

激光与光电子学进展

级联啁啾光纤光栅反馈激光器产生宽带
无时延混沌激光王翔宇^{1,2}, 王龙生^{1,2}, 郭园园^{1,2}, 贾志伟^{1,2}, 王安帮^{1,2*}, 王云才^{3,4}¹新型传感器与智能控制教育部重点实验室(太原理工大学), 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;³广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006;⁴广东省光子学信息技术重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 提出并实验验证一种级联啁啾光纤光栅反馈半导体激光器产生宽带、无时延混沌激光的方法。在该方法中,级联啁啾光纤光栅的高色散引入不规则的外腔模式,破坏了外腔模式谐振,进而消除混沌信号的时延特征。此外,不规则的外腔模式与激光器内部模式拍频,引入了新的高频振荡,进而增强混沌信号的带宽。对比研究了单个与级联啁啾光纤光栅反馈系统中色散光反馈强度、激光器与光栅波长失谐对混沌信号带宽及其时延特征的影响。结果表明,在强反馈、负波长失谐的条件下,级联反馈系统具有更好的带宽增强与时延特征抑制效果,获得了 3 dB 带宽 12 GHz 且无时延特征的混沌信号。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 啁啾光纤光栅; 宽带混沌; 时延特征

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0314006

Generation of Wideband Chaos Without Time-Delay Signature via
Cascaded Chirped Fiber Bragg Grating FeedbackWang Xiangyu^{1,2}, Wang Longsheng^{1,2}, Guo Yuanyuan^{1,2}, Jia Zhiwei^{1,2},
Wang Anbang^{1,2*}, Wang Yunca^{3,4}¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education
(Taiyuan University of Technology), Taiyuan, Shanxi 030024, China;²College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan,
Shanxi 030024, China;³School of Information Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China;⁴Guangdong Provincial Key Laboratory of Photonics Information Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Using a semiconductor laser subjected to optical feedback from cascaded chirped fiber Bragg gratings (CFBGs), we propose and demonstrate a method for generating wideband chaos without a time-delay signature

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803500)、国家自然科学基金(61822509, 62035009, 61713014, 61927811, 61961136002, 61805170, 61805171, 61805168)、山西人才计划(201805D211027)、山西“1331 项目”重点创新研究团队、山西省高等学校优秀中青年创新人才计划、山西省重点研发计划国际科技合作项目(201903D421012)、广东省创新创业团队计划

通信作者: *wanganbang@tyut.edu.cn

(TDS). The high dispersion of cascaded CFBGs creates irregular external-cavity modes and destroys the resonance of external-cavity mode, eliminating the TDS of the chaotic signal. In addition, the irregular external-cavity modes beat with the internal-cavity modes of the laser, introducing new high-frequency oscillations, which enhances the bandwidth of the chaotic signal. The effects of the dispersive optical feedback strength and wavelength detuning between the laser and CFBG on bandwidth and TDS in feedback systems with single CFBG and cascaded CFBGs were compared in the experiment. The obtained results show that the feedback system with cascaded CFBGs exhibits better performances in bandwidth improvement and TDS suppression under strong feedback and negative wavelength detuning conditions. Finally, we experimentally obtained a TDS-free chaotic signal with a 3 dB bandwidth of 12 GHz.

Key words laser optics; semiconductor laser; chirped fiber Bragg grating; wideband chaos; time-delay signature

1 引言

混沌激光具有宽带、大幅度类噪声振荡、可同步、自相关类 delta 函数等特性,在保密通信^[1-2]、物理随机数产生^[3-5]、密钥分发^[6-8]、雷达^[9]、光时域反射仪^[10-11]等领域具有重要应用。镜面光反馈半导体激光器因其结构简单、易于集成而成为上述应用的首选混沌光源^[12],但该混沌源存在两个问题:一是激光器弛豫振荡占据混沌频谱的大部分能量,限制了带宽仅为数 GHz;二是激光器存在外腔模式谐振,使得混沌波形自相关在反馈时延处存在相关峰^[13-14],即时延特征(TDS),导致混沌信号具有弱周期性,复杂度受限。混沌信号带宽受限,制约了随机数产生速率以及雷达分辨率的提高^[9],而时延特征降低了保密通信的安全性以及随机数产生的可靠性^[4]。

