【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

色散反馈微腔激光器产生无时延特征宽带混沌

王骅宣^{1,2}, 王大铭^{1,2}, 贾志伟^{1,2}, 王安帮^{1,2}

1) 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西太原 030024;

2) 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030024

摘要: 提出并数值验证了利用啁啾光纤光栅反馈弧边六角形微腔激光器产生宽带、无时延特征的混沌激光。通过 Lang-Kobayashi 方程建立啁啾光纤光栅反馈下的弧边六角形微腔激光理论模型, 研究弧边六角形微腔激光器偏置电流、反馈强度及啁啾光纤光栅色散系数对混沌激光带宽及反馈时延特征的影响。结果表明, 微腔激光器在具有宽带平坦调制响应特性的高偏置电流情况下, 通过啁啾光纤光栅色散反馈可以产生无时延特征的宽带混沌, 带宽可达 14 GHz。

关键词: 光学工程; 半导体激光器; 混沌; 微腔激光器; 啁啾光纤布拉格光栅; 时延特征

中图分类号: TN248.2; O437 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.03252

Generation of wideband chaos without time delay signature using the microlaser with dispersive optical feedback

WANG Yixuan^{1,2}, WANG Daming^{1,2}, JIA Zhiwei^{1,2}, and WANG Anbang^{1,2}

1) Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

2) College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

Abstract: We propose and numerically demonstrate a method of generating wideband chaos laser without time delay signature by using a circular-side hexagonal resonator (CSHR) microlaser with optical feedback from a chirped fiber Bragg grating (CFBG). The theoretical model of the circular-side hexagonal resonator microlaser with chirped fiber Bragg grating feedback is established according to the Lang-Kobayashi equations. The effects of bias current, feedback strength and CFBG dispersion on the bandwidth of the chaos laser and the feedback time delay signature are investigated. The results show that the CFBG-feedback CSHR microlaser can generate a wideband chaos without feedback time-delay signature under the condition of high bias current with a wideband and flat small-signal modulation response and the bandwidth can reach 14 GHz.

Key words: optical engineering; semiconductor laser; chaos; microcavity laser; chirped fiber Bragg grating; time delay signature

Received: 2020-05-25; **Accepted:** 2020-06-02

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61822509, 61731014, 61927811); Shanxi Talent Program (201805D211027); Key R & D Program of Shanxi Province (201903D421012); Shanxi "1331 Project" Key Innovative Research Team; Program for the Top Young and Middle-aged Innovative Talents of Higher Learning Institutions of Shanxi Province

Corresponding author: Professor WANG Anbang. E-mail: wanganbang@tyut.edu.cn

Citation: WANG Yixuan, WANG Daming, JIA Zhiwei, et al. Generation of wideband chaos without time delay signature using the microlaser with dispersive optical feedback [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(3): 252-257. (in Chinese)

混沌激光在保密通信^[1]、物理随机密钥生成^[2]、密钥分发^[3]和激光测距^[4]等领域具有重要应用. 光反馈半导体激光器具有结构简单且易于集成的优点, 常被用作混沌光源^[5], 然而激光器的混沌振荡通常以弛豫振荡为主, 大部分能量集中于弛豫振荡频率附近, 导致混沌信号带宽受限. 此外, 激光器端面和反馈镜之间的外腔谐振使混沌信号具有明显的反馈时延特征 (time delay signature, TDS)^[6], 导致系统参数泄露. 有限带宽和明显时延特征限制了混沌激光应用于保密通信中的速率和安全性, 以及随机数的产生速率和可靠性.

目前, 增强混沌激光带宽的主要方法包括采用光注入^[7]、互注入^[8]、相位共轭反馈^[9]、延迟干涉自相位调制反馈^[10]、光纤环形谐振器^[11]及光外差或电外差结构^[12]等. 抑制混沌激光 TDS 的主要途径为增加反馈腔的复杂度, 如双外腔反馈^[13]、腔长调制反馈^[14], 或引入如光栅反馈^[15]和延迟自干涉^[16]等的非线性反馈. 从实际应用需求角度, 探索能够同时增强带宽, 抑制时延特征, 并且结构简单的混沌激光产生方法具有重要意义.

