

## 光子集成混沌半导体激光器研究进展 (特邀)

柴萌萌<sup>1,2</sup>, 乔丽君<sup>1</sup>, 张明江<sup>1,2</sup>, 卫晓晶<sup>1,2</sup>, 杨强<sup>1</sup>, 徐红春<sup>3</sup>

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 430205)

**摘要:** 混沌激光具有宽频谱、类噪声、低相干等特性, 在保密光通信、高速随机数、混沌激光雷达、混沌光时域反射仪和分布式光纤传感等领域具有重要的应用价值。光子集成混沌激光器是混沌激光应用的核心器件, 具有体积小、性能稳定、成本低等优点。综述了近十年来光子集成混沌半导体激光器的进展及其主要应用。首先介绍了混沌半导体激光器的集成方式; 接着介绍了光子集成混沌半导体激光器的分类, 根据其扰动方式讨论了直腔单反馈、多腔反馈、环形腔反馈、二维外腔反馈、互注入等结构, 并对比分析了各自的优势与输出特性; 然后介绍了光子集成混沌半导体激光器在光时域反射仪、保密光通信和高速随机数产生等方面的应用; 最后, 讨论了光子集成混沌激光器的关键集成技术、时延特征抑制及间歇混沌的特性。

**关键词:** 光子集成; 混沌半导体激光器; 光反馈; 互注入

**中图分类号:** TN242      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201066

## Progress in photonic integrated chaotic semiconductor laser (*Invited*)

Chai Mengmeng<sup>1,2</sup>, Qiao Lijun<sup>1</sup>, Zhang Mingjiang<sup>1,2</sup>, Wei Xiaojing<sup>1,2</sup>, Yang Qiang<sup>1</sup>, Xu Hongchun<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
3. Accelink Technology Co. Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Chaotic laser has been widely applied in the fields of secure optical communication, random number generation, chaotic lidar, chaotic optical time domain reflector and distributed optical fiber sensing due to its characteristics of wide-spectrum, noise-like, low-coherence and so on. Photonic integrated chaotic semiconductor laser is a kind of chaotic laser which is small in size, stable and low-cost. The progress of photonic integrated chaotic semiconductor laser and its main applications in recent ten years were reviewed. Firstly, the photonic integrated methods of chaotic semiconductor laser were introduced. Then, the classification of photonic integrated chaotic semiconductor lasers was demonstrated. According to the perturbation mode, the external cavity structures

收稿日期: 2020-09-28; 修订日期: 2020-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61527819, 61875146); 山西省重点研发计划 (201803D121064, 201903D121177); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2017-052); 山西省青年基金 (201801D221187); “三晋学者”特聘教授 (专家) 支持计划; 山西省高等学校科技成果转化培育项目资助

作者简介: 柴萌萌 (1996-), 女, 博士生, 主要从事光子集成混沌半导体激光器方面的研究工作。Email: chaimengmeng0154@link.tyut.edu.cn

导师简介: 张明江 (1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子集成混沌激光器与分布式光纤传感方面的研究工作。

Email: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

including straight cavity, multiple-cavity, ring cavity, two-dimensional cavity and mutual injection were discussed. The advantages and characteristics of these devices were compared. Furthermore, the applications of photonic integrated chaotic semiconductor lasers in optical time domain reflectometer, secure optical communication and random number generation were introduced. Finally, the key integration techniques, time delay signature and intermittent chaos in photonic integrated chaotic laser were discussed.

