

50 GHz 宽带混沌信号发生器

吕天爽^{1,2}, 杨强^{1,2}, 于小雨^{1,2}, 乔丽君^{1,2}, 张建忠^{1,2}, 王涛^{1,2}, 汪钦³, 徐红春³, 张明江^{1,2*}

¹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;

²太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

³武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430070

摘要 基于放大自发辐射(ASE)噪声扰动和半导体激光器互注入的方法,设计并研制了一款 50 GHz 宽带混沌信号发生器。该信号发生器主要包括两个分布式反馈半导体激光器(DFB-SL)和一个半导体光放大器(SOA),利用 SOA 产生的 ASE 噪声扰动 SL 产生混沌激光,基于 SL 互注入的拍频效应进一步实现频谱整形和带宽增强。在反馈强度为 9.096%、频率失谐量为 32.75 GHz、耦合强度为 1.966 的状态下,信号发生器可以产生频谱带宽超过 50 GHz、平坦度为 ± 2.5 dB、光谱线宽为 0.56 nm 的混沌激光。高带宽、高平坦度的宽带混沌信号发生器的研制,解决了混沌激光存在的频谱不平坦、带宽窄等问题,将进一步推动混沌激光的产业化应用。

关键词 激光器; 混沌激光; 放大自发辐射扰动; 互注入; 带宽

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131403

50 GHz Broadband Chaotic Signal Generator

Lü Tianshuang^{1,2}, Yang Qiang^{1,2}, Yu Xiaoyu^{1,2}, Qiao Lijun^{1,2},

Zhang Jianzhong^{1,2}, Wang Tao^{1,2}, Wang Qin³, Xu Hongchun³, Zhang Mingjiang^{1,2*}

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;

³Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract Herein, a broadband chaotic signal generator with a bandwidth of 50 GHz is designed and developed, based on the perturbation of amplified spontaneous emission (ASE) noise in conjunction with semiconductor laser mutual injection. The generator primarily contains two distributed-feedback semiconductor lasers (DFB-SL) and one semiconductor optical amplifier (SOA). Chaotic laser is obtained by perturbing the SL with ASE noise generated by the SOA. In addition, the beating effect caused by the SL mutual injection is exploited to achieve spectrum shaping and bandwidth enhancement. With a feedback strength of 9.096%, frequency detuning of 32.75 GHz, and coupling strength of 1.966, the chaotic laser with a bandwidth exceeding 50 GHz, flatness of ± 2.5 dB, and linewidth of 0.56 nm is generated by the signal generator. This broadband chaotic signal generator, with large bandwidth and high flatness, solves the problems of uneven spectrum and narrow bandwidth of chaotic lasers, and further promotes the industrial application of chaotic laser.

Key words lasers; chaotic laser; amplified spontaneous emission perturbation; mutual injection; bandwidth

OCIS codes 140.3460; 140.1540; 140.5960

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61527819, 61705160, 61875146)、山西省高等学校中青年拔尖创新人才支持计划(163220114-S)、山西省“三晋学者”特聘教授(专家)支持计划(201617)、山西省回国留学科研人员资助(2016-036, 2017-052)

* E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

1 引言

混沌激光由于其类噪声、宽频谱等特性,在光纤故障检测^[1]、远程水位监测^[2]、激光雷达^[3]、保密通信^[4-6]、随机数产生^[4,7-10]、分布式光纤传感^[11]等方面得到了广泛应用。半导体激光器作为 B 类激光器,易于引入外部扰动产生混沌激光^[12-15],且具有体积小、寿命长、性能稳定等优点,成为混沌激光产生的重要光源。然而半导体激光器的弛豫振荡频率占据了混沌激光的主要能量,导致混沌激光存在频谱不平坦、带宽窄等问题。其中,带宽窄会限制随机数的生成速率^[7-8]和混沌激光雷达的分辨率^[3],频谱不平坦会限制电路采集和处理中的低频成分能量。为了解决上述问题,研究者们致力于宽带混沌激光的研究。