为了解决上述问题,研究者们提出了多种方法来增强带宽或抑制 TDS。2003 年 Uchida 等^[15]通过单向光注入产生了 20 GHz 的宽带混沌;2009 年 Wang 等^[16]证明了光注入增强混沌带宽的路径;2017 年 Zhong 等^[17]利用滤波反馈,得到了带宽 30 GHz 的混沌信号;有源光反馈^[18]、光纤环谐振器^[19]等方法也实现了混沌带宽的增强。在 TDS 抑制方面,2005 年 Lee 等^[20]利用双腔反馈抑制了 TDS;2013 年, Wang 等^[21]通过非相干光延迟自干涉对 TDS 进行了抑制;2017 年 Xu 等^[22]利用随机分布反馈实现了 TDS 的隐藏;光栅反馈^[23]、双外腔反馈^[24]等方案也被提出用于抑制 TDS。除此之外,自相位调制反馈^[25]、双路滤波反馈与光注入结合^[26]等方法^[27]被相继报道用于同时增强带宽与抑制 TDS。

本课题组前期提出了光纤后向散射光反馈^[28]以及啁啾光纤光栅(CFBG)反馈抑制 TDS 的方法^[29]。基于上述工作基础,本文提出了一种级联

CFBG 反馈激光器产生宽带无时延混沌激光的方法。相比于单个 CFBG 反馈系统,级联反馈系统具有更加明显的带宽增强与时延特征抑制效果,实验获得了 3 dB 带宽 12 GHz 且无时延特征的混沌信号。

2 实验装置

图 1 为宽带无时延混沌激光产生的实验装置图。分布式反馈半导体激光器(DFB)由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后被光耦合器(OC)分为两路:一路(50%)作为输出光,另一路(50%)作为反馈光。在反馈光路上,CFBG 引入反馈时延与频率相关的反馈光并将其返回到激光器中产生混沌,反馈光的强度和偏振分别由可调光衰减器(VOA)和偏振控制器(PC)调节。DFB 激光器的阈值电流为 12.5 mA,通过激光器的电流源(ILX Lightwave LDX-3412)调节其偏置电流为 18.2 mA,输出光功率为 0.7 mW。温控源(ILX Lightwave LDT-5412B)设置为 23.5 °C 时,激光器自由运行的中心波长为 1549.49 nm,3 dB 线宽为 0.016 nm。CFBG-1 用于单个反馈实验,其中心波长为 1549.70 nm,线宽为 0.35 nm;CFBG-1 和 CFBG-2 用于级联反馈实验,色散通过相移法由矢量网络分析测得同为 2000 ps/nm,中心波长相差 0.05 nm,重叠部分 CFBG 线宽为 0.25 nm,级联 CFBG 中心波长为 1549.68 nm。混沌光输出的光谱由光谱分析仪(OSA, AQ6370D, YOKOGAWA, 日本, 0.02 nm)测量,频谱和时序经光电探测器(PD, XPDV21x0 (RA), FINISAR, 美国, 50 GHz)转换后分别由电频谱分析仪(ESA, FSW50, ROHDE & SPECTRUM, 德国, 50 GHz)和示波器(OSC, LABMASTER10ZI, LeCroy, 美国, 36 GHz, 80 GS/s)进行测量。