**Key words:** photonic integration; chaotic semiconductor laser; optical feedback; mutual injection

## 0 引言

1960年,第一台红宝石激光器诞生<sup>[1]</sup>,不久之后,就有学者观察到激光器中的非线性动力学状态<sup>[2]</sup>。随着混沌理论的发展,1980年代,混沌激光这一概念被提出<sup>[3]</sup>,随后围绕混沌激光的产生方式<sup>[4-6]</sup>与应用展开了系列研究。混沌激光是激光器一种不稳定的输出状态,具有低相干性、宽频谱、时序随机和初始值敏感等特性,由于具有以上特性,混沌激光在保密光通信、高速随机数、激光雷达、光存储、分布式光纤传感等领域<sup>[7-12]</sup>具有重要的应用价值。混沌激光可以用作分布式光纤传感的宽带激光源,以及产生高速随机数的物理熵源,也可以作为载波信号在保密光通信系统中对信息进行加密等。

传统混沌激光源是由分立器件搭建而成的,系统庞大、易受外界环境影响、功耗大等问题都限制着混沌激光在实际工程中的应用。伴随着半导体激光器、光电探测器以及平面介质光波导等研究的不断发展,和微纳加工技术的日臻完善,将不同功能的光学有源器件和无源器件集成在一起实现激光产生、调制等功能成为可能,基于光子集成技术的混沌半导体激光器的研究逐渐兴起。与分立器件组成的混沌激光源相比,集成混沌激光器体积小、性能稳定、成本低,更易于应用到保密光通信,随机数发生器,以及分布式光纤传感检测等工程中。

文中系统地介绍了近年来光子集成混沌激光器的研究动态和不同结构的光子集成混沌半导体激光器,并对集成混沌半导体激光器的性能进行了分析与总结。同时,总结了光子集成混沌激光器在光时域反射仪、保密光通信和随机数产生等领域的应用。

## 1 混沌半导体激光器集成方式

根据目前已有的技术方案,实现混沌半导体激光器集成主要包括单片集成和混合集成两种方式。

单片集成混沌半导体激光器是将激光源、调制器、光波导等半导体器件在同一衬底上制作,通过设计不同区域的材料和波导结构在单个芯片上实现发光、调制、传输等功能,并通过光反馈、光注入、光电调制等结构产生混沌激光信号。例如,2013年,赵玲娟等人提出了一种放大反馈激光器芯片 (Amplifier Feedback Laser, AFL),激光器区和放大区多量子阱采用 InGaAsP 材料,并采用量子阱混杂技术使有源区带隙波长蓝移以制作相区。目前,光子集成芯片的制备主要是基于硅 (Silicon, Si) 基和 InP 基,由于 Si 属于间接带隙半导体材料,发光效率较低,而在混沌半导体激光器中光源是必不可少的组成部分,因此 InP 基是目前较理想的实现单片集成混沌半导体激光器的材料平台,基于该平台可以设计具有光产生、光放大、和光电探测等功能的有源器件。

混合集成是将不同的光电子元件通过机械耦合、键合和粘合等技术手段集成在一起。通过混合集成的方法也可以进行光子集成混沌半导体激光器的设计。例如,笔者所在课题组于 2017 年提出混合集成短外腔混沌半导体激光器,通过机械耦合的方式将分布式反馈 (Distributed Feedback, DFB) 激光器芯片与准直透镜、半透半反镜、聚焦透镜耦合,实现混沌激光的输出。采用混合集成的设计方法不仅可以实现微型光学器件的集成,还可以实现 Si 基无源器件与 InP 基上制作的有源器件集成,较好的利用目前成熟的 Si 或者绝缘衬底上的硅 (Silicon-on-Insulator, SOI) 工艺,例如 SOI 波导、衍射光栅等。但是 InP 基材料与其他材料之间存在晶格失配,光子集成难度较大。而且集成器件的出光面和体积较小,耦合时光路对准难度较大,对准精度的不足会造成较大的传输损耗。

目前,光子集成工艺加工平台主要有欧洲 JePPiX 平台,例如, Guy Verschaffelt 等人提出的螺旋波导长腔混沌半导体激光器便是基于此平台设计加工的。

