

激光与光电子学进展

混沌半导体激光器及其应用研究进展(特邀)

乔丽君¹, 王小娜^{2,3}, 郝玉凯^{2,3}, 张明江^{1,2*}¹太原理工大学物理学院, 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太原理工大学电子信息与光学工程学院, 山西 太原 030024

摘要 混沌激光具有宽频谱、类噪声、低相干等特性,在通信、雷达、传感等领域有广泛的应用。本文介绍了混沌半导体激光器的3种主要工作机制,分别为光反馈、光注入和光电反馈;重点研究典型混沌半导体激光器的频谱带宽、时延特征,以及复杂度等性能及其研究进展;进一步论述光子集成混沌半导体激光器的发展趋势;最后介绍混沌半导体激光器在保密光通信、随机数生成器、激光雷达、分布式光纤传感、混沌光时域反射计等领域的应用现状。本文可为高带宽、低时延混沌半导体激光器的发展和应用前景提供借鉴。

关键词 混沌激光; 半导体激光器; 光子集成; 带宽提升; 时延特征

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232647

Progress of Chaotic Semiconductor Lasers and Their Applications (Invited)

Qiao Lijun¹, Wang Xiaona^{2,3}, Hao Yukai^{2,3}, Zhang Mingjiang^{1,2*}¹College of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;³College of Electronic Information and Optical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract Chaotic laser is a kind of unstable output form of semiconductor laser, with the characteristics of broad spectrum, noise-like and low coherence, which has a wide range of applications in the fields of communication, radar and sensing. This paper introduces three main working mechanisms of chaotic semiconductor lasers: optical feedback, optical injection and optoelectronic feedback method, and focuses on the chaotic performance of typical chaotic semiconductor lasers such as spectral bandwidth, time-delay characteristics as well as complexity and their research progress; then focuses on the development trend of photonically-integrated chaotic semiconductor lasers; at last describes the role of chaotic semiconductor laser in the classified optical communication, random number generator, LiDAR, distributed fiber optic sensing technology, chaotic optical time-domain reflectometer and other fields. This review would provide a reference for the development and application prospects of chaotic semiconductor lasers with broadband power spectrum and low time delay signatures.

Key words chaotic laser; semiconductor laser; photonic integration; bandwidth enhancement; time delay characteristics

1 引言

1961年,美国物理学家Maiman^[1]成功研制了世界上第一台红宝石激光器,激光技术及应用得到快速发展。随后,基于电子抽运的方法,在GaAs半导体材料

中实现了受激辐射。1975年,Haken^[2]基于麦克斯韦布洛赫方程首次预言激光器可以呈现混沌行为,之后研究者们相继在气体激光器^[3]、固体激光器^[4]、光纤激光器^[5]中观察到混沌现象。1985年,日本Mukai等^[6]在实验中观察到半导体激光器在外部光反馈机制下可以

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2023-12-25; 录用日期: 2023-12-25; 网络首发日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(62075151, 62105234, 62205234, 62205237)、山西省重点研发项目(202202030201004)、山西省科技成果转化引导专项(202204021301042)、山西浙大新材料与化工研究院科研项目(2022SX-AT002)

通信作者: *zhangmingjiang@tyut.edu.cn

经过不同分岔路径进入混沌态。

半导体激光器作为 B 类激光器,在光反馈、光注入和光电反馈等外部扰动下均可进入混沌态。此外,半导体激光器具有尺寸小、功耗低、可集成等优点,已成为产生混沌激光最常用的光源。

混沌激光作为激光器的一种非稳态输出,具有宽频谱、类噪声、低相干等特性,目前在混沌保密光通信^[7-9]、随机数生成器^[10]、激光雷达^[11]、分布式光纤传感技术^[12-13]、混沌光时域反射计^[14]、光计算^[15]等领域显示了重要的应用价值。

本文系统介绍混沌半导体激光器原理和混沌激光性能表征方法,对混沌半导体激光器的研究进展进行分析和总结,并进一步介绍混沌半导体激光器在保密光通信、随机数产生、激光雷达等领域的应用。

2 混沌半导体激光器工作原理

1984 年, Arecchi 等^[16]根据腔内电场、反转粒子数和物质极化弛豫时间将激光器分为 A、B、C 等 3 类,大多数半导体激光器属于 B 类激光器,可以用光场和反转粒子数微分方程来描述。没有外部扰动时,半导体激光器处于稳定工作状态。但是存在外加扰动即第 3 个自由度时,激光强度和相位之间会出现额外的耦合关系,激光器将产生窄线宽激光、单周期振荡、倍周期振荡,以及混沌态等动态特性^[17]。

混沌半导体激光器的主要结构包括光反馈、光注入和光电反馈。1980 年, Lang 等^[18]针对光反馈半导体激光器建立了延时差分速率方程,为光反馈半导体激光器的动态特性研究奠定了基础。光反馈半导体激光器结构如图 1(a)所示,反馈光场与激光器内腔光场耦合,破坏了激光器内腔中载流子-光子作用的平衡,激光器输出状态主要由反馈时间和反馈强度等工作条件决定,在合适的反馈强度下,激光器可以工作在混沌态。

光注入也是产生混沌激光的常用方式^[19-21],其基本结构如图 1(b)所示,包括主激光器和从激光器。主激光器输出光对从激光器的内腔产生扰动,原理与光反馈法类似,激光器腔内光场与反转集居数之间的共振耦合作用发生改变,主从激光器间频率失谐量等于弛豫振荡频率的倍数时,频率失谐量和弛豫振荡频率之间会发生非线性作用,可进入混沌态。

光电反馈结构如图 1(c)所示,激光通过光电探测器转化为电信号,电信号经过非线性变化,对半导体激光器的泵浦电流进行调制,扰动载流子密度,可输出混沌激光^[22]。

以上方法中,光反馈法和光注入法均为全光结构,其中,光反馈法得益于外腔中丰富的模式,最容易产生混沌激光^[23-25]。光注入法灵活性较高,通过调整主、从激光器的失谐量和注入光强,可以对混沌激光性能进行调控,但外部光源的引入增加了系统的复杂性和成

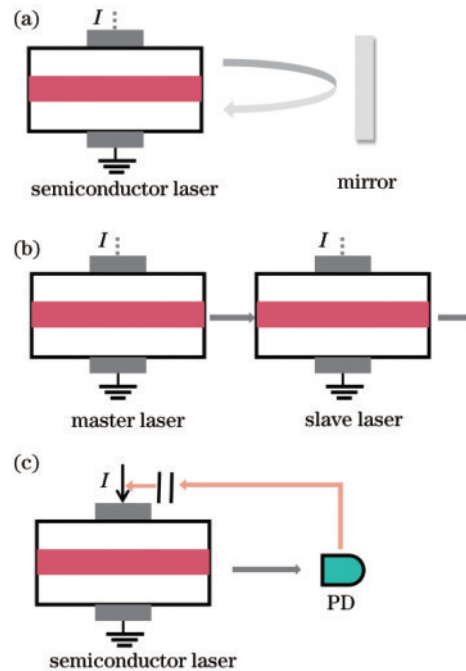


图 1 混沌激光的产生方式。(a)光反馈法;(b)光注入法;(c)光电反馈法

Fig. 1 Chaotic laser generation methods. (a) Optical feedback; (b) optical injection; (c) optoelectronic feedback

本;不同于以上全光调制的两种方法,光电反馈法需要将光信号转化为电信号进行调制,通过光电反馈法产生的混沌激光一般具有较平坦的功率谱和高关联维数等优点,但由于存在电容、滤波器等电学元件,响应速率受到限制,混沌激光的带宽较窄。

3 混沌激光性能表征参数

混沌激光的表征参量主要有功率谱带宽、时延特征和复杂度。在实际应用中,功率谱带宽会影响混沌分布式光纤传感和混沌激光雷达的空间分辨率、混沌光通信的传输速率,以及产生随机数的码率,时延特征和复杂度会影响随机数的随机性、混沌保密光通信的安全性,并通过影响信噪比影响光纤传感距离。

3.1 功率谱带宽

混沌激光的功率谱带宽常用标准带宽或有效带宽定量表征。其中,标准带宽从频谱能量的角度对混沌带宽进行表征,其定量表征方法为从直流分量算起,截止到覆盖整个频谱能量的 80% 处所对应频率之间的频带宽度^[26]。但是当频谱中部分频率占据能量较高时,用标准带宽计算得到的混沌带宽不准确,为了避免这一缺陷,研究者提出了有效带宽表征方法。有效带宽为从频谱功率最高点算起,占据整个频谱能量 80% 的离散频段求和累计得到的带宽^[27],其对频谱的平坦度有一定的考量。

3.2 时延特征

混沌半导体激光器产生的混沌信号具有明显的特

征频率,如通过光反馈法产生的混沌激光的特征频率包括激光器的弛豫振荡频率和反馈外腔谐振频率,因此其强度时间序列隐含着周期性,时延特征通常用来表示这种周期性的强弱。常用的时延特征识别方法为自相关函数(ACF)法、延时互信息法^[28]、排列熵法^[29]和频谱识别法^[30]等。其中,最常用的为 ACF 法,表征混沌信号在不同时刻之间的相关程度,是提取反馈延迟时间 τ 的最常用的工具。自相关函数数学表达式为