光反馈激光器的混沌频谱类似于激光器的调制响应曲线^[7], XIAO 等^[17]报道了新型单模弧边六角形谐振 (circular-side hexagonal resonator, CSHR) 微腔半导体激光器, 该激光器在高偏置情况下具有宽带平坦的调制响应曲线. 因此, 本研究提出啁啾光纤光栅反馈弧边六角形微腔激光器, 并利用该激光器的宽带平坦调制响应特性和啁啾光纤光栅色散反馈, 产生无反馈时延特征的宽带混沌激光.

1 理论模型

啁啾光纤布拉格光栅 (chirped fiber Bragg grating, CFBG) 反馈 CSHR 微腔激光器的原理如图 1. 微腔激光器输出光经 CFBG 色散反馈后回到激光器, 使其产生混沌激光, τ 为激光到光栅的往返时间. 利用 CFBG 宽谱中的色散效应实现非线性反馈, 可以达到消除时延特征的目的^[18].

基于 Lang-Kobayashi 方程, 啁啾光纤光栅反馈

图 1 啁啾光纤光栅反馈 CSHR 微腔激光器示意图

Fig. 1 (Color online) Schematic diagram of the circular-side hexagonal resonator microlaser with a CFBG

CSHR 微腔激光器的速率方程为^[18-19]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1 + \alpha}{2} \left[\Gamma v_g g(n, s) - \alpha_i v_g - \frac{1}{\tau_{pc}} \right] E + \kappa_f \int_{t-T}^t h(t-t') E(t'-\tau) dt' \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\eta I}{q V_a} - A n - B n^2 - C n^3 - v_g g(n, s) s \quad (2)$$

其中, E 为激光电场的复振幅; n 为腔内载流子密度; $s = |E|^2$ 为光子数密度. 式(1)右侧第 2 项表示啁啾光栅色散光反馈, 被积函数为光栅响应函数 $h(t)$ 与延迟光场 $E(t-\tau)$ 的卷积; κ_f 为光反馈速率; T 为积分时间; α 为线宽增强因子; Γ 为光限制因子; $v_g = c/n_g$ 为模式群速度, n_g 为群折射率; α_i 为内损耗因子; $\tau_{pc} = Q/\omega$ 为冷腔光子寿命, Q 为品质因子; η 为内量子效率; I 为偏置电流; I_{th} 为阈值电流; V_a 为有源区体积. A 、 B 及 C 分别为缺陷复合系数、辐射复合系数及俄歇复合系数. 应变量子阱材料的增益系数 $g(n, s)$ 为

$$g(n, s) = \frac{g_0}{1 + \varepsilon s} \ln \left(\frac{n + N_s}{N_{tr} + N_s} \right) \quad (3)$$

其中, g_0 为材料增益; ε 为增益饱和因子; N_{tr} 为透明载流子浓度; N_s 为增益参数. 采用四阶龙格库塔法模拟速率方程, 模拟所用激光器参数为 $\tau = 3$ ns, $\alpha = 4$, $\Gamma = 0.25$, $n_g = 3.5$, $\alpha_i = 6$ cm⁻¹, $Q = 2 \times 10^4$, $V_a = 30$ μm⁻³, $\eta = 0.8$, $A = 1 \times 10^8$ s⁻¹, $B = 1 \times 10^{-10}$ cm³/s, $C = 1 \times 10^{-28}$ cm⁶/s, $g_0 = 1500$ cm⁻¹, $N_{tr} = 1.2 \times 10^{18}$ cm⁻³, $\varepsilon = 18/N_{tr}$, $N_s = 0.92 N_{tr}$.

模拟啁啾光纤光栅的反馈时, 首先将长度为 L 的啁啾光纤光栅等分为 M 个子光栅, 每个子光栅被视为均匀光栅, 通过传输矩阵法^[20-21]计算得到啁啾光栅的反射谱 $H(\omega)$, 再通过 $H(\omega) \cdot \text{FT}\{E(t-\tau)\}$ 的反傅里叶变化计算反馈光. 设线性啁啾光纤光栅的中心频率为 ω_c , 啁啾因子 $\xi = d\lambda/dz$ (单位为 nm·cm⁻¹), 相应的色散系数约为 $100/\xi$ ps·nm⁻¹. 对于第 j 个均匀子光栅, 根据 ω_c 与 C 计算其光栅布拉格频率 $\omega_j = \pi c/n_{\text{eff}} \Lambda_j$, 折射率分布为 $n_j = n_{\text{eff}} + \langle \delta n \rangle \{1 + \rho \cos(2\pi z/\Lambda_j)\}$. 其中, n_{eff} 为光纤有效折射率; $\langle \delta n \rangle$ 为平均折射率变化; ρ 为折射率调制的条纹可见度. 模拟中 $L = 10$ cm, $M = 200$, $n_{\text{eff}} = 1.46$, $\langle \delta n \rangle = 5 \times 10^{-4}$, $\rho = 1$.