目前,宽带混沌激光的产生包括单光注入法、混沌激光注入法、光纤振荡环法、环形腔延迟干涉法等方法。比如:日本埼玉大学 Hirano 等^[8]将混沌激光注入另一个半导体激光器获得了带宽为 16 GHz 的混沌激光;太原理工大学 Wang 等^[16]将单光注入混沌激光器得到带宽为 16.8 GHz 的混沌激光,通过混沌光注入光纤环形谐振器得到带宽大于 26.5 GHz、平坦度为 ± 1.5 dB 的宽带混沌激光^[17];太原理工大学 Zhang 等^[18]通过双光注入 Fabry-Pérot 激光器,得到带宽为 32.3 GHz 的宽带混沌激光;西南大学 Wang 等^[19]将混沌信号注入高非线性光纤环中,利用其产生的非线性相移将带宽增大至 41.2 GHz;中国科学院半导体研究所 Zhang 等^[7]利用放大反馈半导体激光器芯片外加光纤环扰动,产生频谱范围大于 50 GHz、平坦度为 ± 3.6 dB 的宽带混沌激光。

但是,目前商用器件产生混沌激光的带宽和平坦度仍存在限制。为了实现宽带混沌激光的产业化应用,并进一步提高混沌激光的带宽和平坦度,本文基于半导体光放大器(SOA)的放大自发辐射(ASE)噪声扰动联合分布式反馈半导体激光器(DFB-SL)互注入,成功研制出了 50 GHz 宽带混沌信号发生器,其具有结构简单、性能稳定、易于调节等特性。该宽带混沌信号发生器通过控制反馈强度、频率失谐量、耦合强度,输出了频谱带宽为 50 GHz、平坦度为 ± 2.5 dB、光谱-20 dB 线宽为 0.56 nm 的混沌激光。此外,本文研究了混沌激光在不同频率失谐量下输出光谱和频谱的状态,实现了对混沌激光带宽的控制。

2 宽带混沌信号发生器的设计与研制

基于 ASE 噪声扰动联合互注入产生宽带混沌激光的实验装置图如图 1 所示,框内为宽带混沌信号发生器的内部结构图,宽带混沌信号由 b 端口输出。宽带混沌信号发生器的外壳尺寸为 250 mm \times 115 mm \times 270 mm,体积小,便于携带。采用两个波长和性能均相近的普通商用 DFB-SL(DFB-蝶形-14pin-1550,大连藏龙光电科技有限公司,中国),实现在合适的频率失谐和耦合强度下互注入产生宽带混沌激光。SL 及 SOA(SACH, Aeon 公司,美国)均焊接在自行设计的电路板上,并由自行设计的驱动源^[20]控制偏置电流和温度的变化,实现了 SL 输出功率和中心波长的调节,同时也实现了 ASE 噪声和互注入光功率的控制。系统中,SOA 产生的 ASE 噪声扰动 SL1 产生混沌激光,且 SOA 实现互注入光功率的双向放大,进而实现强光注入,有利于增强 SL 的拍频效果。偏振控制器(PC)控制偏振状态,可变光衰减器(VOA)控制耦合强度,隔离器(ISO,隔离度 ≥ 48 dB)防止外部光对激光器产生影响。

SL1 的输出经左 90:10 光纤耦合器后分为两路,90%路与 SOA 连接,ASE 噪声扰动 SL1 产生混沌激光,经 10%路输出。SOA 将 SL1 输出放大后通过 PC、VOA、右 90:10 光纤耦合器的 90%路与 SL2 连接,实现 SL1 与 SL2 的互注入,从而使 SL1 输出频谱平坦、宽带的混沌激光。

宽带混沌信号发生器共有 4 个端口,a、b 分别为 SL1 的监测端和输出端,c、d 分别为 SL2 的输出端和监测端。监测端通过光功率计(OPM, PM100D, Thorlabs 公司,美国)监测反馈光的变化,从而计算得到反馈强度和耦合强度的变化,且能防止反馈光强度太大而损坏激光器。反馈强度为 SL1 的反馈光功率与输出光功率的比值,耦合强度为 SL1 的注入光功率与输出光功率的比值。SL1 的输出端通过 80:20 光纤耦合器分为两路,20%路接入分辨率为 0.03 nm 的光谱分析仪(OSA, MS9740A, Anritsu 公司,日本),同时监测 SL1 输出光功率及中心波长的变化状态。80%路输出信号经掺铒光纤放大器(EDFA, CEFA-C-HG, Keopsys 公司,法国)放大后,通过 50:50 光纤耦合器分为两路。一路接入带宽为 50 GHz 的光电探测器 1(PD1, XPDV2120R-VF-FP, Finisar 公司,美国),PD1 将光信号转换为电信号后接入带宽为