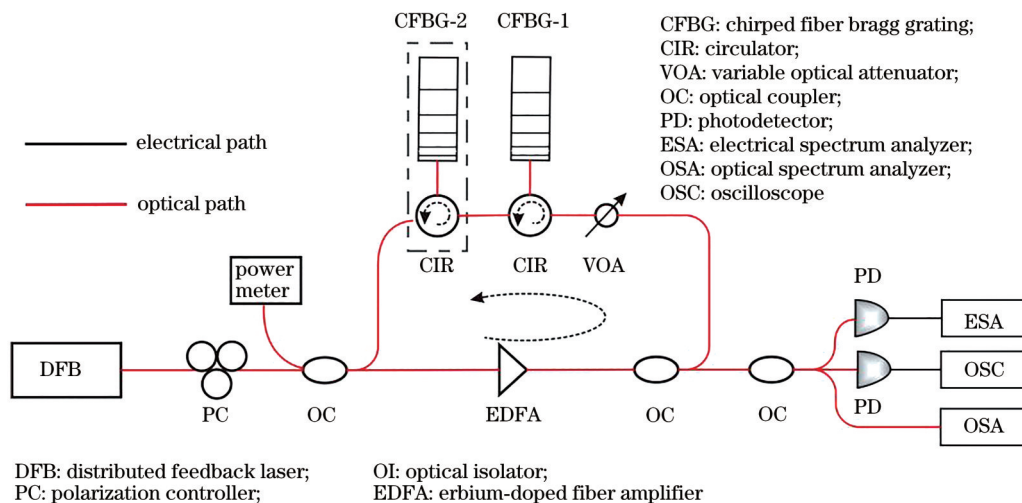


图 1 宽带无时延混沌激光产生的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for generating wideband and without time-delay signature chaos

3 实验结果分析

3.1 单个 CFBG 反馈

首先研究了单个 CFBG 反馈激光的混沌信号特征。此时,反馈强度 $\kappa_f=3.47$,定义为反馈光功率与激光器输出功率之比,反馈光功率由图 1 中功率计测得。图 2(a)为采用 CFBG-1 前后的混沌光谱以及 CFBG-1 的反射谱,可以看出在 CFBG-1 的作用

下光谱 3 dB 线宽由 0.085 nm 增加至 0.175 nm。图 2(b)为混沌信号频谱,其 3 dB 带宽为 9.8 GHz。该混沌带宽较镜面光反馈激光器^[1]输出混沌信号的带宽有所增加,主要原因是 CFBG-1 的色散群延时引入了不规则的外腔模式,这些模式与激光器内部模式拍频增加了高频成分。图 2(c)与图 2(d)分别为混沌信号的时序及其自相关。可以发现,在外腔反馈延迟 $\tau=220.3$ ns 处仍存在 TDS。上述结果表明,色散为

