium-doped fiber lasers; optical injection; chaotic signal; stability; complexity

OCIS codes 140.1540; 140.3500; 140.3510; 140.3520

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61975141, 61575137, 61675144)

通信作者: *office-science@tyut.edu.cn

1 引言

混沌光纤激光器由于具有宽带宽、抗干扰能力强、自相关曲线的 δ 特性良好,以及结构紧凑、热稳定性好等优势,在混沌光纤传感、混沌雷达、混沌保密通信领域占据了重要地位。近年来,运用混沌光来实现各种传感越来越受到人们的关注,例如:运用混沌源实现长距离光时域反射^[1];利用半导体混沌源基于布里渊散射实现温度传感^[2];利用光纤混沌源实现分布式压力传感^[3]以及混沌光纤光源中运用衰荡环实现压力^[4]、温度^[5]、浓度传感^[6]。混沌源的稳定性以及混沌信号的复杂度对于传感精度极为重要。环形光纤激光器可以通过长腔以及高功率泵浦引入较强的克尔效应,很容易产生高复杂度的混沌信号,然而由单环形成的混沌光纤激光器的长期稳定性较差,这就限制了混沌激光在传感方面的应用。

大量的理论与实验证明,外光注入技术可实现激光系统稳定、带宽调制、波长选择、噪声抑制等功能。早期在气体激光器方面,通过弱信号注入锁定大功率 CO₂ 激光器,可实现大功率激光器的稳定输出^[7]。在固体激光器领域,科学家通过理论和实验证明注入锁定的 Nd:YAG 激光器可在锁定范围内抑制频率噪声。随着半导体激光器技术的发展,研究者通过光注入半导体激光器实现带宽调制^[8-9]、噪声抑制^[10]以及混沌信号的产生和优化^[11-15];通过光注入脉冲激光器产生高重复频率脉冲^[16-17]。光注入调制太赫兹级联激光器可实现噪声抑制与带宽调制^[18-19],而光注入光纤激光器也可实现波长和频率的锁定^[20]。国外学者通过注入光频梳,锁定单波长、多波长实现了波长的选择并维持频率稳定^[21]。Kuse 等^[22]通过注入锁模实现了两个独立掺镱光纤锁模激光器之间的偏置频率和重复频率的同步。Niang 等^[23]通过将连续光注入掺铒光纤激光器,证明了在特定条件下连续波信号迫使主激光器在谐波锁模状态下工作。综上所述,光注入对激光器输出的影响极为显著。

外光注入技术可实现光纤激光器的混沌输出,但对其输出稳定特性还需进行深入研究。混沌光注入给混沌光纤激光器增加了一个调制自由度,能够在提高混沌复杂度的基础上增强混沌源的稳定性,因此,本文分析外光注入对光纤激光器混沌输出的影响,包括混沌源的稳定以及混沌复杂度分析。分析主、从激光器在不同泵浦电流下的混沌特性,找到

最佳的泵浦电流状态。根据不同的波长失谐确定主、从激光器的波长锁定范围,确定主、从激光器的波长失谐。从激光器的泵浦电流及波长失谐,探究不同注入光功率下混沌信号的复杂度以及稳定性。

2 实验装置与分析方法

2.1 实验装置

图 1 为混沌光注入光纤激光器的实验装置示意图。主从式混沌光纤激光器主要由主激光器(ML)和从激光器(SL)组成。主、从激光器都是典型的环形腔掺铒光纤激光器,由 980 nm 半导体激光器泵浦源(LD1/LD2)通过波分复用器(WDM1/WDM2)泵浦 1 m 长的高浓度掺铒光纤(EDF;吸收系数为 9.7 dB/m)。半导体泵浦源的最大输出功率为 293 mW。隔离器(ISO1/ISO2)用于隔离多余泵浦光并且确保腔内激光单向传输,中心波长为 1550 nm,插入损耗为 0.5 dB,对 980 nm 激光的隔离效率为 48 dB。1000 m 的单模光纤(SMF1/SMF2)用于实现非线性克尔效应。利用偏振控制器(PC1/PC2)调节腔内偏振态。可调滤波器(filter)的调谐范围为 1530~1560 nm,确保主激光器与从激光器出现波长失谐。将输出耦合器(OC1/OC2)的 90% 端连入环路,10% 端作为输出端。为防止输出端面光反射回腔内,在输出端接入隔离器。为方便同时检测时序信号与光谱,在隔离器后端外接 95:5 的耦合器(OC4),95% 端通过光电探测器(PD)接入示波器(OSC),5% 端接入光谱分析仪(OSA),以检测光谱信息。主激光器产生的混沌信号通过隔离器(ISO3)与耦合器(OC4)注入从激光器。