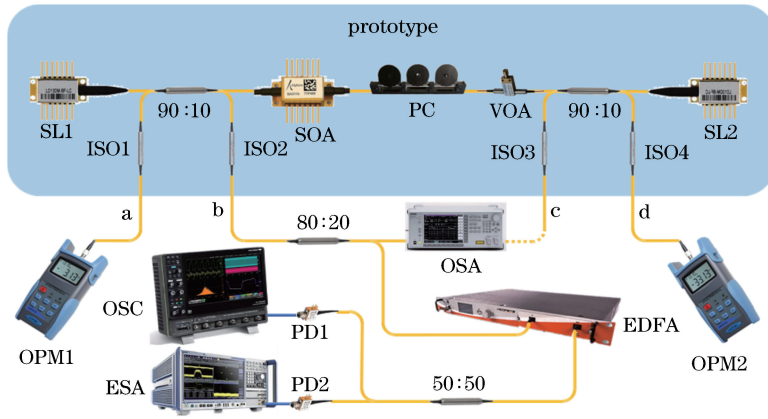


图 1 宽带混沌信号发生器实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram of broadband chaotic signal generator

50 GHz的频谱分析仪(ESA, FSW50, Rohde & Schwarz 公司, 德国), 监测其频谱状态变化; 另一路接入 PD2 和带宽为 36 GHz 的高速实时示波器(OSC, MCM-Zi-A, LeCroy 公司, 美国), 对输出信号的时间序列变化进行实时监控。SL2 的输出端接入 OSA 可监测其输出光功率及中心波长的变化, 从而得到频率失谐量 $\Delta\nu$ 的变化, 即 $\Delta\nu = \Delta\nu_2 - \Delta\nu_1$, 其中 $\Delta\nu_2$ 为 SL2 的中心频率, $\Delta\nu_1$ 为 SL1 的中心频率。

3 实验结果与分析

3.1 宽带混沌信号发生器的输出特性

宽带混沌信号发生器的输出特性如图 2 所示。图 2(a)所示为混沌信号的频谱, 受频谱仪带宽范围的限制, 带宽覆盖范围应超过 50 GHz, 平坦度为

± 2.5 dB。图 2(b)所示为混沌信号的光谱, -20 dB 线宽为 0.56 nm, 其线宽大幅度展宽。图 2(c)所示为混沌信号的时间序列, 呈现大幅值的随机分布, 峰-峰值电压为 22.7 mV。图 2(d)所示为混沌信号的相图, 其中 N 代表时间序列图中不同位置的幅值, 表征了混沌信号在相空间的幅值分布, 呈现出典型的混沌吸引子特性。

此时 SL1 的偏置电流为 1.3 倍阈值电流, 输出功率为 0.403 mW, 其温度控制在 25°C , 输出光谱的中心波长为 1548.177 nm。SL2 的偏置电流为 2.6 倍阈值电流, 输出功率为 1.87 mW, 其温度控制在 25.1°C , 输出光谱的中心波长为 1548.439 nm。SOA 的偏置电流为 1.5 倍阈值电流, 其 ASE 噪声输出为 0.04 mW。经计算可得, 此时的 SL1 的反馈强度为 9.096%, 耦合强度为 1.966, 频率失谐量为