此外,日本 NTT 公司和美国 Infinera 等公司也具备光子集成芯片设计与加工平台。

## 2 光子集成混沌激光器的分类

半导体激光器属于 B 类激光器,外加扰动可产生混沌激光。目前 InP 基的 DFB 激光器工艺成熟,因此集成混沌半导体激光器多采用 DFB 激光器作为光源。基于半导体激光器产生混沌激光的方式主要有光反馈、光注入、光电反馈等,其中光反馈是产生混沌激光的典型方式,在光子集成混沌半导体激光器中也最容易实现。光子集成混沌半导体激光器与分立器件组成的混沌激光器产生混沌激光的原理一致,均是半导体激光器在外部扰动或者调制下产生非线性动力学特性。根据外腔结构和扰动方式的不同,光子集成混沌半导体激光器主要包括以下几种结构。

### 2.1 直腔单反馈结构

直腔单反馈结构以半导体激光器为光源,以直波导作为外腔结构传输光,在波导横截面上镀高反膜提供光反馈,并集成其他的半导体器件对激光进行相位调制、光放大等产生混沌激光。这种结构产生混沌激光的原理是:半导体激光器加载外部电流出射激光,激光通过器件截面处的反射膜反射回半导体激光器内腔,对激光器内腔载流子-光子的平衡进行扰动,造成激光强度的不稳定。直腔单反馈结构单片集成混沌半导体激光器输出动态特性的不同主要是由于研究者在集成器件中设计了不同的调制器件以达到相位调制、光放大等功能。

2008 年, Apostolos Argyris 等人提出一种四段式直腔单反馈光子集成混沌半导体激光器<sup>[13-14]</sup>。如图 1(a)所示,该芯片由 DFB 激光器区、增益/吸收区、相区和末端镀有高反膜的无源光波导采用选区外延法集成。其中,无源光波导末端所镀的高反膜为 DFB 激光器提供单反馈光;相区以亚波长分辨率精确地调整腔的往返时间;增益/吸收区可用于调节反馈光的强度,在反向偏置的工作条件下,该区是一个可调光衰减器;当增益/吸收区不加电流时,它是一个损耗很大的吸收区;当增益/吸收区正向偏置时,它是一个半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA),为经过的光提供光增益。该四段式结构能够在不同的参数空间下产生丰富的动力学状态,包括稳态、周

期态、复杂混沌。例如,当 DFB 激光器区偏置电流和增益/吸收区电流固定时,调节相区电流从 4.1 mA 至 11.3 mA,该芯片先按倍周期路径进入混沌状态,再通过反倍周期路径从混沌状态回到稳态<sup>[15]</sup>。通过改变 DFB 激光器的偏置电流,可以改变激光器的弛豫振荡频率,采用这种方式可以改变 DFB 激光器芯片的弛豫振荡频率和外腔振荡频率之比,从而使激光器处于长腔光反馈或者短腔光反馈。2015 年, Joshua P. Toomey 等人基于此机制,通过调节 DFB 激光器区的偏置电流研究了该四段式单片集成芯片短腔和长腔机制之间的过渡转换。研究表明,长腔结构的混沌激光源能更好地满足应用需求。在该四段式结构中,腔长为 1 cm 的条件下,DFB 区的偏置电流大于 40 mA,可保证该器件工作在长腔结构下,输出宽带平坦的混沌激光<sup>[16]</sup>。在 DFB 激光器区电流、相位区电流、增益/吸收区电流这三个参数构成的空间内,该四段式单片