2 数值模拟结果

2.1 CSHR 微腔激光器调制响应特性

图 2 为 CSHR 微腔激光器在不同偏置电流下的

小信号调制响应曲线^[22]. 当调制频率接近微腔激光器的弛豫振荡频率 f_R 时, 小信号响应曲线出现明显谐振峰. 当偏置电流 $I = 2I_{th}$ 时, 小信号调制响应曲线与传统的DFB半导体激光器类似, 存在明显的

图2 CSHR微腔激光器的小信号响应曲线

Fig. 2 Small-signal responses for the CSHR microlaser

弛豫振荡谐振峰, 弛豫振荡频率约为4.5 GHz. 当偏置电流 $I = 9I_{th}$ 时, 弛豫振荡频率增大至12 GHz, -3 dB带宽达15.5 GHz, 同时其阻尼强度增大, 致使激光器调制响应曲线变得平坦. 这种具有宽带调制响应特性的微腔激光器有望用于产生宽带的混沌激光.

2.2 啁啾光栅反馈 CSHR 微腔激光器的混沌特性

图3为CSHR微腔激光器在 $I = 2I_{th}$ 时的混沌特性. 可见, 混沌信号的频谱轮廓与图2调制响应曲线类似, 频谱中低频能量缺失, 弛豫振荡特征明显, 有效带宽不足.

图3(a)、(e)、(i)、图3(b)、(f)、(j)、图3(c)、(g)、(k)及图3(d)、(h)、(l)分别为激光器的光谱、时序、频谱和自相关函数(autocorrelation function, ACF). 图3(a)、(b)、(c)、(d)为镜面反馈(反馈速率 $\kappa_f = 8 \text{ ns}^{-1}$)时激光器的输

图3 CSHR微腔激光器在 $I = 2I_{th}$ 时的典型混沌特性

Fig. 3 Simulated typical chaos states of the CSHR microlaser biased with $I = 2I_{th}$

出特性. 混沌频谱在弛豫振荡频率处呈现尖峰, 能量集中在弛豫振荡频率的邻域之内, 如图 3 (c) 所示. 此外, 由于反馈外腔谐振, 局部频谱可观察到间隔 0.33 GHz 的谐振峰, 如图 3 (c) 插图所示. 由自相关曲线可见, 时延 $\tau = 3$ ns 处具有明显的相关峰, 通常用此相关峰的高度定量表征反馈时延特征. 图 3 (e)、(f)、(g)、(h) 与图 3 (i)、(j)、(k)、(l) 分别为 $\kappa_f = 18$ ns⁻¹、20 ns⁻¹ 的 CFBG 色散反馈结果, 其光栅带宽、反射率及色散系数分别为 0.24 nm、-0.03 dB 及 5 000 ps/nm. 对比图 3 (h) 与图 3 (d)、(l) 可见, CFBG 反馈可以消除反馈时延特征. 对比图 3 (g) 与图 3 (k) 可见, 随着反馈速率的增加, 混沌激光频谱略有加宽, 但增幅不显著. 这种结果与传统 DFB 半导体激光器十分相似^[18].

为了便于定量分析, 采用包含 80% 能量的中心

频带宽度来衡量混沌信号的带宽^[23], 由图 3 (g) 可见, 微腔激光器的带宽为 4.3 GHz. 根据 ACF 曲线在 $[\tau - 0.5, \tau + 0.5]$ 的相关峰高度来衡量反馈时延特征的强弱.