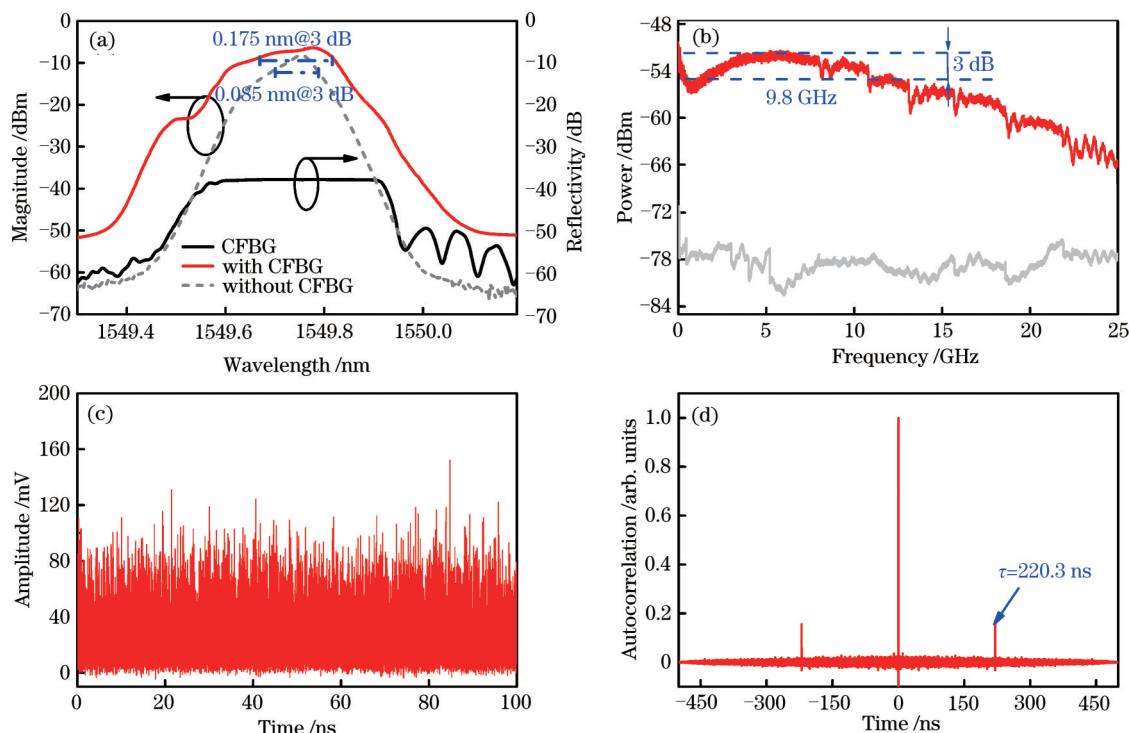


图 2 $\kappa_f=3.47$ 时,单个 CFBG 反馈激光器输出的混沌信号。(a)光谱;(b)频谱;(c)时序;(d)自相关

Fig. 2 Chaotic signal output by single CFBG feedback laser at $\kappa_f=3.47$. (a) Optical spectrum; (b) spectrum; (c) time series; (d) autocorrelation

2000 ps/nm 的 CFBG-1 引入的不规则外腔模式无法完全消除 TDS, 这与我们之前的研究结果一致^[29]。

接下来, 研究了 CFBG-1 光反馈强度以及激光器与 CFBG-1 波长失谐对混沌带宽与 TDS 的影响。图 3 为 CFBG-1 光反馈强度的影响结果。此时, 激光器与 CFBG-1 中心波长失谐 $\Delta\lambda = -0.19$ nm, $\Delta\lambda$ 定义为激光器自由运行时中心波长与 CFBG 中心波长之差。图 3(a) 中圆形点为 3 dB 带宽随反馈强度的变化结果, 曲线为数据拟合。可以发现, 随着反馈强度的增加, 带宽整体呈增加趋势, 反馈强度 $\kappa_f =$

3.47 时, 3 dB 带宽为 9.8 GHz。需要指出的是, 为了避免激光器损坏, 我们将反馈强度控制在激光器可承受范围内。图 3(b) 中方形点表示 TDS 随反馈强度的变化结果, 当 $\kappa_f > 0.5$ 时, TDS 均高于 0.1。星形点为自相关函数中背景噪声的 3 倍标准偏差, 当 TDS 峰值小于 3 倍标准偏差时, 可以认为其被消除。综上可知, 3 dB 带宽随着反馈强度的增加而增加, 与已报道的强光注入增强带宽结果相符^[30]; TDS 也在较大或较小的反馈强度下有所降低, 但是 CFBG 2000 ps/nm 的色散不足以完全消除 TDS。

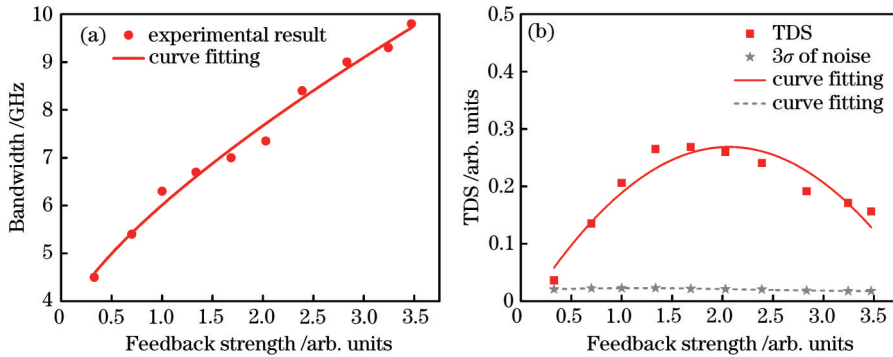


图 3 $\Delta\lambda = -0.19$ nm, 带宽与 TDS 随反馈强度的变化趋势。(a) 3 dB 带宽; (b) TDS

Fig. 3 Bandwidth and TDS as a function of optical feedback strength at $\Delta\lambda = -0.19$ nm. (a) 3 dB bandwidth; (b) TDS