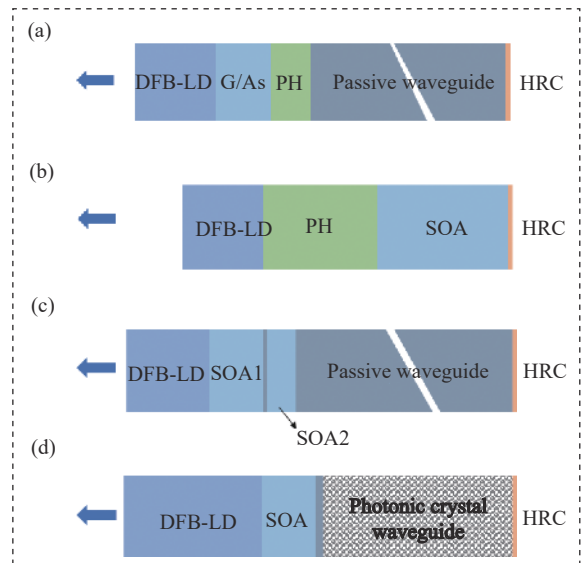


图 1 直腔单反馈结构单片集成混沌半导体激光器。(a) 四段式, (b) AFL, (c) 双 SOA, (d) 光子晶体反馈。DFB-LD: 分布式反馈半导体激光器; G/As: 增益/吸收区; PH: 相区; SOA: 半导体光放大器; HRC: 高反膜; Passive waveguide: 无源光波导; Photonic crystal waveguide: 光子晶体波导

Fig.1 Single-feedback monolithically integrated chaotic semiconductor laser with straight external cavity. (a) Four-section structure, (b) AFL, (c) double-SOA structure, (d) photonic crystal structure. DFB-LD: Distributed feedback laser diode; G/As: Gain/Absorption section; PH: Phase section; SOA: Semiconductor optical amplifier; HRC: High reflection film

集成混沌激光器输出的动力学特性和复杂度各不相同, Joshua P. Toomey 等人提出了一种时间尺度独立排序熵对这些混沌信号的复杂度进行表征<sup>[17]</sup>, 复杂度高的混沌激光更适合应用于随机数的产生或者混沌保密光通信等。

2013 年, 夏光琼等人提出了一种 AFL 芯片产生混沌激光<sup>[18-20]</sup>。如图 1(b) 所示, 该芯片包含 DFB 激光器区、相区和 SOA 区。在该 AFL 芯片中, DFB 激光器区和 SOA 区采用相同的多量子阱结构。采用量子阱混杂技术使得相区带隙波长蓝移, 降低相区的吸收损耗。通过在 SOA 端涂覆高反膜产生高反射率。在该芯片中, 由 SOA 区控制反馈光强度, 由相位区调节反馈光相位。当 SOA 区电流较小时, 通过调节相区电流, 该 AFL 芯片输出状态路径为稳态-单倍周期-二倍周期-混沌, 当 SOA 区电流较大的时候, 激光器会产生 M-B(mode-beating) 脉冲, 单倍周期振荡的频率大概为 10 GHz, M-B 脉冲频率最大可达 40 GHz。为了进一步增大混沌激光的带宽, 潘碧玮等人提出了基于该 AFL 芯片的自注入扰动法, 如图 2(a) 所示, 在该 AFL 芯片外部加光纤环进行自注入扰动, 用于产生宽带的混沌激光。AFL 芯片自由运行时输出双模激光, 经过外部的光纤环路提供光反馈扰动, 两个激光模式的混沌激光相互耦合可以产生频谱覆盖范

围超过 50 GHz, 有效带宽为 28 GHz, 频谱平坦度为 6.3 dB 的混沌激光<sup>[21]</sup>。夏光琼等人提出了另一种增强混沌激光带宽的方法, 如图 2(b) 所示, 该方法研究了在外光注入扰动下该 AFL 芯片输出混沌激光的带宽特性。引入外光注入后, 通过调节注入光功率大小及失谐频率大小, 能够使 AFL 芯片产生的混沌激光有效带宽从 14.36 GHz 增加到 36.00 GHz<sup>[22]</sup>。虽然调节 AFL 芯片的增益区和相区电流大小也可以改变激光器输出的动态特性, 但是调节范围很小。而在外光注入下, 通过调节合适的注入强度和频率失谐总能使其他动态特性下的单片集成半导体激光器进入混沌状态, 较大的 SOA 区电流也有助于获得广泛而连续的混沌范围<sup>[23]</sup>。

为了进一步增加 AFL 芯片的功能, 赵玲娟等人将 PD (光电探测器) 集成在该芯片上, 用于实现光电转换, 实现了一种基于光子集成芯片的光电振荡器<sup>[24]</sup>。