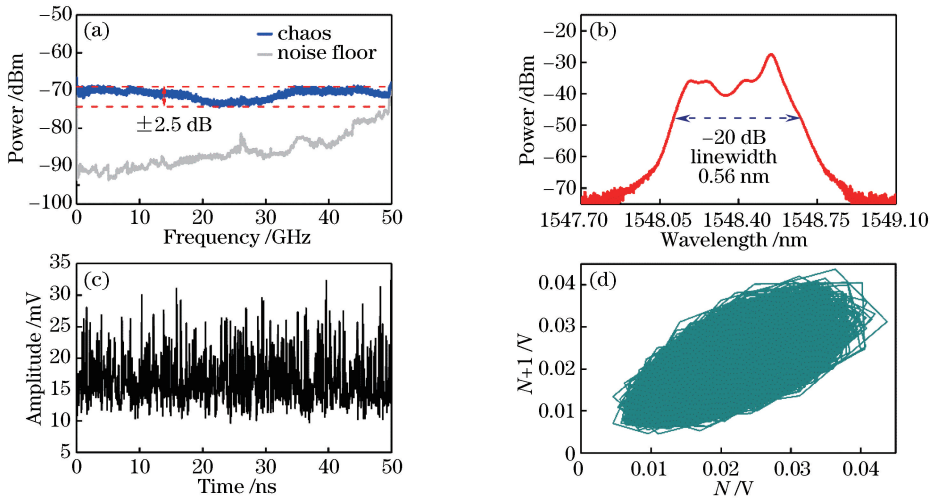


图 2 宽带混沌信号发生器输出特性。(a) 频谱; (b) 光谱; (c) 时间序列; (d) 相图

Fig. 2 Output characteristics of broadband chaotic signal generator. (a) Frequency spectrum; (b) optical spectrum; (c) time series; (d) phase diagram

32.75 GHz。从图 2 中可以看出,在恰当的频率失谐和耦合强度下,高频振荡得到激发,而且低频分量也得到极大的增强,从而实现混沌激光的频谱整形和带宽增强。而 ASE 噪声扰动引起激光场发生红移,且产生新的光频成分,光谱得以展宽,互注入时光波发生非线性作用,产生更多的新的光频成分,光谱进一步展宽。

3.2 负失谐时光谱和频谱的变化

负失谐时光谱和频谱随频率失谐量的变化见图 3,图 3(a)~(e)分别对应频率失谐量在 -51.75 GHz、

-44.12 GHz、-37.5 GHz、-29.5 GHz、-18 GHz 时的光谱、频谱变化。图 3(a1)中方点曲线为 SL1 自由输出光谱,其对应的中心波长如点虚线所示;圆点曲线为 SL2 自由输出光谱,其对应的中心波长如短虚线所示;曲线为 SL1 输出混沌激光的光谱。图 3(a2)中细曲线为频谱噪声底,粗曲线为 SL1 输出混沌激光的频谱。固定 SL1 的反馈强度为 9.096%,耦合强度为 1.966,保持 SL1 的中心波长不变,调节 SL2 温度在 18.2~20.9 °C 变化,使 SL1 和 SL2 的频率失谐量发生改变,得到如图 3 所示的光谱和频谱变化。