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [P(t+\Delta t) - \langle P(t) \rangle][P(t) - \langle P(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [P(t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle \langle [P(t+\Delta t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 表示为强度时序; $P(t+\Delta t)$ 则表示时间延迟 Δt 后的时序。混沌信号的自相关函数呈现类 δ 特性,存在周期性的侧峰,时间 τ 处所对应的侧峰峰值为时延特征(TDS)。

3.3 复杂度

混沌系统是一种非线性系统,对其复杂度的表征方法主要有李雅普诺夫指数、关联维数、排列熵和 K 熵。其中,李雅普诺夫指数是最常用的表征方法,用于定量描绘两个相近初值随着时间变化以指数形式分开生成的轨迹,即可以用来描述混沌系统对初值的敏感程度。其表达式为

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \ln \left| \frac{dx(i+1)}{dx(i)} \right|, \quad (2)$$

式中: λ 表示李雅普诺夫指数; $x(i)$ 为时间序列; n 为序列长度。通过对输出信号的时间序列进行计算,可以判断该系统是否处于混沌态以及其复杂程度。当 $\lambda < 0$ 时,信号为稳态;当 $\lambda > 0$ 时,信号为混沌态,且数值越大代表复杂度越高。如果一个非线性系统的最大李雅普诺夫指数大于 0,则说明该系统为混沌态。

此外,关联维数主要用来描述吸引子(系统在相空间的轨迹)的维度复杂性,是混沌信号区别于噪声信号的特征参量,其数值表征了混沌系统的复杂程度。关联维数大于 1,则为混沌信号,且数值越大代表复杂度越高。排列熵用来度量时间序列的自然复杂性,该表征方式易于实现、计算速度快,归一化排列熵在 0~1 之间为混沌态,等于 1 为随机信号,此时复杂度最高。而 K 熵在非线性动力学中用来描述运动状态以及性质,是度量无序或随机程度的特征参数,描述了混沌轨道随时间演化信息的产生率,当 K 熵大于 0 且为常数时,表示信号为混沌,且 K 熵值越大表征系统的复杂度越高。

4 典型的混沌半导体激光器

4.1 分立型混沌半导体激光器

分立型混沌半导体激光器通常由离散的半导体激

光器、反馈光路,以及偏振控制器等元器件搭建而成,这类系统对工艺要求较低、灵活性较强、易于调控。光反馈半导体激光器结构简单,易产生混沌激光,是产生混沌激光最经典的方法,但是由于光反馈结构存在固定的外腔结构,产生的混沌激光具有周期性,存在时延特征。此外,在该结构中,半导体激光器的弛豫振荡频率占据了混沌激光功率谱的主要能量,将其功率谱带宽限制到几吉赫兹。研究者们针对基于光反馈法和光注入法产生的混沌激光时延特征优化和频谱带宽提升进行了一系列研究。

4.1.1 基于光反馈法的混沌激光性能优化

传统的镜面反馈结构产生的时延特征主要来源于外腔长度,可以通过调节电流使弛豫振荡频率接近外腔谐振频率^[31],实现 TDS 隐藏。此外,通过优化反馈外腔结构,如基于光纤布拉格光栅^[32-34]、啁啾光纤光栅反馈结构^[35],将激光器的弛豫振荡频率调节到光栅反射谱主带边缘,增强色散效应,抑制混沌信号 TDS。进一步,研究者提出随机光纤光栅反馈法^[36]和散射反馈法^[37],光纤中低相位相关的随机反馈引入大量不相关的外腔模式,实现 TDS 抑制。

针对混沌带宽的提升,研究者们提出延时自干涉法^[38-39],将混沌激光注入光纤反馈环中,通过模式拍频实现频谱带宽提升和平坦化。文献^[40]提出外差法,利用两个镜面反馈激光器产生的混沌信号进行外差产生宽带混沌激光。使用滤波反馈弱谐振腔法布里-珀罗(F-P)激光器^[24],通过选取合适的反馈强度,可以实现带宽提升,并且这种方法可以实现波长调谐。使用基于离散模式激光器的光反馈结构,可以输出有效带宽为 10.6 GHz、平坦度为 2.8 dB 的混沌激光^[41]。

2020 年,本课题组^[42]提出一种基于高非线性光纤(HNLF)的有源光反馈法产生宽带混沌激光。图 2(a)为该激光器结构示意图,反馈回路中引入掺铒光纤放大器(EDFA)和 HNLF,基于非线性效应产生大量新的光谱成分,从而实现带宽拓展。图 2(b)为该激光器输出频谱图,可见频谱覆盖超过 50 GHz、80% 带宽为 38.9 GHz、平坦度为 4.2 dB 的平坦宽带混沌激光。在此基础上,文献^[43]进一步提出非对称双路光反馈半导体激光器,如图 3(a)所示,在非对称双路光反馈中,一条反馈回路与光带通滤波器(OBPF)连接形成滤波光路,另一条反馈回路为非滤波光路。图 3(b)为实验得到的频谱图,通过滤波模式与非滤波混沌模式之间的拍频效应,实验产生了标准带宽为 36.1 GHz、频谱平坦度为 5.8 dB 的混沌激光。

4.1.2 基于光注入法的混沌激光性能优化

基于传统光注入法,研究者们提出了一系列 TDS 优化方案,如散射光反馈混沌激光注入连续波激光器^[37]、混沌光或双混沌光注入连续波激光器^[44-47]、光频梳注入连续波激光器^[48]、连续光注入混沌激光器^[49]、激光器互注入^[50]等。研究结果表明,混沌激光单向注入

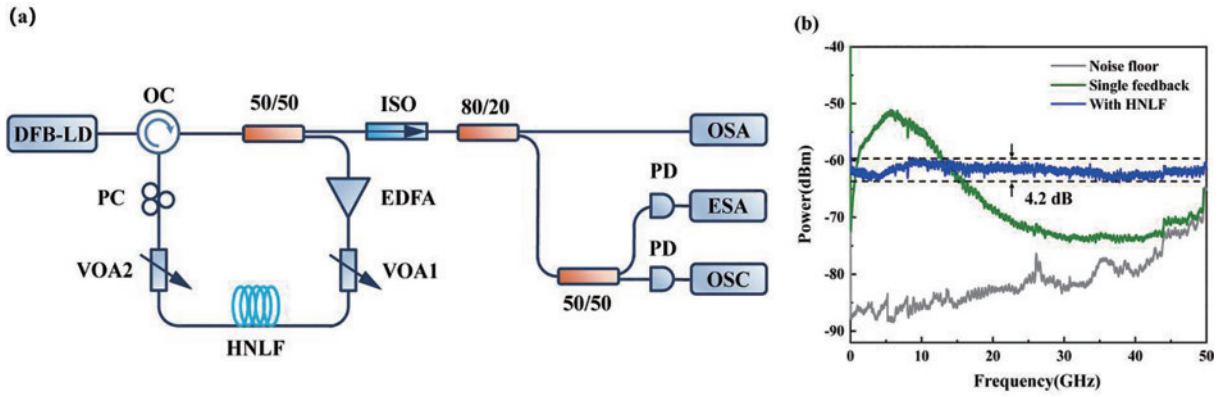


图 2 基于高非线性光纤的有源光反馈回路产生宽带混沌激光^[42]。(a)实验装置图;(b)频谱图
Fig. 2 Generation of broadband chaotic lasers by active optical feedback loop based on HNLf^[42]. (a) Experimental setup; (b) power spectra

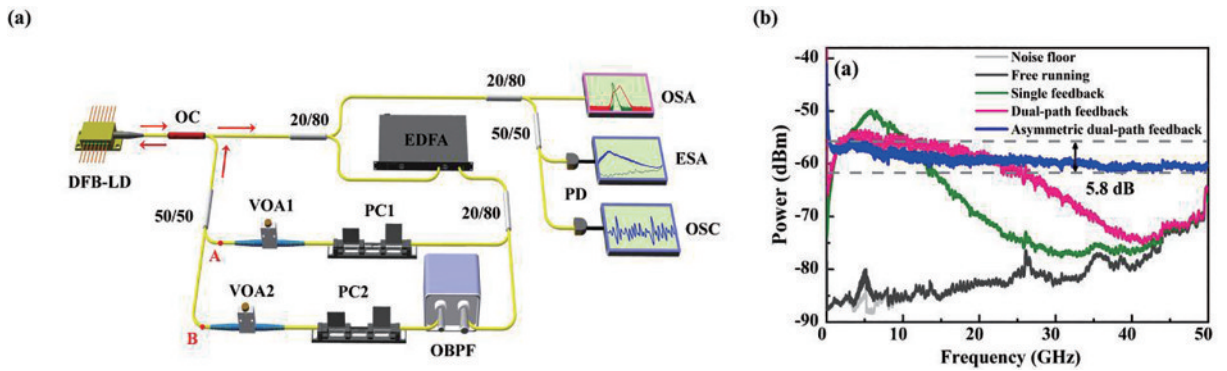


图 3 基于非对称双路光反馈产生平坦宽带混沌激光^[43]。(a)实验装置图;(b)频谱图
Fig. 3 Generation of flat broadband chaotic lasers using asymmetric dual-path optical feedback^[43]. (a) Experimental setup; (b) power spectra