图 4 为反馈强度 $\kappa_f = 3.47$ 时, 激光器与 CFBG-1 波长失谐对混沌带宽及 TDS 的影响。图 4(a) 中圆形点表示在波长失谐 $\Delta\lambda$ 为 $-0.28 \sim -0.09$ nm 范围内 3 dB 带宽的变化趋势: 随着波长失谐的增加, 带宽呈现先增加后减小的趋势。当波长失谐 $\Delta\lambda = -0.19$ nm 时, 3 dB 带宽值达到最大值

9.8 GHz。图 4(b) 中方形点为波长失谐对 TDS 的影响。为保证带宽, 本文在上述范围内研究波长失谐对 TDS 的影响。可以发现, 随着波长失谐增大, TDS 逐渐降低并趋于平稳。值得注意的是, TDS 在 CFBG 色散量为 2000 ps/nm 的情况下无法被完全消除。

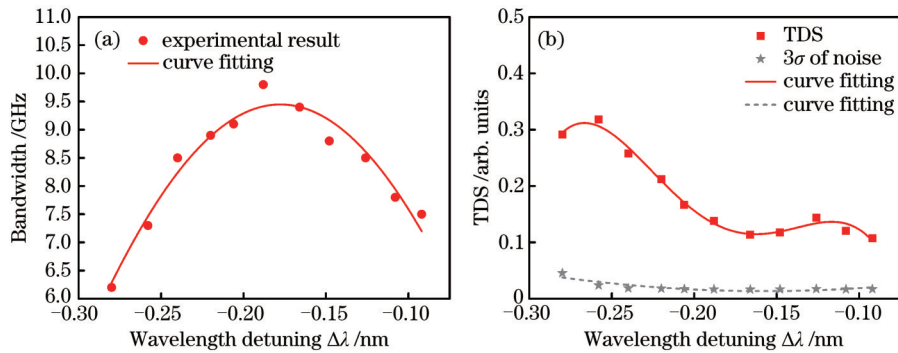


图 4 $\kappa_f = 3.47$ 时, 带宽与 TDS 随波长失谐的变化趋势。(a) 3 dB 带宽; (b) TDS

Fig. 4 Bandwidth and TDS as a function of wavelength detuning at $\kappa_f = 3.47$. (a) 3 dB bandwidth; (b) TDS

3.2 级联 CFBG 反馈

为了与单个 CFBG 反馈激光器进行对比, 我们进一步研究了级联 CFBG 反馈激光的混沌信号特征。此时, 反馈强度 $\kappa_f = 3.55$ 。图 5(a) 为混沌光谱以及级联 CFBG-1 和 CFBG-2 的反射谱。相比于单

个 CFBG 反馈激光器的混沌光谱 [图 2(a)], 级联结构下的混沌光谱进一步展宽——3 dB 线宽为 0.195 nm。原因是, 级联 CFBG1 与 CFBG-2 之后, 光栅色散增加, 导致色散群时延引入了更多的外腔模式。增加的外腔模式与激光器内部模式进行拍