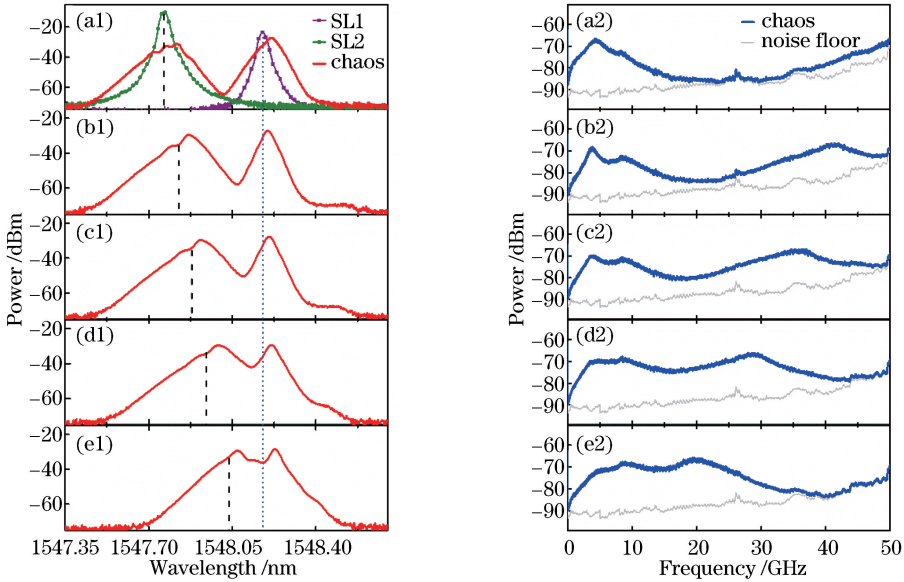


图 3 负失谐时(a1)~(e1)光谱和(a2)~(e2)频谱随频率失谐量的变化

Fig. 3 Variations of (a1)-(e1) optical spectrum and (a2)-(e2) frequency spectrum with frequency detuning during negative detuning

可以看出:当负失谐时的频率失谐量逐渐增大时,光谱的 -20 dB 线宽和频谱的 -5 dB 带宽均呈现先增后减的变化趋势;在 -18~-29.5 GHz 失谐范围时,由于激光器拍频引入高频振荡,激发了原始混沌振荡与高频振荡,实现了光谱和频谱的展宽;在 -37.5~-51.75 GHz 失谐范围时,频率失谐量进一步增大,混沌振荡与高频振荡逐渐分离,这是由拍频效果降低导致的,因此混沌频谱带宽逐渐降低。

3.3 正失谐时光谱和频谱的变化

正失谐时光谱和频谱随频率失谐量的变化如图 4 所示。固定 SL1 的反馈强度为 9.096%,耦合强度为 1.966,保持 SL1 的中心波长不变。调节 SL2 温度在 23~28.7 °C 变化,SL1 和 SL2 的频率失谐量分别为 6.87 GHz、28.87 GHz、32.75 GHz、51.37 GHz、77.25 GHz,得到如图 4 所示的光谱和

频谱随频率失谐量的变化。

可以看出:正失谐时,随着频率失谐量逐渐增大,光谱的 -20 dB 线宽和频谱的 -5 dB 带宽均呈现先增后减的变化趋势;在 6.87~32.75 GHz 失谐范围时,拍频效果逐渐增强,光谱和频谱展宽,且频谱平坦度得以优化;失谐量为 32.75 GHz 时,频谱平坦度达到最佳,为 ±2.5 dB,频谱覆盖范围超过 50 GHz;在 51.37~77.25 GHz 失谐范围时,拍频效果降低,高频振荡无法增强带宽,因此混沌频谱开始凹陷,频谱不再平坦,带宽降低。

3.4 频率失谐量对带宽的影响

图 5 为频谱带宽随频率失谐量的变化图。同样固定 SL1 的反馈强度为 9.096%,耦合强度为 1.966,保持 SL1 的中心波长不变。改变 SL2 的温度由 17.6~28.7 °C 变化,此时的频率失谐量由 -59 GHz 至 77.25 GHz 变化。从图中可以明显看出:频率失