连续波激光器方案可以在较宽的参数范围内实现 TDS 抑制^[51]。另外,还可以通过自相位调制光注入法分别扰动分布式反馈(DFB)激光器和混沌激光器,可同时获得两路低相关性的低时延高带宽混沌信号^[52]。

基于光注入法中主激光器和从激光器之间的模式拍频效应,在合适的频率失谐量下,可以实现带宽增强。所以,以上对 TDS 的优化方法,如连续激光器注入混沌激光器等,也可以同时实现对混沌激光带宽的

提升^[20,53-55]。

2019年,本课题组^[56]提出基于互注入半导体激光器法产生宽带混沌信号。图 4(a)为产生混沌激光装置图,通过两个半导体激光器的拍频效应实现混沌激光频谱带宽大幅度提升,如图 4(b)所示,频谱标准带宽达 38.6 GHz,平坦度为 5.6 dB,带宽为光反馈法所产生混沌激光的 6.42 倍。该方法结构简单,易于实现对混沌激光带宽的调控。

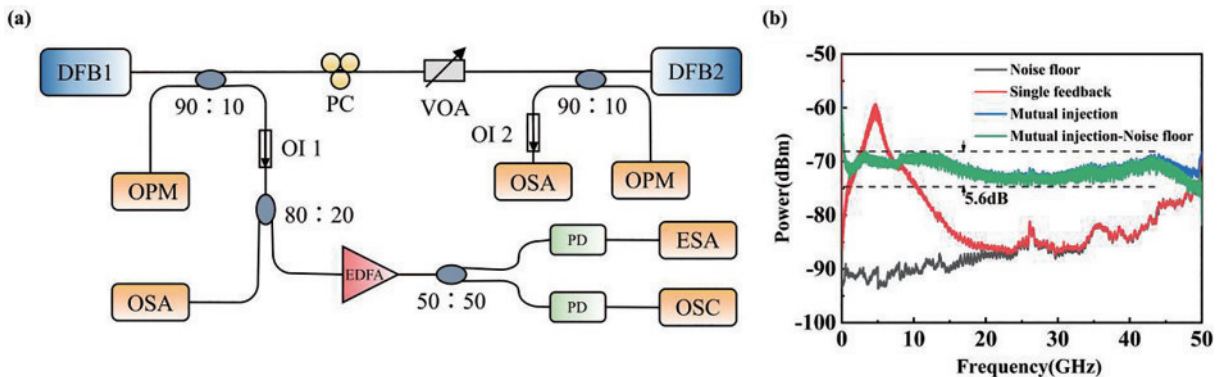


图 4 基于互注入法产生平坦宽带混沌激光^[56]。(a)实验装置图;(b)频谱图
Fig. 4 Generation of flat broadband chaotic laser based on mutual injection method^[56]. (a) Experimental setup; (b) power spectra

为了进一步研究该方法产生混沌激光的时延特征和带宽性能,2023年,本课题组^[57]实验研究了非对称互注入法中激光器的动态特性,实验装置如图5(a)所示。当两个DFB激光器频率失谐量为30.3 GHz,耦合强度分别为3.336、0.127时,如图5(b)所示,可得到标准带宽为33.5 GHz、频谱平坦度为8.5 dB、时延特

征值低至0.059、最大李雅普诺夫指数为0.1483的混沌信号,该激光器互注入方案同时实现了带宽提升和时延特征抑制。此外,还讨论了同步系数与两种激光器输出特性之间的关系,如图6所示,在非对称互注入的情况下,两个激光器输出特性不同时的高同步系数区域要大于两个激光器输出特性相同时的高同步系数区域。

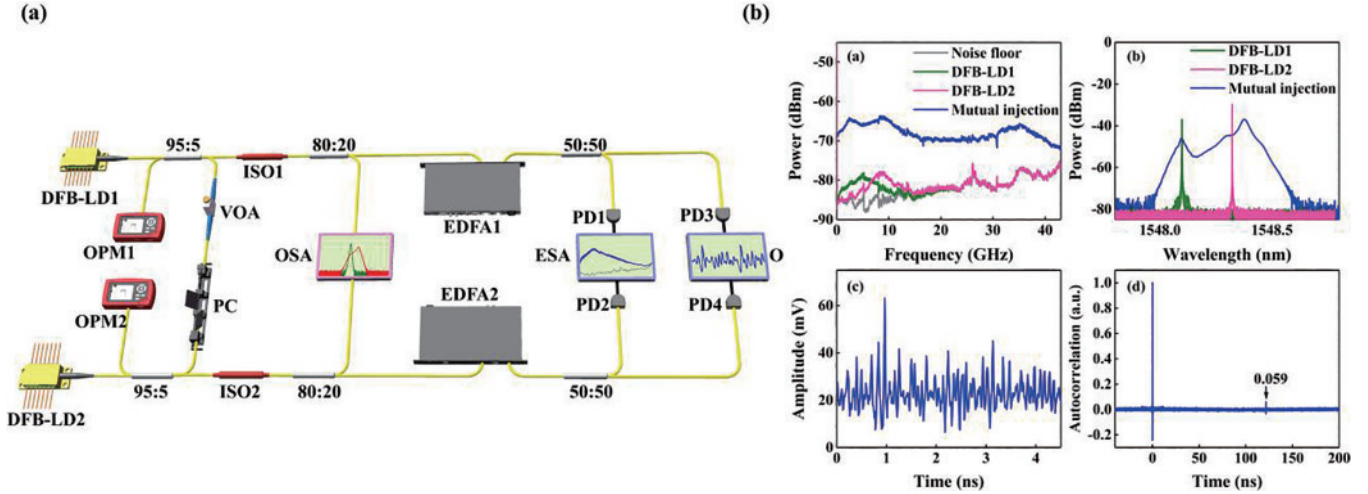


图5 基于非对称互注入法产生宽带和时延抑制的混沌激光^[57]。(a)实验装置图;(b)混沌特性图,包括频谱图、光谱图、时序图、ACF
Fig. 5 Generation of chaotic lasers with broadband and TDS suppression based on the asymmetric mutual injection method^[57].
(a) Experimental setup; (b) chaotic characteristics, including power spectra, optical spectra, time series, and ACF

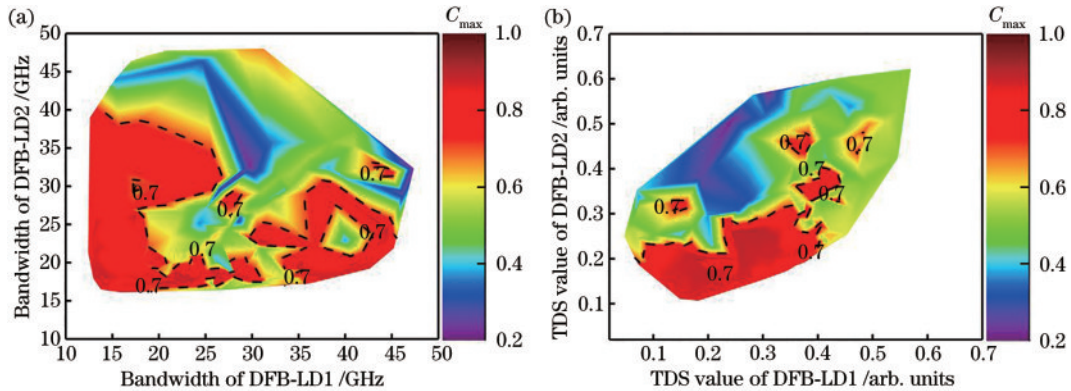


图6 同步系数与两个DFB激光器输出特性之间的关系。(a)两个DFB激光器不同带宽时同步系数图;(b)两个DFB激光器不同TDS时同步系数图
Fig. 6 Relationship between the synchronisation coefficients and the output characteristics of the two DFB lasers. (a) Map of the synchronisation coefficients for the bandwidth of two DFB lasers; (b) map of the synchronisation coefficients for the TDS of two DFB lasers

上述研究均基于边发射激光器,垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)尽管结构不同,但对外部扰动同样敏感,也可产生混沌激光。VCSEL的结构在大规模面阵集成中具有天然优势,并且其输出具有两个正交的线性偏振光分量,通过控制外部扰动条件,可以使两个偏振分量同时输出混沌激光,非常适用于产生多通道混沌信号。

4.2 集成式混沌半导体激光器

分立式混沌激光源存在体积大、性能不稳定等问题,导致混沌激光的应用存在局限性。相比而言,光子

集成系统将半导体激光器、反馈光学器件、放大器等元件集成在同一衬底上,体积小、性能稳定、结构紧凑,成为近年来许多研究者重点关注的研究方向。集成式混沌激光器主要分为光反馈结构、光注入结构和微腔激光器结构。

4.2.1 基于光反馈结构的单片集成混沌激光器

光子集成激光器芯片的光发射端解理面可以作为反射镜,所以大多集成混沌激光器均基于光反馈结构。2008年,希腊雅典大学Argyris等^[58-59]提出一种四段式单片集成激光器,包括DFB激光器区、相区、增益/吸