2.2 分析方法

排列熵(PE)是由 Bandt 和 Pompe 于 2002 年提出的一种信息算法^[24-27],这种方法将时间序列相空间重构为等价同构不变量,进而利用 Shannon 信息熵的观点来度量时间序列的复杂性。排列熵能够简单快捷地度量混沌信号的复杂度,且对噪声干扰有一定的鲁棒性。时间序列 $\{x_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 经过相空间重构后得到新序列

$$X(i) = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x[i+(D-1)\tau]\}, \\ 1 \leq i \leq N-D+1, \quad (1)$$

式中: τ 为延迟时间,本文取 $\tau=1$,将每个子序列向后移动一个数据点得到下一个子序列; D 为嵌入维数^[26]。

将 $X(i)$ 的第 D 个重构分量按升序排列,得到

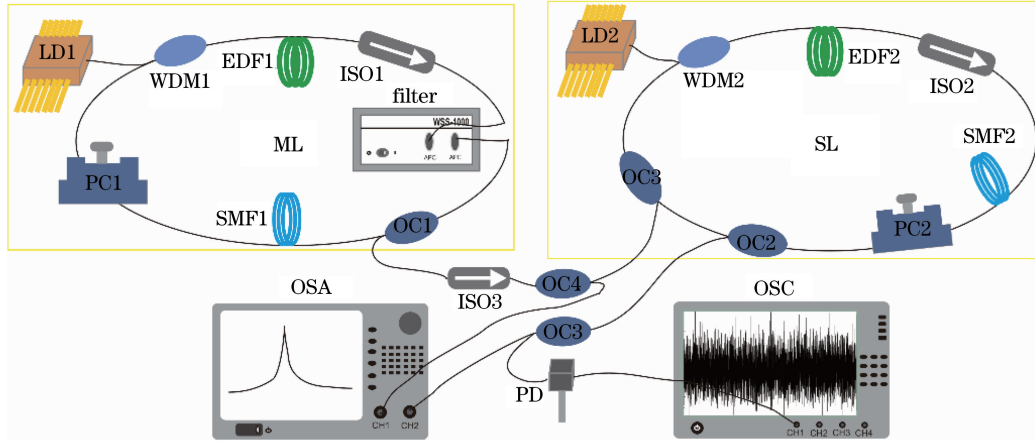


图 1 外光注入混沌光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup of chaotic fiber laser with optical injection

$$x[i + (j_1 - 1)\tau] \leq x[i + (j_2 - 1)\tau] \leq \dots \leq x[i + (j_D - 1)\tau], 1 \leq j \leq N - D + 1. \quad (2)$$

因此,任一 $X(i)$ 都有一组符号序列 $A(g) = [j_1, j_2, \dots, j_D] (1 \leq g \leq N - D + 1)$ 。

D 个不同的符号一共有 $D!$ 种不同的符号序列。将所有排列相同的符号序列 $A(g)$ 归为一组,在 $N - D + 1$ 组序列中一共有 n 组不同的符号序列,设每一种符号序列出现的概率为 P_i ,再将 n 种不同符号序列按照 Shannon 信息熵形式归一化后,便得到排列熵的定义式。

将排列熵值用 H_{PE} 表示,其表达式为

$$H_{PE}(D) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i}{\ln(D!)}. \quad (3)$$

通常情况下,嵌入维数 D 的取值为 $3 \leq D \leq 7$ ^[27],本文选取 $D = 5$ 。 H_{PE} 值越接近 1,表示混沌信号的复杂度越高。

激光源的稳定性一般由激光器输出功率的标准差来描述,但采用功率表征结果不够准确,因此为度量混沌系统的稳定性,对同一状态下 $n (n = 50)$ 组数据的排列熵进行标准差分析,得到排列熵标准差 (SDOPE; R_{SDOPE}),其表达式如下:

$$R_{SDOPE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{PE,i} - \bar{H}_{PE})^2 / n}, \quad (4)$$

式中: $H_{PE,i}$ 表示第 i 组数据的排列熵; \bar{H}_{PE} 表示 n 组数据排列熵的均值。

另外,自相关函数作为判断混沌信号优劣的重要指标之一,其定义式为

$$C(T) = \frac{\langle [I_r(t) - \bar{I}_r][I_r(t+T) - \bar{I}_r] \rangle}{[\langle [I_r(t) - \bar{I}_r]^2 \rangle \langle [I_r(t+T) - \bar{I}_r]^2 \rangle]^{1/2}}, \quad (5)$$