2011 年, Takahisa Harayama 等人提出一种双 SOA 结构的单片集成混沌半导体激光器芯片, 如图 1(c) 所示, 该芯片由一个 PD、一个 DFB 激光器、两个 SOA 和一段无源光波导组成。其中 DFB 区、SOA 区、和 PD 区为多量子阱结构, 通过 MOCVD (金属-有机化合物气相外延法) 生长在 InP 基衬底上。DFB 区的光栅刻蚀深度为 30 nm, 栅间距为 234 nm, 布拉格波长为 1550 nm。该结构中主要通过 SOA 区控制反馈光的强度和相位, 其中两个 SOA 区是独立的, 长度分别为 200  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>。这一结构的优势在于两个 SOA 的长度不同, 可以对光反馈强度和相位进行粗调和细调。该结构中 PD 的探测带宽为 20 GHz, PD 和器件的其他部分隔离开制作, 以此来避免光电流和注入电流的混合。该器件的外腔为 DFB 区的右截面与反射镜面之间的部分, 可以通过调节无源光波导的长度改变外腔反馈时延。通过调节反馈强度, 双 SOA 结构的混沌半导体激光器芯片可以输出稳态、自脉冲、准周期状态和混沌状态。

2014 年, 赵青春等人提出以光子晶体波导作为外腔的单片集成混沌半导体激光器仿真模型, 该结构包括: DFB 激光器, SOA 区, 无源光波导, 光子晶体波导, 在光子晶体波导的末端镀有反射膜, 为 DFB 激光器提供光学反馈, 如图 1(d) 所示。在该模型中, 通过引入光子晶体波导的慢光效应可在较小的长度内提

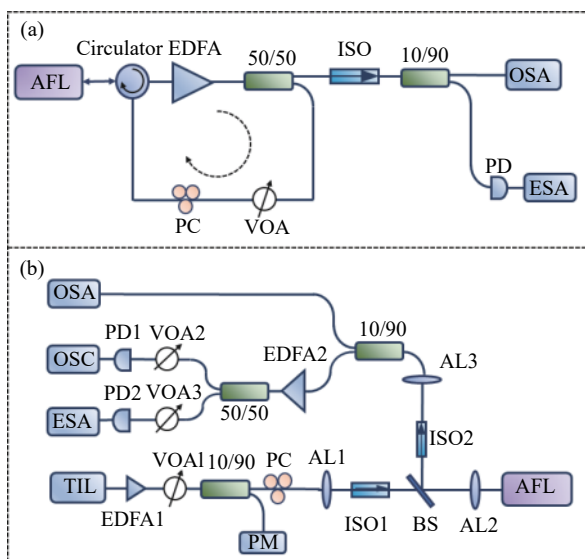


图 2 (a) 基于 AFL 芯片的自注入扰动法; (b) 基于 AFL 芯片的外光注入法

Fig.2 (a) Self-injection based on the AFL; (b) Optical-injection based on the AFL

供大的时间延迟,该结构可以减小器件的尺寸,降低功耗<sup>[26]</sup>。

以上这些直腔单反馈集成混沌半导体激光器都是基于单片集成工艺进行设计和研制的。除此之外,微型光学器件之间的混集成也可以用于集成混沌半导体激光器的设计,具有易于制作,成本较低等优势。2017年,笔者所在课题组提出了一种混集成短腔反馈的混沌半导体激光器。如图 3 所示,该激光器由 DFB 激光器芯片、准直透镜、透反镜、聚焦透镜、光纤组件耦合而成,其中透反镜为 DFB 激光器芯片提供单反馈,准直透镜和聚焦透镜用于光路整形以提高耦合效率,产生的混沌激光由光纤组件尾纤输

出<sup>[27]</sup>。该结构的反馈强度是由透反镜的反射率进行调节。为了确定该结构中的外腔长度和反射镜的反射率,建立了与本结构相对应的仿真模型,提取不同 DFB 激光器芯片的内部参数,通过 Lang-Kobayashi 方程对其关键参数进行仿真模拟,以此对器件的设计和封装进行指导<sup>[28]</sup>。