收区和无源波导区,通过无源光波导光发射端面所镀膜高反膜提供光反馈,可输出混沌激光。此后为了提升混沌激光的复杂度,研究人员相继提出基于空气隙的多光反馈型集成结构^[60-61],实现复合反馈腔。基于双半导体光放大器(SOA)的直波导结构^[62],通过长度不同的SOA对光反馈强度和相位进行粗调和细调,进一步引入环形波导结构^[63]和二维外腔结构^[64],增大外腔长度,提升混沌激光的复杂度。采用放大反馈激光器(AFL)芯片^[65-66],通过放大区控制光反馈强度,相位区调节光反馈相位,可产生频率覆盖范围超过26.5 GHz的混沌激光。

2023年,本课题组^[67]提出一种三段式光反馈结构

光子集成混沌激光器芯片,如图7(a)所示,该芯片由DFB激光器区、相区、DBR光栅区组成。其中,DBR光栅作为滤波器,滤出的光模式与DFB激光器主模式之间产生模式拍频效应能够增强输出的混沌带宽,同时DBR光栅能够提供分布式反馈以抑制混沌信号的时延特征。仿真得到该器件可产生带宽为12.34 GHz、TDS低于0.065的混沌激光,如图7(b)所示。

现有单片集成混沌半导体激光器无法实现波长大范围调谐,限制了其在波分复用系统中的应用。2022年,本课题组^[68]提出一种波长可调谐的单片集成混沌半导体激光器芯片结构,如图8(a)所示,该四段式集成芯片包括增益区、DBR光栅区、SOA区和相

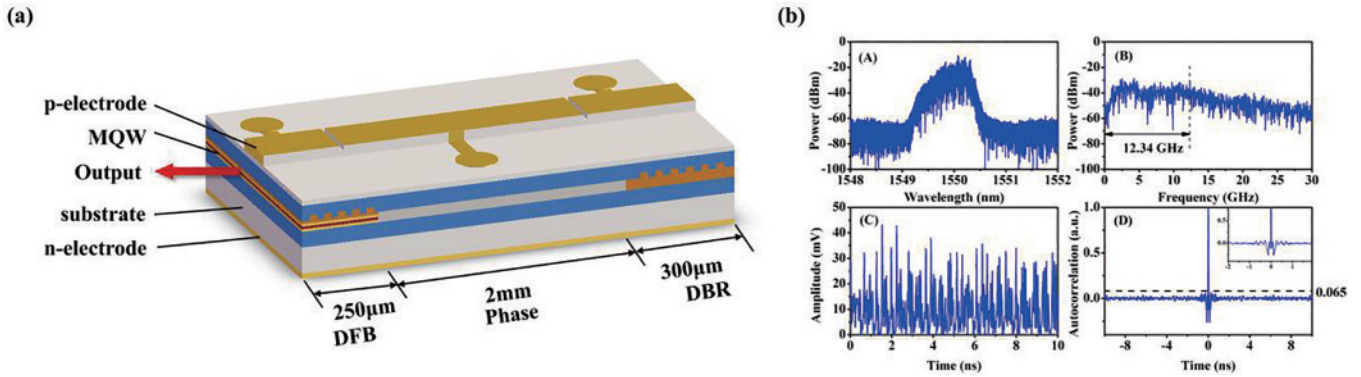


图7 基于光反馈结构的三段式光子集成芯片^[67]。(a)实验装置图;(b)混沌特性,包括光谱图、频谱图、时序图和ACF
Fig. 7 Three-segment photonic integrated chip based on optical feedback structure^[67]. (a) Experimental setup; (b) chaotic characteristics, including optical spectrum, power spectrum, time series, and ACF

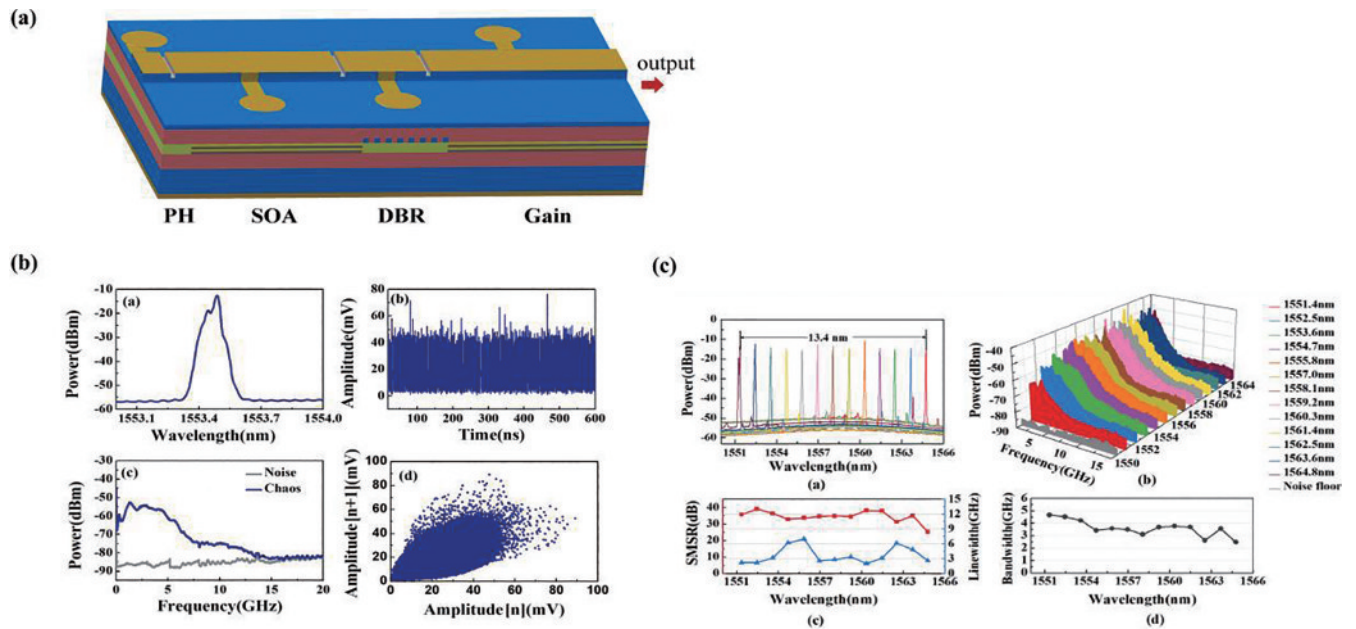


图8 波长可调谐的单片集成混沌半导体激光器芯片^[68]。(a)实验装置图;(b)混沌特性图,包括光谱图、时序图、频谱图、相图;
(c)混沌激光波长调谐特性,包括光谱图、频谱图、边模抑制比和线宽、标准带宽
Fig. 8 Wavelength-tunable monolithic integrated chaotic semiconductor laser chip^[68]. (a) Experimental setup; (b) chaotic characteristics, including optical spectrum, time series, power spectrum, and phase diagram; (c) wavelength-tunable characteristics of chaotic laser, including optical spectra, power spectra, side mode suppression ratio and linewidth, and standard bandwidth

区,其中,DBR区和增益区构成主激光器,SOA区和相区构成反馈外腔,调节DBR电流实现波长调谐,SOA区用于控制反馈光强度。如图8(b)所示,混沌激光中心波长为1553.4 nm,频谱带宽为4.9 GHz,时序峰峰值为70 mV,李雅普诺夫指数为0.132。图8(c)为波长可调谐的混沌激光特性图,实验得到中心波长调谐区间为1551.4~1564.8 nm,调谐范围为13.4 nm,-3 dB带宽变化范围为2.01~6.95 GHz。

4.2.2 基于光注入结构的单片集成混沌激光器

光注入法可有效提升混沌激光带宽,在单片集成芯片中被研究者采用。2009年,Vaughan等^[69-70]在基于DBR激光器的互耦合结构中观察到混沌状态。此

后研究者们利用单片集成互耦合DFB激光器^[71],基于拍频效应与四波混频效应产生混沌激光。2017年,日本埼玉大学Ohara等^[72]提出基于Y型波导结构的互耦合光子集成混沌半导体激光器芯片,以Y波导为耦合媒介,在光反馈和光注入的联合扰动下,产生混沌激光,并且可实现混沌同步。2020年,本课题组^[73]针对光子集成混沌激光器存在固定外腔时延的问题,提出了一种随机反馈联合互注入的单片集成混沌半导体激光器,结构如图9(a)所示,波导中引入随机光栅,提供随机后向散射光,消除固定外腔引入的TDS,互注入耦合结构可以实现带宽增强。该芯片可输出TDS为0.06、带宽为13.12 GHz的混沌信号,如图9(b)所示。