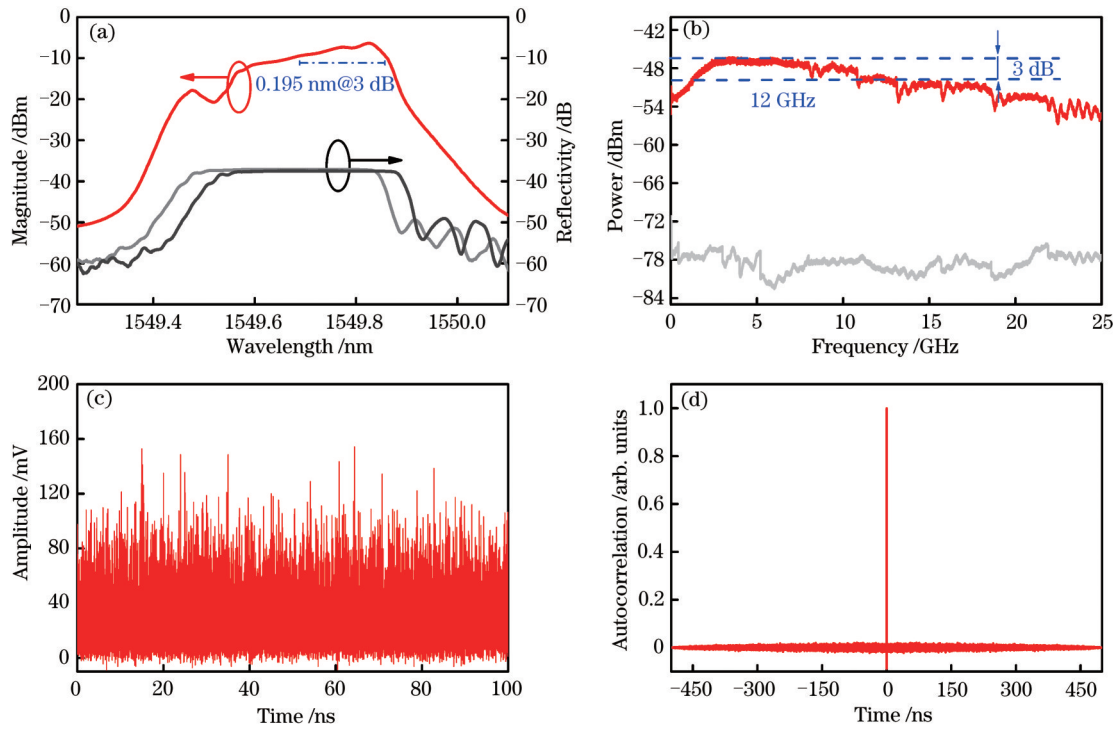


图 5 $\kappa_f = 3.55$ 时, 级联 CFBG 反馈激光器输出的混沌信号。(a) 光谱; (b) 频谱; (c) 时序; (d) 自相关

Fig. 5 Chaotic signal output from laser subjected to cascaded CFBG feedback at $\kappa_f = 3.55$. (a) Optical spectrum; (b) spectrum; (c) time series; (d) autocorrelation

频, 进一步提升高频成分。图 5(b) 为级联结构下的混沌信号频谱, 其 3 dB 带宽为 12 GHz。相较于单个 CFBG 反馈激光器的混沌频谱 [图 2(b)], 该带宽提升了 2.2 GHz。此时频谱带宽的主要限制原因如下: 1) 激光器的初始弛豫振荡频率较小 (约 2.5 GHz), 制约了拍频效应的最大带宽; 2) 级联 CFBG 反射谱变窄, 限制了外腔模式成分。图 5(c) 和图 5(d) 分别为混沌信号的时序及其自相关。可以发现, 在外腔反馈延迟处无明显 TDS (由于反馈回路中增加了 CFBG-2, 在反馈强度为 3.55, 中心波长失谐为 -0.14 nm 的情况下测得外腔延迟 τ

247.2 ns)。上述结果表明, 由于增加了约 1500 ps/nm 的色散, 级联 CFBG 反馈对外腔反馈光引入了足够的群延时, 进而破坏外腔模式谐振, 消除了 TDS。

接下来, 研究了级联 CFBG 光反馈强度以及激光器与级联 CFBG 波长失谐对混沌带宽与 TDS 的影响。图 6 为级联 CFBG 光反馈强度的影响结果, 激光器中心波长和级联 CFBG 中心波长失谐 $\Delta\lambda = -0.20$ nm。图 6(a) 中的圆形点为 3 dB 带宽随反馈强度的变化结果。可以看出, 随着反馈强度的增加, 带宽也随之增加。当反馈强度 $\kappa_f = 3.55$ 时,