式中: T 为延迟时间; I_r 为示波器导出的时间波形; \bar{I}_r 为时间序列的均值。自相关函数代表信号的相似程度,混沌信号的相关函数在零时延处相关峰为 1,其他时延处接近 0,因此优质的混沌信号在非零时延处越接近 0,即噪声基底薄。

3 结果与讨论

对主、从激光器的混沌信号进行排列熵以及排列熵标准差分析,图 2 所示为主、从激光器在不同泵浦电流下混沌信号的排列熵 H_{PE} 及排列熵标准差 R_{SDOPE} 。可以看到,在 240~280 mA 的电流范围内,混沌信号复杂度降低,稳定性变差。图 2(a)插图为泵浦电流为 280 mA 和 420 mA 时混沌信号的自相关图,可见 280 mA 泵浦电流下混沌信号自相关图的噪声基底较厚,表示该状态下混沌信号的周期成分较多,其 H_{PE} 为 0.976;另外,该条件下 R_{SDOPE} 较大,混沌信号不稳定。420 mA 泵浦电流下混沌信号的 H_{PE} 较大,且 R_{SDOPE} 较小,表明该状态下混沌信号稳定且复杂度高,混沌特性优良。从激光器的 H_{PE} 值随泵浦电流的增加逐渐增大,且 R_{SDOPE} 值稳定在 0.0012 以下。综上考虑,将从激光器的泵浦电流固定为 450 mA。

固定主、从激光器的泵浦电流不变,通过调节可调滤波器改变主、从激光器的波长失谐,确定锁定范围。图 3(a)所示为主、从激光器在不同波长失谐下的光谱。假设主、从激光器波长一致时波长失谐为 0,从激光器波长大于主激光器波长的部分为正失谐,小于主激光器波长的部分为负失谐。由图 3(a)可知,在 $-0.7 \sim 0.9$ nm 的波长失谐范围内,激光器输出光谱从双峰转变为单峰再变为双峰。在

−0.3~0.3 nm 的失谐范围内激光输出呈现单波长,因此将系统锁定在该范围内。该范围内混沌信号的 H_{PE} 和 R_{SDOPE} 如图 3(b)所示。 H_{PE} 值保持在

0.993 附近,同时 R_{SDOPE} 值也在 0.0012 以下,表明在这个范围内混沌信号复杂度高,且具有较高的稳定性。因此将波长失谐保持在 0.2 nm。

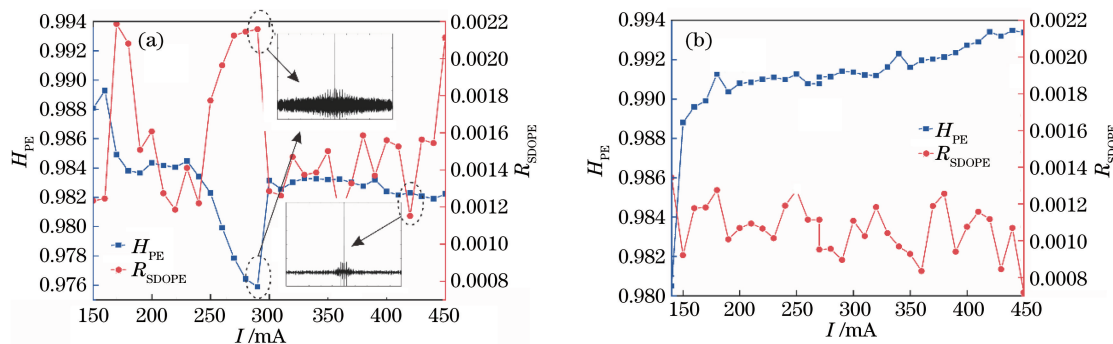


图 2 激光器混沌输出的 H_{PE} 和 R_{SDOPE} 随泵浦电流的变化,插图分别表示泵浦电流为 280 mA 和 420 mA 时混沌信号的自相关曲线。(a)主激光器;(b)从激光器

Fig. 2 H_{PE} and R_{SDOPE} values of chaotic laser output varying with different pump currents, the insets show the autocorrelation of chaotic signals with pump current of 280 mA and 420 mA respectively. (a) Master laser; (b) slave laser