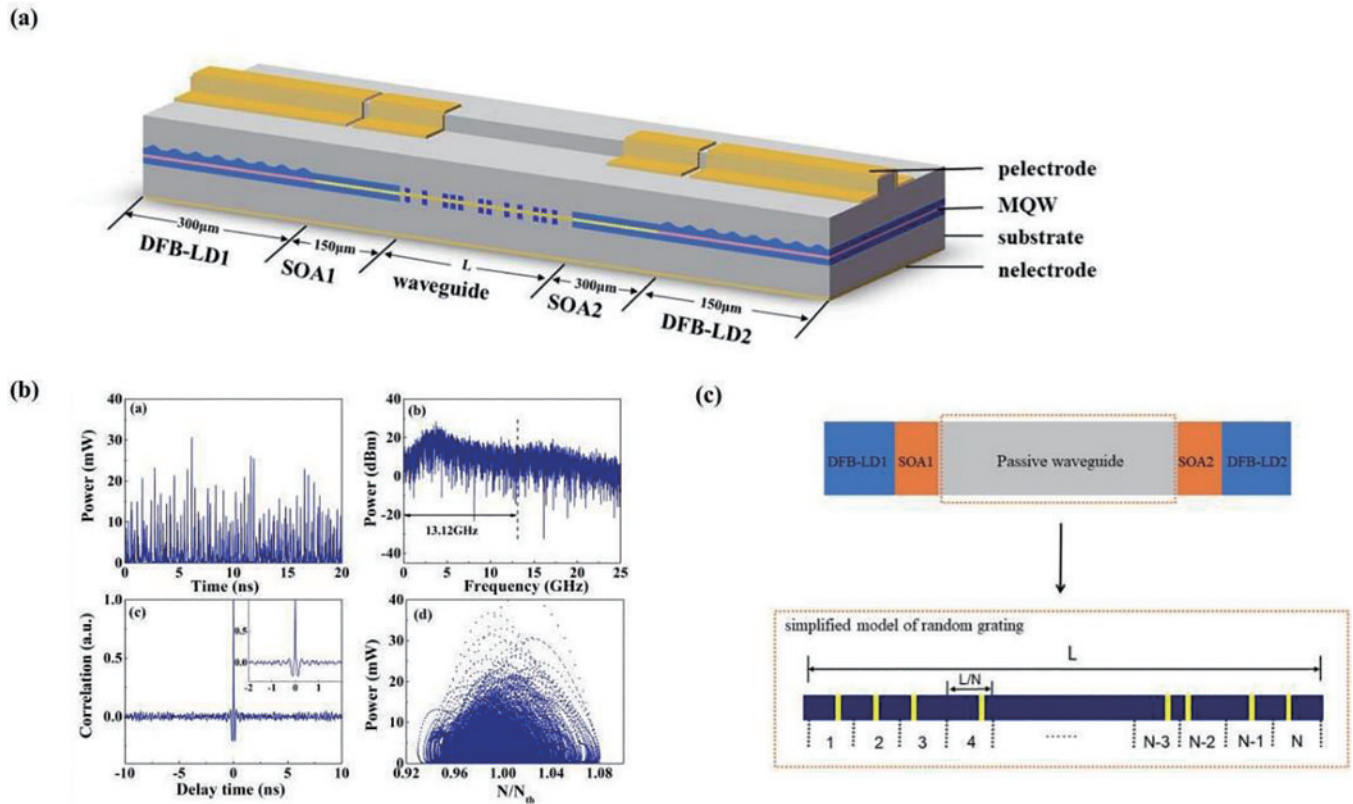


图9 基于随机反馈及互注入的单片集成混沌半导体激光器^[73]。(a)实验装置图;(b)混沌特性图,包括时序图、频谱图、ACF、相图;(c)无源光波导中随机光栅的简化模型图

Fig. 9 Monolithic integrated chaotic semiconductor laser based on stochastic feedback and mutual injection^[73]. (a) Experimental setup; (b) chaotic characteristics, including time series, power spectrum, ACF, and phase diagram; (c) simplified model diagram of the random grating in a passive optical waveguide

4.2.3 自发混沌微腔激光器

回音壁微腔激光器具有高品质因子,在混沌激光产生方面具有较大的潜力。2022年,中国科学院半导体所黄永箴团队^[74]在实验中采用弧边六边形微腔激光器自发产生混沌激光。该结构不需要外部扰动,通过调谐激光器自身的基模与一阶横模的频率间隔,使横模相互作用产生大量共振峰,就可以使该激光器工作于混沌态,如图10(a)所示。微腔激光器可产生频谱带宽为11.6 GHz、混沌关联维数为3.92、K熵为2.9 ns⁻¹的混沌激光,并且由于该激光器无反馈腔,因此不存在

时延特征,如图10(b)所示。2023年,该团队进一步提出三横模微腔混沌激光器,利用光子共振效应提高混沌带宽^[75],可产生带宽为33.9 GHz、关联维数为11.6的混沌激光。

4.3 分析与讨论

在以上分立型混沌半导体激光器的介绍中,分别从光反馈法和光注入法两方面介绍了混沌激光频谱带宽和时延特性优化的研究进展,并在表1总结了典型的方法。可以看到,针对光反馈法,比较有效的TDS抑制方法是在外腔或者后处理光路中引入更多

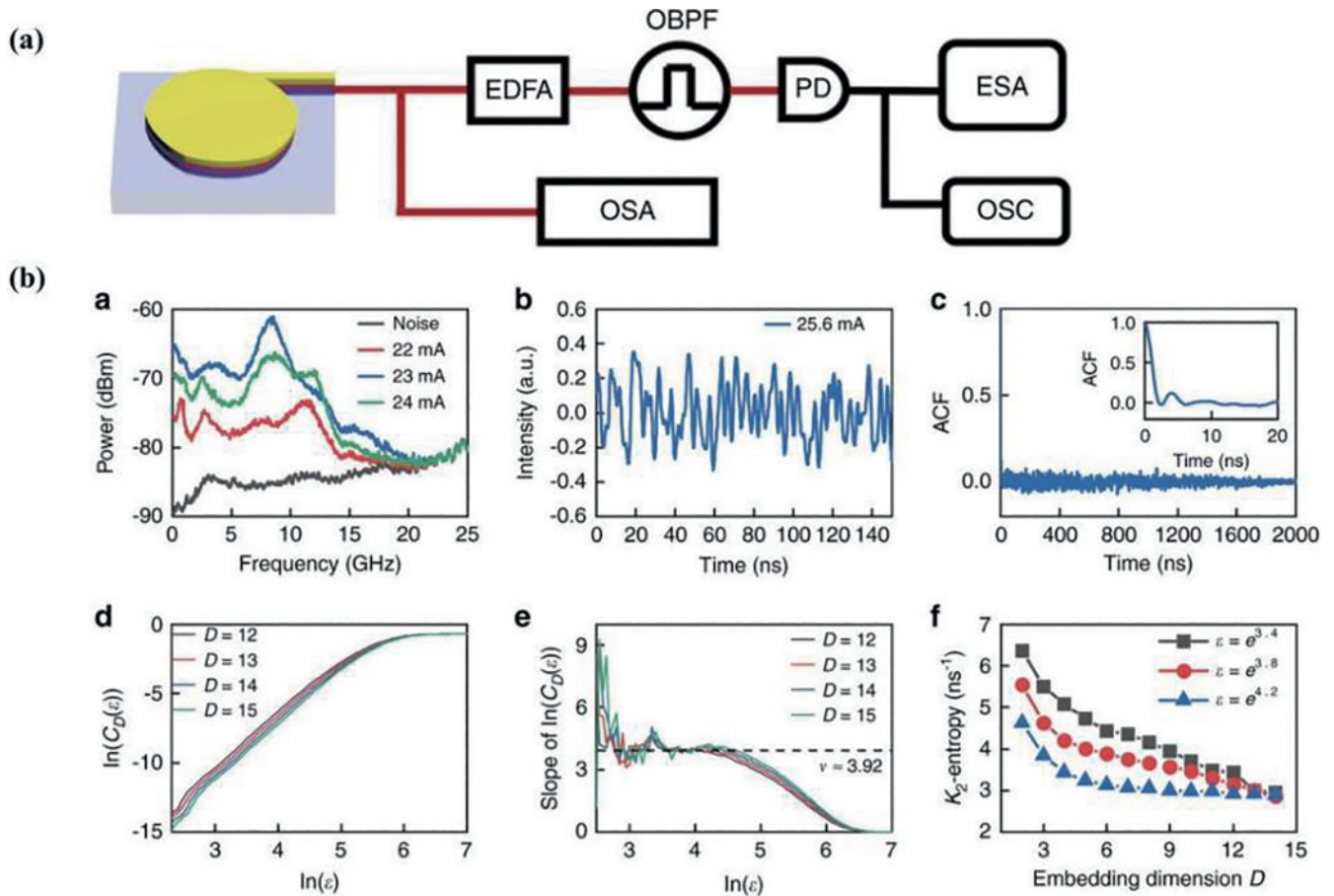


图 10 基于内模相互作用的弧边六边形微腔激光器产生混沌激光^[74]。(a)实验装置图;(b)混沌特性图,包括时序图、频谱图、ACF、关联积分曲线、关联维、K熵

Fig. 10 Generation of chaotic laser by a curved-edge hexagonal microcavity laser based on internal mode interactions^[74]. (a) Experimental setup; (b) characteristics of chaos, including time series, power spectrum, ACF, correlation integral curves, correlation dimension, and K -entropy