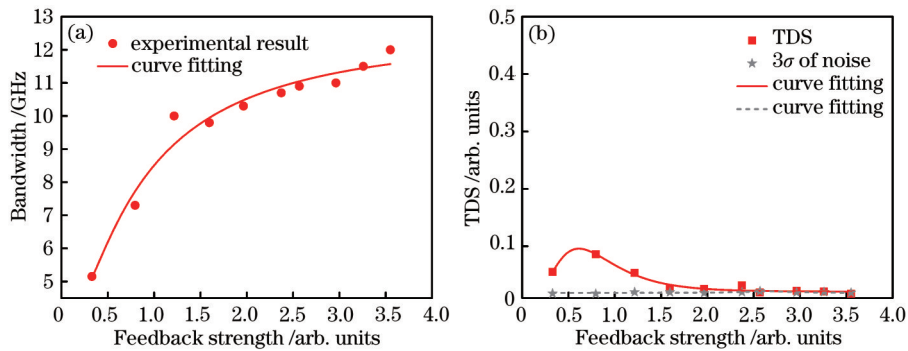


图 6 $\Delta\lambda = -0.20$ nm 时, 带宽与 TDS 随反馈强度的变化趋势。(a) 3 dB 带宽; (b) TDS

Fig. 6 Bandwidth and TDS as a function of optical feedback strength at $\Delta\lambda = -0.20$ nm. (a) 3 dB bandwidth; (b) TDS

3 dB 带宽为 12 GHz。图 6(b) 中的方形点为 TDS 随反馈强度的变化结果。随着反馈强度的增加, TDS 先增加后减小并趋于平稳。当反馈强度 $\kappa_f > 2.5$ 时, TDS 均低于 3 倍标准偏差, 即 TDS 被消除。

图 7 为反馈强度 $\kappa_f = 3.55$ 时, 激光器与级联 CFBG 波长失谐对混沌带宽及 TDS 的影响。图 7(a) 中的圆形点表示波长失谐 $\Delta\lambda$ 在 $-0.29 \sim -0.10$ nm 区间内, 3 dB 带宽的变化。可以发现, 随着波长失

谐的增加, 3 dB 带宽先增加后减小。在波长失谐 $\Delta\lambda = -0.20$ nm 的条件下, 3 dB 带宽达到了最大值 12 GHz。图 7(b) 中的方形点为波长失谐变化对 TDS 的影响。随着波长失谐增加, TDS 先减小后增加。波长失谐 $\Delta\lambda$ 在 $-0.22 \sim -0.17$ nm 范围内, 不规则外腔模式的主要成分可通过 CFBG 进入激光器, 实现 TDS 消除。需要注意的是, 上述波长失谐范围可同时保证获得宽带混沌。

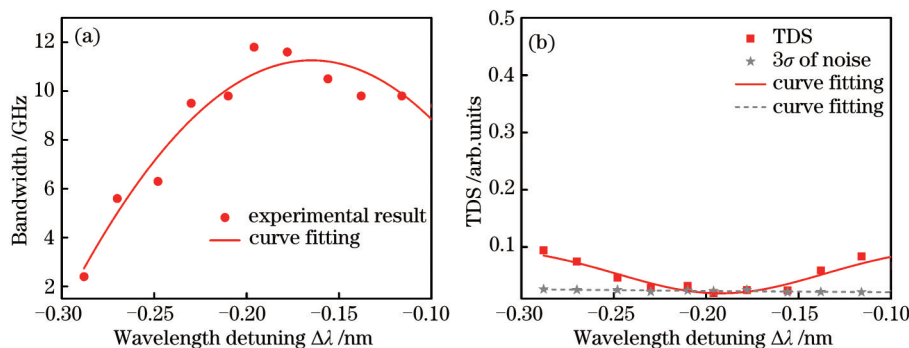


图 7 $\kappa_f = 3.55$ 时, 带宽与 TDS 随波长失谐变化趋势。(a) 3 dB 带宽; (b) TDS

Fig. 7 Bandwidth and TDS as a function of wavelength detuning at $\kappa_f = 3.55$. (a) 3 dB bandwidth; (b) TDS