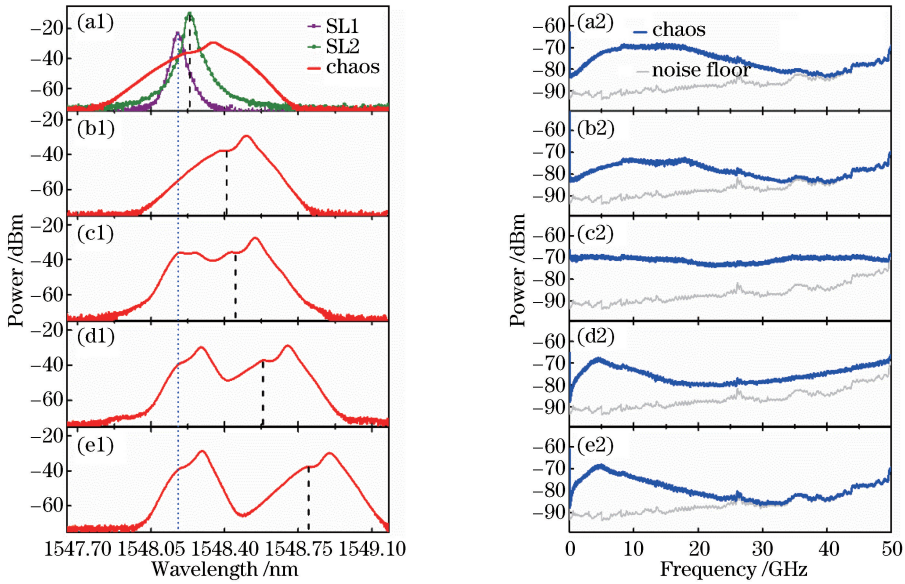


图 4 正失谐时(a1)~(e1)光谱和(a2)~(e2)频谱随频率失谐量的变化

Fig. 4 Variations of (a1)-(e1) optical spectrum and (a2)-(e2) frequency spectrum with frequency detuning during negative detuning

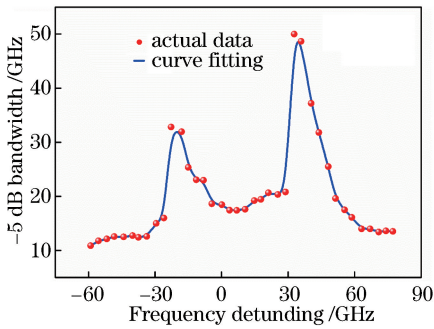


图 5 频谱带宽随频率失谐量的变化图

Fig. 5 Variation of frequency spectrum bandwidth with frequency detuning

谐量为 32.75 GHz 时, -5 dB 带宽最大为 50 GHz; 相比负失谐状态, 在正失谐范围内混沌带宽显著增强, 这是由于注入光导致 SL1 的光谱发生红移, 频谱带宽的变化呈现不对称分布^[21]。

当失谐量在 -4.37~28.87 GHz 范围时, 混沌带宽增加幅度较小, 这是由于 SL2 注入锁定, 增大了 SL1 的弛豫振荡频率。而在 -4.37~-22.75 GHz 和 28.87~35.87 GHz 失谐范围内, 当失谐量增加时, 通过 ASE 噪声扰动产生的原始混沌振荡与光互注入引起的高频周期振荡叠加耦合, 混沌带宽得到展宽。

但是, 频率失谐量并不是越大越好。在 -22.75~-59 GHz 及 35.87~77.25 GHz 失谐范围内时, 带宽随着失谐量的增加呈现逐渐减小的趋

势。当失谐量太大时, SL2 的出射激光处于 SL1 输出混沌激光增益谱的边缘位置, 拍频效果降低, 几乎无法影响原始混沌振荡, 此时混沌振荡完全由反馈光主导, 混沌带宽降低。

3.5 讨论与分析

50 GHz 宽带混沌信号发生器基于 SOA 的 ASE 散射引入外部光反馈, 破坏了 SL1 内部载流子数和光子数的动态平衡, 从而激发了弛豫振荡。弛豫振荡与外腔模式间的非线性作用增大了激光的自由度, 因此产生混沌激光。

进一步分析, SL1 腔内的混沌激光光场与 SL2 的光场拍频耦合, 即 SL1 的弛豫振荡模式与 SL2 的主模之间相互拍频。因此产生高频周期振荡, 振荡能量在频域上向高频部分传递, 且大量的光频成分间拍频耦合使能量分布趋向均匀, 从而使得宽带的高频周期振荡与原始混沌振荡叠加耦合, 实现频谱平坦、宽带混沌激光的产生。而波长相接近的纵模发生非线性作用, 激发了更多的新的光频成分, 光谱相较于 ASE 散射引入的光反馈进一步展宽。

同时, 激光器非锁定注入引起高频宽带振荡, 而锁定注入很难获得宽带混沌振荡, 因此实现了对混沌激光不同幅度的带宽展宽, 其不对称地分布在正负失谐范围内, 并且激光器在正失谐范围内输出的非线性现象更为丰富。这是由于激光器的振荡状态对注入强度和频率失谐量非常敏感, 随着注入强度和频率失谐量的改变, SL1 会呈现不同的振荡状态。