的反馈点,如利用随机光栅反馈可以将 TDS 抑制到 0.0055。而只基于半导体激光器的光反馈结构都受到弛豫振荡的影响,带宽无法得到大幅度拓展,如果引入有源光反馈结构或者采用延时自干涉等后处理技术,或者结合光注入结构,引入拍频效应,则可以达到频谱带宽增强的效果。相比而言,光注入法半导体激光器在带宽提升方面有天然的优势,可以通过调节激光器频率失谐量实现宽带混沌激光的产生。但是光注入法容易造成注入锁定,需要对频率失谐量、耦合强度等参数进行精确调节。而如果同时实现带宽增强和时延特征抑制,比较可行的办法是联合光注入和光反馈扰动方式。需要提及的另一种方法是非对称互注入法,可以通过调节两个激光器的频率失谐量和注入强度等参数,同时实现带宽增强和时延抑制。

但是,分立型混沌半导体激光器由于体积大、结构复杂,不利于实用化和产业化。研究者们提出了器件长度可缩小至微米量级的集成激光器,目前主要包括光反馈型、光注入型集成混沌半导体激光器。表 2 描述了典型的集成混沌半导体激光器频谱带宽和时

延特性,针对光反馈型集成半导体混沌激光器,研究者们主要通过器件端面光反馈产生混沌激光,可以通过引入 DBR 光栅、随机光栅、空气隙等多种反馈结构,或者环形腔、二维腔等波导结构增加外腔腔长实现复杂度的提升。在反馈型结构中,放大反馈激光器是目前提升带宽的最佳选择。在光注入结构中,通过联合光反馈法可以同时实现带宽拓展和 TDS 抑制。

国外近年来大多数研究都集中于混沌激光的应用层面,单片集成混沌激光器的突破性进展较少。2023 年,Chen 等^[11]将并行混沌光源用于 LiDAR 系统中,并表示未来并行混沌光源将实现光子集成,利用半导体集成工艺平台即可实现大规模生产,加速混沌 LiDAR 技术在消费市场的推广。Lukashchuk 等^[78]也发表了相似的观点。随着混沌激光在激光雷达、保密光通信,以及光纤传感等领域的进一步推广,将继续推进新型光子集成混沌半导体激光器的研究。

特别值得关注的是,自发混沌微腔激光器具有突破性的进展,巧妙利用微腔激光器内基模和一阶横模之间的相互作用产生混沌激光,并进一步基于三模自混沌效应实现频谱展宽,且不存在时延特征。

表 1 典型分立混沌半导体激光器带宽和时延特性

Table 1 Bandwidth and delay characteristics of a typical discrete chaotic semiconductor laser

Methods of chaotic laser generation	Structural characteristics	Bandwidth / GHz	TDS	Institute	Year	Reference
Optical feedback	Chaotic laser injected into fiber ring resonator	26.5		Taiyuan University of Technology	2013	[39]
	FBG optical feedback		0.04	City University of Hong Kong	2015	[33]
	Random fiber grating feedback		0.005	University of Ottawa	2019	[49]
	Phase conjugate optical feedback	18.0		Paris-Saclay University	2019	[25]
	Self-phase modulated feedback	24.6	Hidden in the background noise	University of Electronic Science and Technology of China	2019	[76]
	Asymmetric dual-path optical feedback	36.1		Taiyuan University of Technology	2021	[43]
Optical injection	Cascade optical injection	35.2		Saitama University	2015	[54]
	Dual-chaotic optical injections		Hidden in the background noise	Southwest Jiaotong University	2015	[77]
	Constant-amplitude self-phase-modulated	24.3		University of Electronic Science and Technology of China	2020	[55]
	Optical combs injection	32.4	Hidden in the background noise	Beijing University of Posts and Telecommunications	2023	[48]
	Asymmetrical mutual injection	33.5	0.059	Taiyuan University of Technology	2023	[57]

表 2 典型集成混沌半导体激光器带宽和时延特性

Table 2 Bandwidth and delay characteristics of a typical integrated chaotic semiconductor laser

Methods of chaotic laser generation	Structural characteristics	Bandwidth / GHz	TDS	Institute	Year	Reference
Optical feedback	optical feedback with chip facet	8.0		University of Athens	2008	[58]
	Air gap multi-optical feedback	7.0		Technical University of Moldova	2009	[60]
	Passive ring waveguide	10.0		NTT	2011	[63]
	Amplified feedback laser	26.5		Institute of Semiconductors	2013	[65]
	Two-dimension external cavity	5.0		Kanazawa University	2014	[64]
	DBR laser optical feedback method	4.9		Taiyuan University of Technology	2022	[68]
Optical injection	Mutual injection			Tsinghua University	2014	[71]
	Y-type waveguide			Saitama University	2017	[72]
	Random grating and mutual injection	13.1	0.06	Taiyuan University of Technology	2020	[73]
Self-chaos	Dual-mode microcavity laser	11.6	No TDS	Institute of Semiconductors	2022	[74]
	Tri-mode microcavity laser	33.9	No TDS	Institute of Semiconductors	2023	[75]

5 混沌半导体激光器的应用

5.1 混沌保密光通信

混沌保密光通信以混沌激光为载波对信息进行加密,并在接收端通过混沌同步进行信息解调,可实现信息的安全传输。1996年,西班牙 Mirasso 等^[79]利用单向主从注入的半导体激光器实现混沌同步。1998年,法国 VanWiggeren 等^[80]首次通过可调谐反馈半导体激光器实现混沌保密光通信。2005年,欧盟 OCCULT 项目组在雅典城域网演示了传输距离为 120 km、数据

传输速率为 2.4 Gbit/s 的混沌保密光通信^[7],为混沌保密光通信迈向实际应用开辟了道路。

此后,研究者们针对高速、长距离混沌保密光通信进行了系列研究。2010年,法国 Lavrov 等^[81]通过差分移相键控技术设计光电反馈混沌系统,实现了 10 Gbit/s 的数据传输。2018年,上海交通大学 Ke 等^[82]采用双二进制调制格式,将混沌通信的传输速率提升到 30 Gbit/s。2022年,广东工业大学 Gao 等^[83]采用混沌激光作为混沌密钥实现相位加密,在 100 km 单模光纤链路上实现了 28 Gbit/s 信号的数据传输。2023年,华

中科技大学 Wang 等^[84]通过半导体激光器互注入法和空分复用技术实现高质量混沌同步,在多芯光纤上实现超过 130 km 的数据传输。

此外,混沌保密光通信的安全性,可以通过混沌半导体激光器的 TDS 优化和复杂度提升来优化^[85]。2011 年,法国 Nguimdo 等^[86]将两个光电反馈回路并联实现混沌激光 TDS 抑制和保密通信安全性提升。2019 年,太原理工大学 Wang 等^[87]采用啁啾光纤光栅反馈半导体激光器,产生无时延特征混沌激光,实现了密钥空间增强,并提升了系统的安全性。

5.2 随机数生成器

混沌随机数发生器以混沌激光作为熵源,安全性高、速率快,更适合作为密钥对信息加密,保障网络安全。2008 年,利用宽带混沌半导体激光器,首次产生 1.7 Gbit/s 的实时物理随机数。2009 年,以色列 Reidler 等^[88]通过光反馈半导体激光器产生混沌激光,经过光电探测器(PD)转化为电信号后,采用八位模拟数字转换器(ADC)进行差分处理,获得了等效速率为 12.5 Gbit/s 的物理随机数。随后,该小组通过增加后续差分处理级数,可以获得等效速率为 300 Gbit/s 的物理随机数^[89]。2012 年,香港城市大学 Li 等^[90]利用光注入半导体激光器产生无时延特征混沌激光,经 PD 和八位 ADC 处理后,选取最低有效位三位进行移位异或后处理从而获得了等效速率为 30 Gbit/s 的物理随机数。2017 年,中国科学院半导体研究所 Zhang 等^[91]利用 AFL 集成混沌激光器,演示了一种超快速物理随机数发生器。太原理工大学 Wang 等^[92]通过带宽增强和平坦度优化将实时随机数发生器码率提升至 14 Gbit/s。2019 年,西安电子科技大学 Xiang 等^[93]提出一种基于混沌半导体激光器网络的多通道物理随机比特发生器,可产生 7 路随机比特序列,比特率高达 2.24 Tbit/s。

2022 年,中国科学院半导体研究所黄永箴团队^[74]利用自发混沌微腔激光器实现一种更加简单的高速随机数产生方法,可产生 500 Gbit/s 的物理随机数^[75]。2023 年,太原理工大学 Cai 等^[94]设计并验证了一种基于 1/4 波长相移的 DFB 激光器的物理随机数发生器,实现了比特率达 Tbit/s 的双通道随机数。

5.3 混沌激光雷达

激光雷达具有方向性强、分辨率高、探测效率高特点,在自动驾驶、三维成像等领域均有广泛的应用。混沌激光具有类噪声和宽频谱的特性,将其用作激光雷达探测信号时,可以实现良好的抗干扰性能和高距离分辨率。2001 年,Myneeni 等^[95]率先将混沌激光用于高精度测距。2004 年,加州大学洛杉矶分校 Lin 等^[96]提出混沌激光雷达的概念,实现了 3 cm 距离分辨率。此后,研究者们针对混沌激光雷达性能的提升进行了一系列研究。2008 年,太原理工大学 Wang 等^[97]基于混沌激光雷达实现了多目标实时探测。2013 年,克拉克森大学 Rumbaugh 等^[98]利用混沌激光雷达实现了水