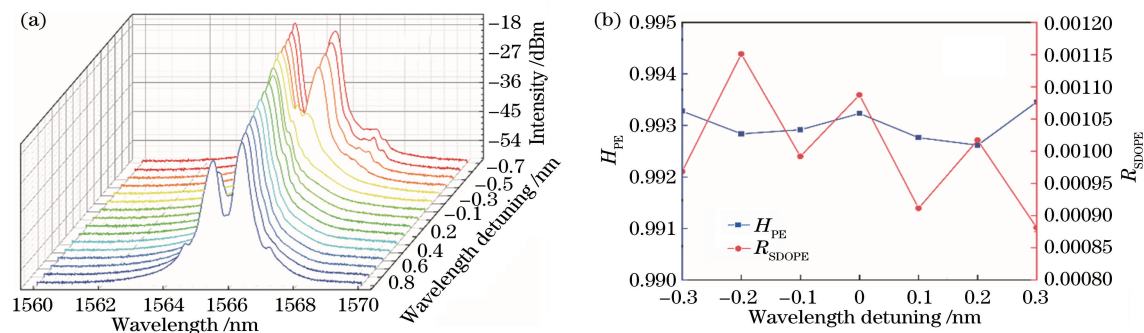


图 3 不同波长失谐下混沌信号输出光谱及 H_{PE} 和 R_{SDOPE} 。(a)输出光谱;(b) H_{PE} 和 R_{SDOPE}

Fig. 3 Output spectra, H_{PE} , and R_{SDOPE} of chaotic signals with different wavelength detuning.

(a) Output spectra; (b) H_{PE} and R_{SDOPE}

为探究不同注入功率比对混沌信号的影响,固定从激光器的泵浦电流为 450 mA,稳定主、从激光器波长失谐为 0.2 nm,将不同的主激光器输出功率注入从激光器。如图 4 所示,在功率注入比从 0.03

增大到 0.16 的过程中, H_{PE} 值保持稳定,始终保持在 0.992 附近,且不同注入比对其影响不大。同时, R_{SDOPE} 值稳定在 0.0012 以下,说明光注入后的混沌信号具有较高的稳定性。

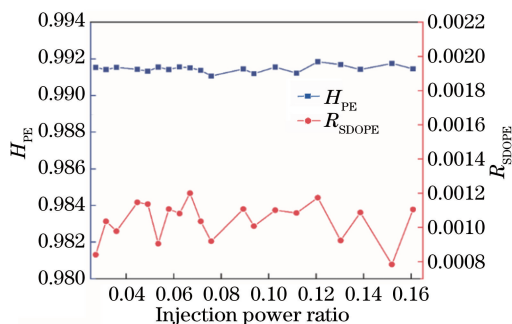


图 4 从激光器输出混沌信号的 H_{PE} 和 R_{SDOPE} 随注入功率比的变化

Fig. 4 H_{PE} and R_{SDOPE} of chaotic signals changed with different injection power ratios

为更详细地分析注入后混沌信号的基本特性,对其进行时序、频谱、自相关特性分析。图 5 所示为注入功率比为 0.15 时混沌信号的基本特性。图 5(a)为示波器采集的经过 PD 转换的归一化电压信号时序图。图 5(b)为对时序图进行傅里叶变换后的频谱图:在 0~0.2 GHz 的范围内,频谱较为平坦;在 0.2~0.5 GHz 范围内频谱存在一定的周期波动;在 0.5~1 GHz 范围内由于 PD 的限制,频谱呈现逐渐下降的趋势。图 5(c)所示的自相关曲线显示出良好的 δ 特性。与混沌半导体激光器相比,由于光纤激光器的谐振腔较长,在较大的时延范围内自相关曲线上没有出现由腔长导致的时延旁瓣,但在主峰旁边存在小杂峰。