在此混集成混沌半导体激光器中,通过调节 DFB 激光器的偏置电流,混沌激光的频谱、带宽、峰值功率和中心频率都会发生变化,图 4 是该混集成混沌半导体激光器一个典型的输出状态,从图 4(a)可以看出,混沌激光的时序随时间无规则变化,图 4(b)为激光器频谱图,频谱在 0~9 GHz 内抬升,80% 带宽

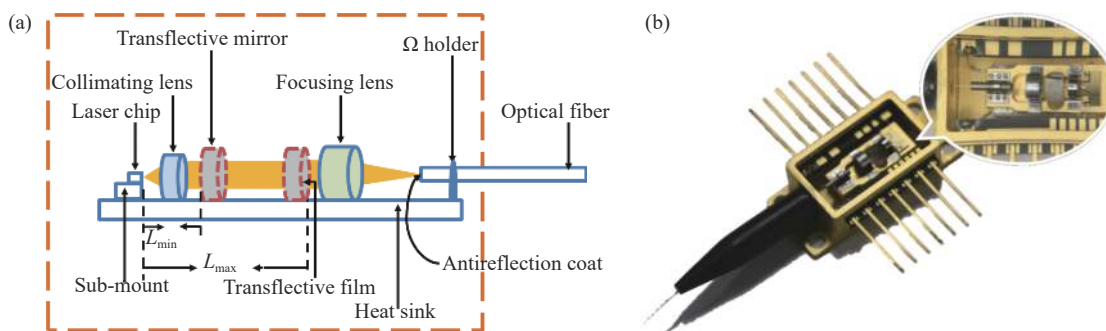


图 3 混集成混沌半导体激光器的示意图。(a) 结构示意图; (b) 实物图

Fig.3 Hybrid integrated chaotic semiconductor laser. (a) Structure diagram; (b) Object picture

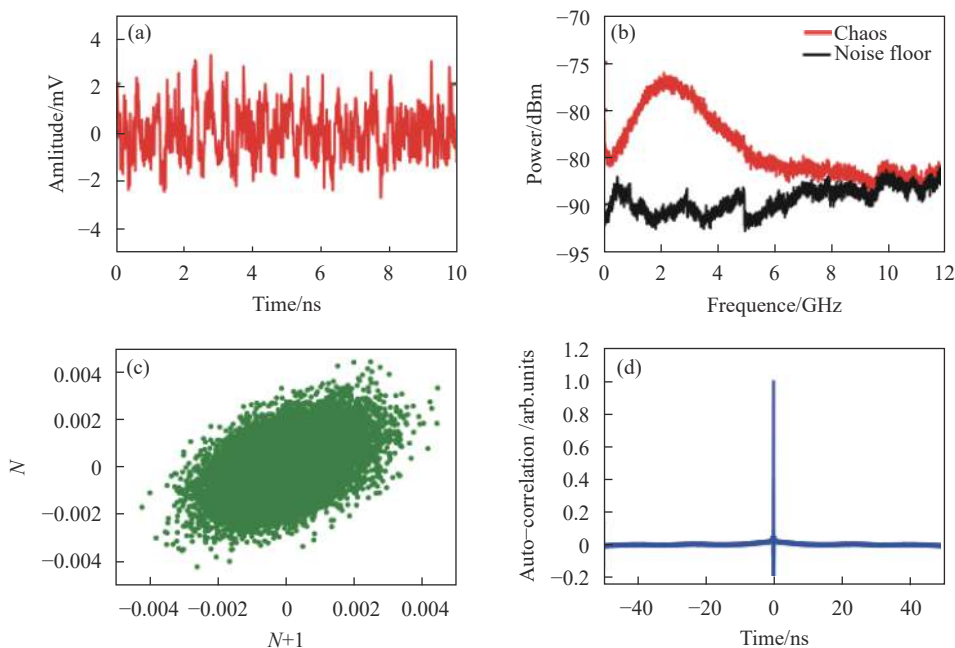


图 4 混集成混沌半导体激光器典型输出。(a) 时序; (b) 频谱; (c) 相图; (d) 自相关曲线

Fig.4 Typical dynamics of Hybrid integrated chaotic semiconductor laser. (a) Time series; (b) Power spectra; (c) Phase portraits; (d) Autocorrelation curve