下目标的探测。

2018 年,Cheng 等^[99]开发了脉冲混沌激光雷达系统,实现了毫米级的测距精度,并于 2021 年基于该系统实现了高速 3D 成像^[100]。2022 年,该团队采用时分复用技术实现了多输入多输出的脉冲混沌激光雷达,并演示了在干扰影响下的 3D 成像^[101]。2023 年,北京大学 Chen 等^[11]引入混沌微梳光源,构建了并行激光雷达系统,可以实现无串扰、毫米级的测距精度。

5.4 混沌分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术可以实现光纤沿线任意位置的物理量监测,成为国内外的研究热点。混沌激光作为布里渊光相干域分析(BOCDA)技术的传感信号,基于其类 δ 函数特性拓展系统传感距离、宽频谱改善空间分辨率,可以实现兼顾高空间分辨率与长传感距离的温度、应变测量^[102]。2018 年,本课题组^[103]提出混沌 BOCDA 系统,通过优化混沌 TDS,实现了 3.2 km、空间分辨率为 7.4 cm 的分布式测量。进一步引入时域门控方案,利用脉冲信号对泵浦光进行强度调制,可以在 10.2 km 传感光纤上实现空间分辨率为 9 cm 的分布式温度传感。2019 年,以带宽为 10 GHz 的混沌激光器作为传感光源,在 165 m 长的传感光纤上实现了空间分辨率为 3.5 mm 的分布式应变测量^[112]。

2021 年,本课题组^[104]提出混沌拉曼光时域反射仪(ROTDR)技术,以混沌激光作为传感源,克服了脉冲宽度对传感空间分辨率的限制,在 500 ns 脉冲宽度的调制下,空间分辨率为 30 cm。进一步地,进行了空间分辨率为 10 cm、传感距离为 1.4 km 的实验,结果表明,混沌 ROTDR 系统可克服脉冲宽度对系统空间分辨率的限制,实现传感光纤分布式温度监测。在现有空间分辨率理论的限制下,该方案的空间分辨率比传统方案高 50 倍^[105]。

5.5 混沌光时域反射计

光时域反射计(OTDR)被广泛应用于光纤故障检测等领域,具有检测精度高、测量距离远、无损伤探测等优点。传统的脉冲式 OTDR 原理上存在长检测距离与高定位精度相互制约的矛盾,相关法 OTDR(C-OTDR)利用伪随机光脉冲序列代替传统单脉冲,可在保持高定位精度不变的同时通过增加码长进一步提高测量距离,但其测量精度受限于伪随机调制仪的电子带宽。

2008 年,太原理工大学 Wang 等^[14]首次提出并实验验证了混沌 C-OTDR 的可行性,实现了 140 m 范围内空间分辨率为 6 cm 的故障定位。此后研究者们对混沌 C-OTDR 进行了系列研究^[106],引入波长可调谐混沌激光器用于波分复用系统中多路光纤故障检测^[107],利用脉冲调制混沌机制,将空间分辨率提升至 2 cm^[108]。

同时,采用光子集成混沌激光器提升系统的紧凑性和稳定性。本课题组^[109]基于混合集成短外腔混沌半导体激光器,实现了对多反射事件的测量,在 76.54 km 的

测量距离上实现了 1 cm 的空间分辨率。中国科学院半导体研究所 Zhang 等^[110]基于单片集成宽带混沌激光器实验实现了 47 km、空间分辨率为 2.6 mm 的光纤故障检测。

6 总结与展望

本文阐述了基于半导体激光器产生混沌激光的机制,总结了混沌半导体激光器的频谱带宽提升和时延特征抑制,以及集成化在近年来的研究进展。重点介绍了混沌半导体激光器在混沌保密光通信、随机数生成器、激光雷达、分布式光纤传感技术和混沌光时域反射计等方面的应用,随着混沌激光性能的提升,未来有望在关联成像、毫米波雷达、太赫兹检测等领域有进一步的应用。

参 考 文 献

- [1] Maiman T H. Stimulated optical emission in fluorescent solids. I. theoretical considerations[J]. *Physical Review*, 1961, 123(4): 1145-1150.
- [2] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers[J]. *Physics Letters A*, 1975, 53(1): 77-78.
- [3] Dangoisse D, Glorieux P, Midavaine T. Observation of chaos in a frequency modulated CO₂ laser[C]//International Meeting on Instabilities and Dynamics of Lasers and Nonlinear Optical Systems, June 18-21, 1985, Rochester, New York. Washington, DC: Optica Publishing Group, 1985: FA6.
- [4] Uchida A, Sato T, Ogawa T, et al. Nonfeedback control of chaos in a microchip solid-state laser by internal frequency resonance[J]. *Physical Review E*, 1998, 58(6): 7249-7255.
- [5] Sanchez F, LeFlohic M, Stephan G M, et al. Quasi-periodic route to chaos in erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 481-488.
- [6] Mukai T, Otsuka K. New route to optical chaos: successive-subharmonic-oscillation cascade in a semiconductor laser coupled to an external cavity[J]. *Physical Review Letters*, 1985, 55(17): 1711-1714.
- [7] 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.
- [8] 赵安可, 江宁, 王超, 等. 基于生成对抗网络的混沌激光同步优化[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0114002. Zhao A K, Jiang N, Wang C, et al. Synchronization optimization of chaotic laser based on generative adversarial network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0114002.
- [9] Zhang Y Q, Xu M F, Pu M B, et al. Simultaneously enhancing capacity and security in free-space optical chaotic communication utilizing orbital angular momentum [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(12): 2185-2193.
- [10] 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.
- [11] Chen R X, Shu H W, Shen B T, et al. Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(4): 306-314.
- [12] Wang Y H, Zhang M J, Zhang J Z, et al. Millimeter-level-spatial-resolution Brillouin optical correlation-domain analysis based on broadband chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3706-3712.
- [13] Wang Y H, Hu X X, Niu L T, et al. Long-range chaotic Brillouin optical correlation domain analysis with more than one million resolving points[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(3): 036011.
- [14] 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.
- [15] Kai C, Li P, Wang B J, et al. Time delay signature extraction of optical-feedback-induced chaos with reservoir computing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(6): 7700407.
- [16] Arecchi F T, Lippi G L, Puccioni G P, et al. Deterministic chaos in laser with injected signal[J]. *Optics Communications*, 1984, 51(5): 308-314.
- [17] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers[J]. *Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B*, 1997, 9(5): 765-784.
- [18] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [19] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A. Bandwidth enhancement and broadband noise reduction in injection-locked semiconductor lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(7): 709-711.
- [20] Uchida A, Heil T, Liu Y, et al. High-frequency broadband signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11): 1462-1467.
- [21] 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.
- [22] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [23] Schires K, Gomez S, Gallet A, et al. Passive chaos bandwidth enhancement under dual-optical feedback with hybrid III - V/Si DFB laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6): 1801309.
- [24] 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.
- [25] Bouchez G, Uy C H, Macias B, et al. Wideband chaos from a laser diode with phase-conjugate feedback[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 975-978.
- [26] Lin F Y, Liu J M. Nonlinear dynamical characteristics of

- an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Optics Communications*, 2003, 221(1/2/3): 173-180.
- [27] Lin F Y, Chao Y K, Wu T C. Effective bandwidths of broadband chaotic signals[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 1010-1014.
- [28] Büchner M J, Popp M, Meyer T, et al. Tool to recover scalar time-delay systems from experimental time series [J]. *Physical Review E*, 1996, 54(4): R3082-R3085.
- [29] Udaltsov V S, Larger L, Goedgebuer J P, et al. Time delay identification in chaotic cryptosystems ruled by delay-differential equations[J]. *Journal of Optical Technology*, 2005, 72(5): 373-377.
- [30] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17): 174102.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Li S S, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 541-552.
- [34] Li S S, Zou X H, Zhang L Y, et al. Band-rejection feedback for chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 1517208.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Zhang J Z, Li M W, Wang A B, et al. Time-delay-signature-suppressed broadband chaos generated by scattering feedback and optical injection[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6314-6317.
- [38] Pan B W, Lu D, Zhao L J. Broadband chaos generation using monolithic dual-mode laser with optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(23): 2516-2519.
- [39] 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.
- [40] Wang A B, Wang B J, Li L, 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.
- [41] Chang D, Zhong Z Q, Tang J M, et al. Flat broadband chaos generation in a discrete-mode laser subject to optical feedback[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39076-39083.
- [42] 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.
- [43] Yang Q, Qiao L J, Wei X J, et al. Flat broadband chaos generation using a semiconductor laser subject to asymmetric dual-path optical feedback[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19): 6246-6252.
- [44] Mu P H, Pan W, Yan L S, et al. Experimental evidence of time-delay concealment in a DFB laser with dual-chaotic optical injections[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(2): 131-134.
- [45] Qu Y, Xiang S Y, Wang Y, et al. Concealment of time delay signature of chaotic semiconductor nanolasers with double chaotic optical injections[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(2): 2000407.
- [46] Zhang R H, Zhou P, Yang Y G, et al. Enhancing time-delay suppression in a semiconductor laser with chaotic optical injection via parameter mismatch[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7197-7206.
- [47] Xu S R, Jia X H, Ma H L, et al. Random-injection-based two-channel chaos with enhanced bandwidth and suppressed time-delay signature by mutually coupled lasers: proposal and numerical analysis[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(1): 014203.
- [48] Yu M T, Wang H X, Ji Y F. Investigation on the complex and tunable laser chaos generated by the microresonator optical combs injection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(1): 0600110.
- [49] Xu Y P, Zhang L, Lu P, et al. Time-delay signature concealed broadband gain-coupled chaotic laser with fiber random grating induced distributed feedback[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 654-658.
- [50] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, et al. Evolution of time delay signature of chaos generated in a mutually delay-coupled semiconductor lasers system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1741-1753.
- [51] Wang B, Qiao L J, Wei X J, et al. Evolution of the time delay signature of chaos generated in three types of optical injection systems[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(18): 4899-4905.
- [52] Zhao A K, Jiang N, Peng J F, et al. Parallel generation of low-correlation wideband complex chaotic signals using CW laser and external-cavity laser with self-phase-modulated injection[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(5): 200026.
- [53] Zhang M J, Liu T G, Wang A B, et al. Photonic ultrawideband signal generator using an optically injected chaotic semiconductor laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 1008-1010.
- [54] 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.