图 4 (a)、(e)、(i)、图 4 (b)、(f)、(j)、图 4 (c)、(g)、(k) 及图 4 (d)、(h)、(l) 分别为 CSHR 微腔激光器在偏置电流为 $9I_{th}$ 条件下的光谱、时序、频谱和自相关函数, 此时激光器的弛豫振荡频率达 12 GHz, 调制响应曲线如图 2. 由于偏置电流增大, 激光器出现相同动力学状态的反馈速率也需同时增大. 图 4 (a)、(b)、(c)、(d) 为 $\kappa_f = 18$ ns⁻¹ 的镜面反馈结果. 如图 4 (c) 所示, 混沌频谱能量分布不平衡, 大部分能量聚集在弛豫振荡频率附近, 且存在较强的外腔谐振峰. 如图 4 (d), ACF 曲线反馈时延处的峰值高达 0.68, 这是由于反馈强度较高导致的. 在同样反馈速率下, 啁啾光纤

图 4 CSHR 微腔激光器在 $I = 9I_{th}$ 时的典型混沌状态

Fig. 4 Simulated typical chaos states of the CSHR microlaser biased with $I = 9I_{th}$

光栅色散反馈可以消除时延特征, 并且获得较平坦的混沌频谱, 如图 4 (e)、(f)、(g)、(h), 这是由于微腔激光器在高偏置电流下的阻尼强度较大, 抑制了频谱中的弛豫振荡, 同时, CFBG 反馈消除了镜面反馈中外腔谐振峰对频谱的影响, 因此, 可以观察到较平坦的混沌频谱. 进一步增加 CFBG 反馈速率至 20 ns^{-1} , 不仅可以消除时延特征, 相比于图 3 (g) 所示的低偏置电流情况, 低频成分能量增大、频谱平坦, 计算可得其混沌带宽为 11.6 GHz .

2.3 外部反馈参量对混沌带宽和反馈时延特征的影响

图 5 (a) 和 (b) 分别为反馈速率和偏置电流对混沌带宽的影响. 由图 5 (a) 可见, 混沌带宽随反馈速率的增加而增大, 在高偏置电流下带宽增加地更快并趋于稳定. 由图 5 (b) 可见, 当反馈速率固定时, 混沌带宽随偏置电流增加先增大后减小. 这是由于电流增加同时增大了弛豫振荡及弛豫振荡阻尼系数, 后者在达到某个临界值时会降低混沌状态复杂度, 从而使混沌带宽值回落. 当反馈速率较低 (20 ns^{-1}) 时, 高偏置电流下的激光器处于弱混沌状态, 弛豫振荡特征较明显, 限制了混沌带宽.

图 6 为偏置电流分别为 $2I_{\text{th}}$ 和 $9I_{\text{th}}$ 时, TDS 随反馈速率的变化趋势. CFBG 色散为 5000 ps/nm . 对于镜面反馈微腔激光器, 在低偏置电流 $I = 2I_{\text{th}}$ 时,

图 5 反馈速率和偏置电流对混沌带宽的影响

Fig. 5 Chaos bandwidth as function of feedback rate and bias current

TDS 随着反馈速率的增大, 先减小后逐渐增大; 在高偏置电流 $I = 9I_{\text{th}}$ 时, 时延特征更加明显, 时延特征峰值始终大于 0.55. 对于 CFBG 反馈微腔激光器, 随着反馈速率的增加, TDS 迅速减小至背景噪声且不再增加. 图 6 (c) 为 $\kappa_f = 25 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同色散的 CFBG 对 TDS 的影响. 可见, TDS 随着 CFBG 色散的增加逐渐减小至噪声水平. 由以上结果可知, 在高偏置电流下, 时延特征更快降低至噪声水平, 即消除时延特征所需的最小色散系数更低, 这是由于高偏置电流可以增大弛豫振荡频率, 而消除 TDS 的临界色散会和弛豫振荡频率成反比^[24].

图 6 外部参数对 TDS 的影响

Fig. 6 Numerical results of the TDS as function of external parameters

结 语

本研究提出一种啁啾光纤光栅反馈弧形六角微腔激光器产生宽带无周期混沌激光的方法, 并数值研究外部参数对混沌激光带宽和时延特征的影响. 当偏置电流较低时, 微腔激光器输出的混沌信号与传统 DFB 激光器类似; 当偏置电流较高时, 利用弧形六角微腔激光器高弛豫振荡频率和弱弛豫振荡响

应的特点, 可增强混沌激光低频部分能量, 获得带宽为 14 GHz 且无时延特征的混沌激光, 对于混沌保密通信、密钥分配及随机数生成等相关应用具有重要意义.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61822509、61731014、61927811); 山西省人才计划资助项目 (201805D211027); 山西省重点研发计划资助项目 (201903D421012); 山西省“1331 工程”重点创新研究团队计划资助项目; 山西省高等学校中青年拔尖创新人才计划资助项目

作者简介: 王驿宣 (1995—), 太原理工大学硕士研究生. 研究方向: 宽带混沌激光的产生与应用.
E-mail: wangyixuan_tyut@163.com

引文: 王驿宣, 王大铭, 贾志伟, 等. 色散反馈微腔激光器产生无时延特征宽带混沌[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(3): 252-257.