为 5 GHz 左右, 图 4(c) 所示的相图中数据点分散分布, 在图 4(d) 中自相关曲线呈图钉型分布, 最大李雅普诺夫指数为 0.049935, 说明此时激光器输出混沌状态。

### 2.2 直腔多反馈结构

2009 年, Vasile Z. Tronciu 等人提出了带有空气隙的多反馈结构光子集成混沌半导体激光器芯片, 如图 5 所示, 包括一个 DFB 激光器区、两个相区、一个空气隙, 以及两段无源波导部分。其中, 空气隙的两端面以及芯片右端面镀的高反膜构成三腔反馈, 两个相区可以控制反馈光相位<sup>[29-30]</sup>。与单腔反馈相比, 多腔光反馈的结构可以从原理上消除或者抑制混沌激光的时延特征, 多腔反馈在较低的反馈强度下即可生成高维混沌激光。

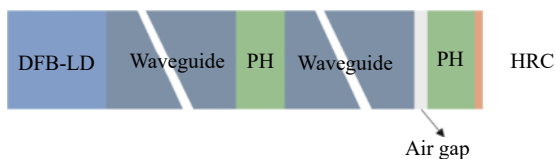


图 5 空气隙结构集成混沌半导体激光器

Fig.5 Photonic integrated chaotic semiconductor laser with air gap structure

### 2.3 环形腔反馈结构

2011 年, Satoshi Sunada 等人研制出了带有无源环形光波导的单片集成混沌半导体激光器, 如图 6 所示, 该芯片由一个 DFB 激光器、两个 SOA、一个 PD 和一段环形光波导组成。其中, DFB 激光器出射的光经过顺时针或者逆时针的方向进行传输; 无源环形光波导作为延时光反馈环, 可以在一定的芯片体积下获

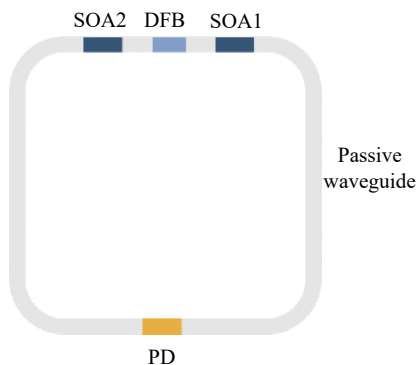


图 6 环形腔单片集成混沌半导体激光器

Fig.6 Integrated chaotic semiconductor laser on chip with ring cavity

得更大的外腔长; 光信号的强度可以通过 PD 进行探测; SOA 可以同时控制反馈信号的光强和相位, 通过调节两个 SOA 的注入电流, 可产生混沌激光, 混沌激光带宽可达 10 GHz, 平坦度为 $\pm 6.5$  dBm。该结构的优点在于不用精确控制切割反射面的反射率和不用要求高反射率就可以实现强光反馈, 产生频谱平坦的宽带混沌<sup>[31]</sup>。

### 2.4 二维外腔反馈结构

二维外腔结构可以将光场限制在一个比较小的区域, 缩小体积, 降低损耗。同时, 二维外腔反馈结构可以消除固定外腔反馈带来的时延特征。2014 年, Satoshi Sunada 等人研制出二维外腔结构的混沌半导体激光器芯片。如图 7(a) 所示, 该芯片包括一个激光器部分和一个二维的外腔部分, 二维外腔结构如图 7(b) 所示, 垂直方向包括一个平面镜, 一个曲面镜, 水平方向包括两个平行放置的平面镜。该激光器的整体尺寸小于  $230 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$ 。其中, 二维外腔部分能够使激光产生多次反馈以产生更大的光延迟, 通过注入外腔的电流控制反馈强度产生混沌激光<sup>[32]</sup>。