- [55] Zhao A K, Jiang N, Chang C C, et al. Generation and synchronization of wideband chaos in semiconductor lasers subject to constant-amplitude self-phase-modulated optical injection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13292-13298.
- [56] 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.
- [57] Wei X J, Qiao L J, Wang B, et al. Generation of wideband chaos with time-delay signature suppression in semiconductor lasers by asymmetrical mutual injection[J/OL]. *Journal of Lightwave Technology*: 1-10[2023-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10273610>.
- [58] Argyris A, Hamacher M, Chlouverakis K E, et al. Photonic integrated device for chaos applications in communications[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(19): 194101.
- [59] Chlouverakis K E, Argyris A, Bogris A, et al. Hurst exponents and cyclic scenarios in a photonic integrated circuit[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(6): 066215.
- [60] Tronciu V Z, Mirasso C R, Colet P, et al. Chaos generation and synchronization using an integrated source with an air gap[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(12): 1840-1846.
- [61] Tronciu V Z, Mirasso C R, Colet P. Chaos-based communications using semiconductor lasers subject to feedback from an integrated double cavity[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2008, 41(15): 155401.
- [62] Harayama T, Sunada S, Yoshimura K, et al. Fast nondeterministic random-bit generation using on-chip chaos lasers[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(3): 031803.
- [63] Sunada S, Harayama T, Arai K, et al. Chaos laser chips with delayed optical feedback using a passive ring waveguide[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5713-5724.
- [64] Sunada S, Fukushima T, Shinohara S, et al. A compact chaotic laser device with a two-dimensional external cavity structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24): 241105.
- [65] Wu J G, Zhao L J, Wu Z M, et al. Direct generation of broadband chaos by a monolithic integrated semiconductor laser chip[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23358-23364.
- [66] Yu L Q, Lu D, Pan B W, et al. Monolithically integrated amplified feedback lasers for high-quality microwave and broadband chaos generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3595-3601.
- [67] Li S H, Qiao L J, Chai M M, et al. Monolithically integrated laser with DBR for wideband and low time delay signature chaos generation[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1191597.
- [68] Chai M M, Qiao L J, Li S H, et al. Wavelength-tunable monolithically integrated chaotic semiconductor laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 5952-5957.
- [69] Vaughan M P, Henning I, Adams M J, et al. Mutual optical injection in coupled DBR laser pairs[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 2033-2041.
- [70] Cemlyn B R, Labukhin D, Henning I D, et al. Dynamic transitions in a photonic integrated circuit[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(2): 261-268.
- [71] Liu D, Sun C Z, Xiong B, et al. Nonlinear dynamics in integrated coupled DFB lasers with ultra-short delay[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5614-5622.
- [72] Ohara S, Dal Bosco A K, Ugajin K, et al. Dynamics-dependent synchronization in on-chip coupled semiconductor lasers[J]. *Physical Review E*, 2017, 96(3): 032216.
- [73] Chai M M, Qiao L J, Zhang M J, et al. Simulation of monolithically integrated semiconductor laser subject to random feedback and mutual injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(5): 2001008.
- [74] Ma C G, Xiao J L, Xiao Z X, et al. Chaotic microlasers caused by internal mode interaction for random number generation[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 187.
- [75] Li J C, Xiao J L, Yang Y D, et al. Random bit generation based on a self-chaotic microlaser with enhanced chaotic bandwidth[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(21): 4109-4116.
- [76] Zhao A K, Jiang N, Liu S Q, et al. Wideband time delay signature-suppressed chaos generation using self-phase-modulated feedback semiconductor laser cascaded with dispersive component[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 5132-5139.
- [77] Mu P H, Pan W, Yan L S, et al. Experimental evidence of time-delay concealment in a DFB laser with dual-chaotic optical injections[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(2): 131-134.
- [78] Lukashchuk A, Riemensberger J, Tusnín A, et al. Chaotic microcomb-based parallel ranging[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(9): 814-821.
- [79] Mirasso C R, Colet P, Garcia-Fernandez P. Synchronization of chaotic semiconductor lasers: application to encoded communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(2): 299-301.
- [80] VanWiggeren G D, Roy R. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, 279(5354): 1198-1200.
- [81] Lavrov R, Jacquot M, Larger L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10 Gb/s chaos communications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(10): 1430-1435.
- [82] Ke J X, Yi L L, Xia G Q, et al. Chaotic optical communications over 100-km fiber transmission at 30-Gb/s bit rate[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1323-1326.
- [83] Gao Z S, Wu Q Q, et al. Experimental demonstration of synchronous privacy enhanced chaotic temporal phase encryption for high speed secure optical communication [J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 31209-31219.
- [84] Wang Z Y, Shen L, Yang M, et al. High-speed chaos-based secure optical communications over 130-km multi-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(17): 4440-4443.
- [85] Hou T T, Yi L L, Yang X L, et al. Maximizing the

- security of chaotic optical communications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23439-23449.
- [86] Nguimdo R M, Colet P, Larger L, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 034103.
- [87] Wang D M, Wang L S, Guo Y Y, et al. Key space enhancement of optical chaos secure communication: chirped FBG feedback semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3065-3073.
- [88] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, et al. Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(2): 024102.
- [89] Kanter I, Aviad Y, Reidler I, et al. An optical ultrafast random bit generator[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 58-61.
- [90] Li X Z, Chan S C. Random bit generation using an optically injected semiconductor laser in chaos with oversampling[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2163-2165.
- [91] 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.
- [92] Wang L S, Zhao T, Wang D M, et al. Real-time 14-gbps physical random bit generator based on time-interleaved sampling of broadband white chaos[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7201412.
- [93] Xiang S Y, Wang B, Wang Y, et al. 2.24-Tb/s physical random bit generation with minimal post-processing based on chaotic semiconductor lasers network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(16): 3987-3993.
- [94] Cai Q, Li P, Shi Y C, et al. Tbps parallel random number generation based on a single quarter-wavelength-shifted DFB laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 162: 109273.
- [95] Myneni K, Barr T A, Reed B R, et al. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(11): 1496-1498.
- [96] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [97] Wang B J, Wang Y C, Kong L Q, et al. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 868-870.
- [98] Rumbaugh L K, Bollt E M, Jemison W D, et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging[C]//2013 OCEANS, September 23-27, 2013, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013.
- [99] Cheng C H, Chen C Y, Chen J D, et al. 3D pulsed chaos lidar system[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12230-12241.
- [100] Ho H L, Chen J D, Yang C A, et al. High-speed 3D imaging using a chaos lidar system[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2022, 231(3): 435-441.
- [101] Chen J D, Wu K W, Ho H L, et al. 3-D multi-input multi-output (MIMO) pulsed chaos lidar based on time-division multiplexing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 0600209.
- [102] Zhang J Z, Feng C K, Zhang M J, et al. Brillouin optical correlation domain analysis based on chaotic laser with suppressed time delay signature[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6962-6972.
- [103] 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.
- [104] Li J, Wang C Y, Cao K Y, et al. Breakthrough the physical barrier on spatial resolution in Raman distributed fiber sensing using chaotic correlation demodulation[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(7): 076105.
- [105] Wang C Y, Li J, Zhou X X, et al. Chaos Raman distributed optical fiber sensing[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 213.
- [106] Hu Z H, Wang B J, Wang L S, et al. Improving spatial resolution of chaos OTDR using significant-bit correlation detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(13): 1029-1032.
- [107] Wang A B, Wang N, Yang Y B, et al. Precise fault location in WDM-PON by utilizing wavelength tunable chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(21): 3420-3426.
- [108] Dong X Y, Wang A B, Zhang J G, et al. Combined attenuation and high-resolution fault measurements using chaos-OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6804006.
- [109] Li M W, Zhang X C, Zhang J Z, et al. Long-range and high-precision fault measurement based on hybrid integrated chaotic laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1389-1392.
- [110] Zhang L M, Pan B W, Chen G C, et al. Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry using a monolithic integrated broadband chaotic laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1253-1256.