参考文献 / References:

- [1] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
- [2] LI Xiaozhou, LI Songsui, ZHUANG Junping, et al. Random bit generation at tunable rates using a chaotic semiconductor laser under distributed feedback [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3970-3973.
- [3] JIANG Nin, XUE Chenpeng, LIU Ding, et al. Secure key distribution based on chaos synchronization of VCSELs subject to symmetric random-polarization optical injection [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1055-1058.
- [4] DONG Xiangyu, WANG Anbang, ZHANG Jianguo, et al. Combined attenuation and high-resolution fault measurements using chaos-OTDR [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-6.
- [5] UCHIDA A. Optical communication with chaotic lasers: applications of nonlinear dynamics and synchronization [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [6] RONTANI D, LOCQUET A, SCIAMANNA M, 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.
- [7] WANG Anbang, WANG Yuncai, WANG Juanfen. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1144-1146.
- [8] QIAO Lijun, LV Tianshuang, XU Yong, et al. Generation of flat wideband chaos based on mutual injection of semiconductor lasers [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5394-5397.
- [9] MERCIER E, WOLFERSBERGER D, SCIAMANNA M, et al. High-frequency chaotic dynamics enabled by optical phase-conjugation [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-6.
- [10] ZHAO Anke, JIANG Ning, LIU Shiqin, et al. Wideband complex-enhanced chaos generation using a semiconductor laser subject to delay-interfered self-phase-modulated feedback [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12336-12348.
- [11] WANG Anbang, WANG Yuncai, YANG Yibiao, et al. Generation of flat-spectrum wideband chaos by fiber ring resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(3): 031112.
- [12] WANG Anbang, WANG Bingjie, LI Lei, et al. Optical heterodyne generation of high-dimensional and broadband white chaos [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 531-540.
- [13] LEE M W, REES P, SHORE K A, et al. Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications [J]. *IEEE Proceedings. Part J, Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [14] SHAHVERDIEV E M, SHORE K A. Impact of modulated multiple optical feedback time delays on laser diode chaos synchronization [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(17): 3568-3572.
- [15] LI Songsui, LIU Qiong, CHAN S C. Distributed feedbacks for time-delay signature suppression of chaos generated from a semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1930-1935.
- [16] WANG Anbang, YANG Yibiao, WANG Bingjie, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [17] XIAO Zhizong, HUANG Yongzhen, YANG Yuede, et al. Single-mode unidirectional-emission circular-side hexagonal resonator microlasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1309-1312.
- [18] WANG Damin, WANG Longsheng, ZHAO Tong, et al. Time delay signature elimination of chaos in a semiconductor laser by dispersive feedback from a chirped FBG [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10911-10924.
- [19] LV X M, ZOU L X, HUANG Y Z, et al. Influence of mode Q factor and absorption loss on dynamical characteristics for semiconductor microcavity lasers by rate equation analysis [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(12): 1519-1525.
- [20] LONGHI S, MARANO M, LAPORTA P, et al. Propagation, manipulation, and control of picosecond optical pulses at 1.5 μm in fiber Bragg gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(11): 2742-2757.
- [21] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [22] COLDREN L A, CORZINE S W. Diode lasers and photonic integrated circuits [M]. New York, USA: Wiley, 1995.
- [23] LIN F Y, CHAO Y K, WU T C, et al. Effective Bandwidths of Broadband Chaotic Signals [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 1010-1014.
- [24] 王大铭. 色散反馈半导体激光器消除时延特征及其密钥空间增强[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
WANG Daming. Time delay signature elimination and key space enhancement in a semiconductor laser by dispersive feedback from a chirped FBG [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019. (in Chinese)

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 溯 心】