4 结 论

本文提出了一种基于级联 CFBG 反馈激光器的宽带、无时延混沌激光产生方法。实验上利用 CFBG 色散引入的不规则外腔模式, 消除混沌信号的 TDS; 进一步, 不规则外腔模式与激光器内部模式拍频, 引入了新的高频振荡, 增强混沌信号的带宽。对比研究了单个 CFBG 反馈和级联 CFBG 反馈系统中反馈强度、波长失谐对带宽及 TDS 的影响: 单个 CFBG 反馈时, 3 dB 带宽增强至 9.8 GHz, TDS 受到抑制但并未消除; 级联反馈时, 3 dB 带宽增强至 12 GHz, TDS 被完全消除。本文提出的级联 CFBG 反馈激光器为混沌保密通信、物理随机数生成等应用提供了一种安全可靠的混沌源。

参 考 文 献

- [1] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 151-162.
- [2] 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.
- [3] Uchida A, Amano K, Inoue M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- [4] Li X Z, Li S S, Zhuang J P, et al. Random bit generation at tunable rates using a chaotic semiconductor laser under distributed feedback[J]. Optics Letters, 2015, 40(17): 3970-3973.
- [5] Yoshiya K, Terashima Y, Kanno K, et al. Entropy evaluation of white chaos generated by optical heterodyne for certifying physical random number generators[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3686-3698.
- [6] Koizumi H, Morikatsu S, Aida H, et al. Information-theoretic secure key distribution based on common random-signal induced synchronization in unidirectionally-coupled cascades of semiconductor lasers[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17869-17893.
- [7] Sasaki T, Kakesu I, Mitsui Y, et al. Common-signal-induced synchronization in photonic integrated circuits and its application to secure key distribution [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 26029-26044.
- [8] Wu M, Wang L S, Wang Y C, et al. Research on chaos resynchronization time of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210607.
- [9] 吴梅, 王龙生, 王云才, 等. 垂直腔面发射激光器的混沌同步恢复时间研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210607.
- [10] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.

- attenuation and high-resolution fault measurements using chaos-OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-6.
- [11] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [12] Toomey J P, Kane D M, McMahon C, et al. Integrated semiconductor laser with optical feedback: transition from short to long cavity regime[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18754-18762.
- [13] 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.
- [14] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, 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] Uchida A, Heil T, Liu Y, et al. High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11): 1462-1467.
- [16] Wang A B, Wang Y C, Wang J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1144-1146.
- [17] Zhong Z Q, Lin G R, Wu Z M, et al. Tunable broadband chaotic signal synthesis from a WRC-FPLD subject to filtered feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(17): 1506-1509.
- [18] Yang Q, Qiao L J, Zhang M J, et al. Generation of a broadband chaotic laser by active optical feedback loop combined with a high nonlinear fiber[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1750-1753.
- [19] Wang A B, Wang Y C, Yang Y B, et al. Generation of flat-spectrum wideband chaos by fiber ring resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(3): 031112.
- [20] 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]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [21] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [22] Xu Y P, Zhang M J, Zhang L, et al. Time-delay signature suppression in a chaotic semiconductor laser by fiber random grating induced random distributed feedback[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4107-4110.
- [23] Li S S, Liu Q, 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.
- [24] 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.
- [25] Jiang N, Zhao A K, Liu S Q, et al. Generation of broadband chaos with perfect time delay signature suppression by using self-phase-modulated feedback and a microsphere resonator[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5359-5362.
- [26] Li Z, Feng Y L, Yao Z H. Autocorrelation and bandwidth research of chaotic laser from semiconductor lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021405.
李增, 冯玉玲, 姚治海. 半导体激光器输出混沌光的自相关性及其带宽研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021405.
- [27] Zhang Y N, Xu A S, Feng Y L, et al. Chaos characteristics of the output from a semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214001.
张依宁, 徐艾诗, 冯玉玲, 等. 光电反馈半导体激光器输出光的混沌特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1214001.
- [28] Wang Y C, Wang A B, Zhao T. Generation of the non-periodic and delay-signature-free chaotic light[J]. *IEICE Proceeding Series*, 2014, 1: 126-129.
- [29] Wang D M, Wang L S, Zhao T, 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.
- [30] Qiao L J, Lü T S, Xu Y, et al. Generation of flat wideband chaos based on mutual injection of semiconductor lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5394-5397.