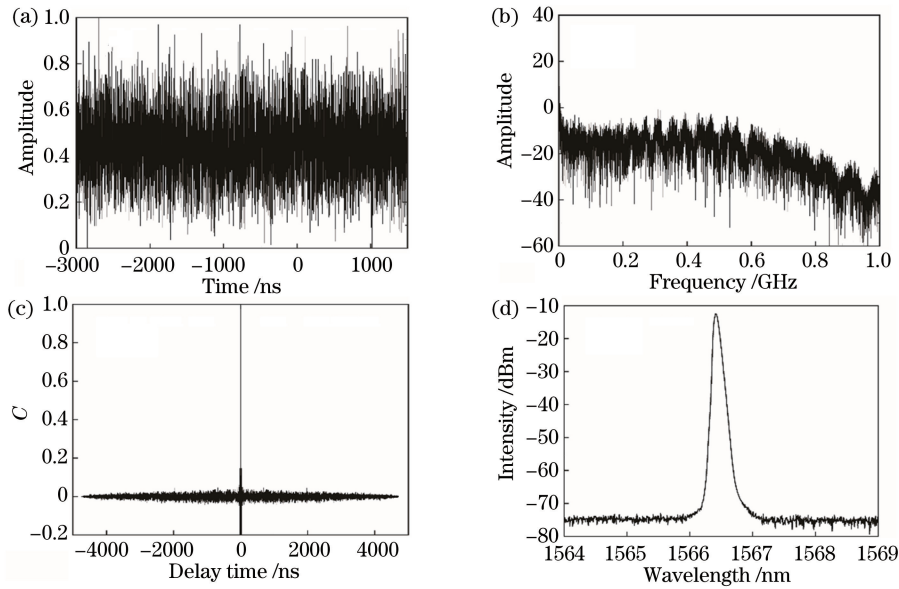


图 5 注入功率比为 0.15 时混沌信号的基本特性。(a)时序图;(b)频谱图;(c)自相关图;(d)光谱图

Fig. 5 Basic characteristics of chaotic signal when the injection power ratio is 0.15. (a) Sequence diagram; (b) RF spectrum; (c) autocorrelation curve; (d) spectrum

为进一步分析混沌特性,对图 5 获得的信号进行细节分析。图 6(a)所示为时间序列的频数分布及其高斯拟合结果。从拟合曲线可见该混沌信号的幅度呈高斯分布。图 6(b)为外光注入后混沌信号在 0.2~0.5 GHz 频率范围内的频谱图,图 6(c)为

外光注入后混沌信号在 -40~40 ns 时延范围内的自相关图。可以看到,频谱图在 0.2~0.5 GHz 的频率范围存在周期性波动,其频率 f 约为 0.04 GHz,因此在相关函数上存在 $\tau = 1/f = 25$ ns 的时延特征。

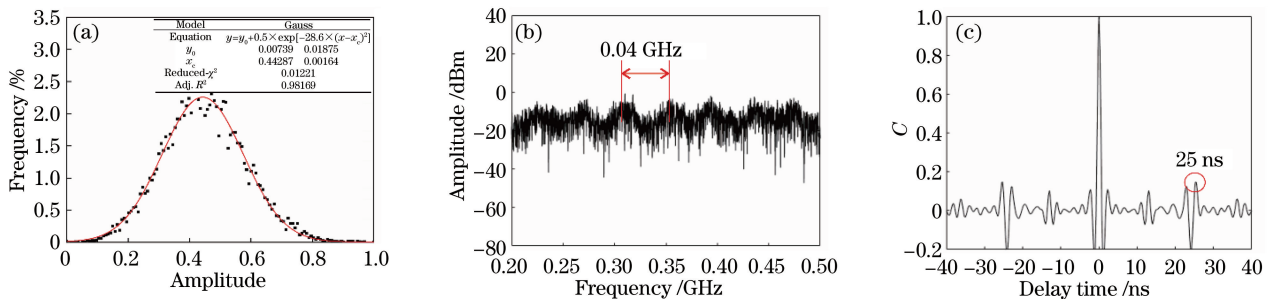


图 6 外光注入后混沌信号的特性。(a)时序频数分布及高斯拟合曲线;(b)频谱图;(c)自相关曲线

Fig. 6 Characteristics of chaotic signal after optical injection. (a) Time series frequency distribution and Gaussian fitting curve; (b) RF spectrum; (c) autocorrelation curve

4 结 论

为实现混沌光纤激光器的高复杂度与高稳定性,构建了一个具有环形腔结构的主从式混沌光注入掺铒光纤激光器装置,采用外光注入技术对混沌系统进行改进,将混沌光注入掺铒光纤激光器,研究了外光注入对混沌光纤激光器的影响。实验结果显示:主、从激光器波长失谐在 -0.3~0.3 nm 的范围内,注入功率比在 0.03~0.16 的范围内,混沌信号的排列熵稳定在 0.99 以上,排列熵标准差小于

0.0012,表明注入后的混沌信号在拥有高复杂度的同时,获得了更高的稳定性。通过对注入后的混沌信号进行特性分析,获得了时序、频谱以及自相关特性较为优良的混沌信号。此外,研究了不同注入比对混沌激光的影响,该结果对混沌光纤激光器技术研究与应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Fan M Q, Wang Z N, Wu H, et al. Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all optical chaotic source