4 结 论

提出了一种基于 ASE 散射联合互注入产生宽带混沌激光的结构,激光器拍频引入的高频振荡与原始混沌振荡叠加耦合,弛豫振荡频率峰值得到抑制。在反馈强度为 9.096%、频率失谐量为 32.75 GHz、耦合强度为 1.966 时,产生了频谱带宽超过 50 GHz、平坦度为 ± 2.5 dB 的宽带混沌激光。相比单光注入法、混沌激光注入法、光纤振荡环法、环形腔延迟自干涉法等,所提方法具有高带宽、高平坦度、输出稳定、易于调节等特点。50 GHz 宽带混沌信号发生器的研制,将为传感、信息安全等重要领域提供核心器件,推动混沌激光的产业化应用。

参 考 文 献

- [1] Xie Z H, Xia L, Wang Y W, *et al.* Fiber fault detection with high accuracy using chaotic signal from an SOA ring reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(8): 709-712.
- [2] Ji Y N, Zhang M J, Wang Y C, *et al.* Microwave-photonic sensor for remote water-level monitoring based on chaotic laser [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, 24(3): 1450032.
- [3] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [4] Li P, Wang Y C. Research progress in physical random number generator based on laser chaos for high-speed secure communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060002.
李璞,王云才.面向高速保密通信的激光混沌物理随机数发生器研究进展[J].*激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060002.
- [5] Gupta M K, Tomar N K, Mishra V K, *et al.* Observer design for semilinear descriptor systems with applications to chaos-based secure communication[J]. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 2017, 3(S1): 1313-1324.
- [6] Chatterjee M R, Mohamed A, Almeahmadi F S. Secure free-space communication, turbulence mitigation, and other applications using acousto-optic chaos[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): C1-C13.
- [7] Zhang L M, Pan B W, Chen G C, *et al.* 640-Gbit/s fast physical random number generation using a broadband chaotic semiconductor laser[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45900.
- [8] Hirano K, Yamazaki T, Morikatsu S, *et al.* Fast random bit generation with bandwidth-enhanced chaos in semiconductor lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5512-5524.
- [9] 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.
- [10] Sakuraba R, Iwakawa K, Kanno K, *et al.* Tb/s physical random bit generation with bandwidth-enhanced chaos in three-cascaded semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1470-1490.
- [11] Zhang J Z, Wang Y H, Zhang M J, *et al.* Time-gated chaotic Brillouin optical correlation domain analysis[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17597-17607.
- [12] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [13] 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.
- [14] Zhang X X, Wu T A, Chang K G, *et al.* Time-delay characteristic and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501010.
张晓旭,吴天安,常凯歌,等.单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析[J].*中国激光*, 2017, 44(5): 0501010.
- [15] Wang Y S, Zhao T, Wang A B, *et al.* Design and dynamic characteristics of an external-cavity semiconductor laser generating wide bandwidth chaos [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111401.
王永胜,赵彤,王安帮,等.一种可产生高带宽混沌的外腔半导体激光器的设计及其动态特性[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111401.
- [16] Wang A B, Wang Y C, He H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1633-1635.
- [17] 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.
- [18] Zhang M J, Liu T G, Li P, *et al.* Generation of broadband chaotic laser using dual-wavelength optically injected Fabry-Perot laser diode with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(24): 1872-1874.
- [19] Wang L Y, Zhong Z Q, Wu Z M, *et al.* Bandwidth enhancement and time-delay signature suppression of chaotic signal from an optical feedback semiconductor laser by using cross phase modulation in a highly nonlinear fiber loop mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10017: 100170V.
- [20] Yang S J, Zhang J Z, Liu Y, *et al.* Design of precise temperature control and driving circuit for chaotic laser[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2018, 35(5): 516-522.
杨帅军, 张建忠, 刘毅, 等. 面向混沌激光器的高精度温度与驱动电路设计[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, 35(5): 516-522.
- [21] Takiguchi Y, Ohyagi K, Ohtsubo J. Bandwidth-enhanced chaos synchronization in strongly injection-locked semiconductor lasers with optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 319-321.