- [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9655: 965548.
- [2] Ma Z, Zhang M J, Liu H, et al. Distributed optical fiber temperature sensing based on chaotic light Brillouin scattering [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(6): 586-593.
马喆, 张明江, 刘慧, 等. 混沌激光布里渊散射的分布式光纤温度传感[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015, 32(6): 586-593.
- [3] Song Y M, Xia L, Wu Y. The interrogation of quasi-distributed optical FBG sensing system through adopting a wavelength-tunable fiber chaotic laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2435-2442.
- [4] Yang L Z, Yang J J, Yang Y, et al. Optical sensors using chaotic correlation fiber loop ring down[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2031-2037.
- [5] Qin C, Yang L Z, Yang J J, et al. Temperature sensing based on chaotic correlation fiber loop ring down system[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 141-146.
- [6] Tian J, Yang L Z, Qin C, et al. Refractive index sensing based on chaotic correlation fiber loop ring down system using tapered fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 4215-4220.
- [7] Silakhori K, Behjat A, Soltanmoradi F, et al. A compact injection-locked single longitudinal mode TEA CO₂ laser [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5777: 433-437.
- [8] Liu Z X, Slavik R. Optical injection locking: from principle to applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(1): 43-59.
- [9] Lau E K, Zhao X X, Sung H K, et al. Strong optical injection-locked semiconductor lasers demonstrating >100-GHz resonance frequencies and 80-GHz intrinsic bandwidths [J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6609-6618.
- [10] Wang X G, Zhao B B, Grillot F, et al. Frequency noise suppression of optical injection-locked quantum cascade lasers [J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15167-15176.
- [11] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20124-20133.
- [12] Liu G, Jin X, Chuang S L. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers using an injection-locking technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(5): 430-432.
- [13] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, et al. Period-doubling route to chaos in a semiconductor laser subject to optical injection [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(26): 3539-3541.
- [14] Eriksson S, Lindberg A M. Observations on the dynamics of semiconductor lasers subjected to external optical injection [J]. Journal of Optics B, 2002, 4(2): 149-154.
- [15] Yan S L. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 996-1001.
颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(4): 996-1001.
- [16] Liu Z X, Matsui Y, Schatz R, et al. 50-GHz repetition gain switching using a cavity-enhanced DFB laser assisted by optical injection locking [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 1844-1850.
- [17] Fang X H, Wang D N, Chen J W, et al. Tunable dual-wavelength optical short pulse generation in a mutual pulse injection-SEEDING scheme [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 67-71.
方晓惠, 王东宁, 陈吉武, 等. 互注入锁定产生双波长可调谐光脉冲的实验研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(1): 67-71.
- [18] Li Y Y, Yang N, Chu W D. Optical injection characteristics of terahertz quantum cascade lasers [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(3): 359-363.
李源远, 杨宁, 楚卫东. 太赫兹量子级联激光器光注入特性 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(3): 359-363.
- [19] Han H, Zhang M J, Shore K A. Chaos bandwidth enhancement of Fabry-Pérot laser diode with dual-mode continuous-wave optical injection [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(3): 1-8.
- [20] Zhang X, Zhu N H, Xie L, et al. A stabilized and tunable single-frequency erbium-doped fiber ring laser employing external injection locking [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(4): 1027-1033.
- [21] Tistomo A S, Gee S. Laser frequency fixation by multimode optical injection locking [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1081-1090.
- [22] Kuse N Y, Ozawa A, Nomura Y, et al. Injection locking of Yb-fiber based optical frequency comb [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10509-10518.
- [23] Niang A, Amrani F, Salhi M, et al. Harmonic mode-locking in a fiber laser through continuous external optical injection [J]. Optics Communications, 2014, 312: 1-6.
- [24] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17): 174102.

- [25] Yan S L. 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): 013106.
- [26] Jiang L, Xia G Q, Wu J G, et al. Optimization analysis on complex degree of optical chaos in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1202003. 蒋龙, 夏光琼, 吴加贵, 等. 双光反馈半导体激光混沌高复杂度优化分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202003.
- [27] Yang H H, Yang L Z, Zhang J, et al. Chaos complexity of erbium-doped chaotic fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0714002. 杨欢欢, 杨玲珍, 张俊, 等. 掺铒光纤环形激光器混沌复杂度分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (7): 0714002.