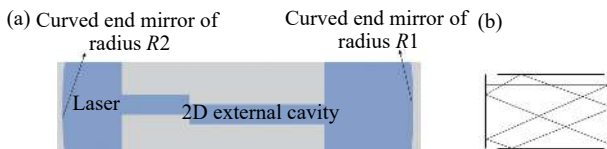


图 7 (a) 二维外腔集成混沌半导体激光器结构示意图; (b) 二维外腔结构示意图

Fig.7 (a) Integrated chaotic semiconductor laser with two-dimensional external cavity; (b) Structure diagram of two-dimensional external cavity

研究者们还在一些微腔结构中观察到了混沌激光, 这些器件也有望应用于光子集成混沌半导体激光器的设计当中, 以实现混沌激光器的微型化和集成化。2016 年, 黄永箴等人提出了将光注入圆盘腔微型激光器 (半径为  $6 \mu\text{m}$ ) 产生非线性动力学状态, 基于这种结构产生了注入锁定、周期振荡、混沌等动力学状态<sup>[33]</sup>。2020 年, 王安帮等人提出了采用弧边六角微腔激光器外加镜面反馈产生频谱平坦的宽带混沌激光, 并建立了数值仿真模型, 这种微腔激光器具有更宽的小信号调制范围, 对弛豫振荡的响应小, 更容易产生频谱平坦的宽带混沌激光<sup>[34]</sup>。

### 2.5 长腔光反馈结构

外腔长度是影响混沌激光特性的关键参数,长腔和短腔通常以反馈时延  $\tau_f$  和弛豫振荡周期  $\tau_r$  的大小进行划分,  $\tau_f > \tau_r$ , 为长腔,  $\tau_f < \tau_r$ , 为短腔。长腔反馈中外腔模式间隔小,在激光器增益谱内能够形成更多的外腔模式,使得动力学特性更为复杂,因此长腔结构相较于短腔结构更容易进入混沌状态,而短腔结构更容易实现频率锁定。随着集成度的提高,要求光芯片的体积尽可能小。这就要求在较小的面积内实现更长的外腔延时<sup>[35-36]</sup>。在光子集成混沌半导体激光器中,可以通过不同的波导结构增加外腔路径,这样不仅可以实现长时延反馈,还可以从原理上避免或抑制固定外腔谐振造成的时延特征。环形腔、二维外腔、光子晶体、螺旋光波导等结构都致力于在有限体积内增加外腔延时。长腔结构还有利于混沌激光在光子储备池方面的应用,例如,在一个延时光子储备池计算中,较长的延长时间会增加延迟环中的神经元数目,因此,系统的计算能力随着延时的长度线性增加<sup>[37]</sup>。

2017 年, Guy Verschaffelt 等人基于 JePPIX 平台提出了一种片上集成混沌半导体激光器。该激光器是基于 JePPIX 平台标准工艺的功能模块进行设计的。该结构主要包括一个可调谐分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflection, DBR), 一个 SOA1 连接的两个螺旋光波导, 和一个前面带有一个放大器 SOA2 和移相器的 DBR 反射镜, 结构如图 8 所示。DBR 激光器包括前光栅区、增益区和后光栅区,增益区和光栅区都加有电极,调节光栅区的偏置电流可以改变光栅区的布拉格反射波长。螺旋光波导的引入用于实现长腔,整个反馈腔长可以达到 10 cm。两个螺旋光波导之间的 SOA1 用于补偿螺旋光波导中的光损耗。该结构比较复杂,可变参量较多,例如,增加前光栅和后光栅之间的失谐量, DBR 激光器的输出阈值就会增加。调节两个 SOA 不仅对输出信号的功率



图 8 长外腔结构集成混沌半导体激光器

Fig.8 Integrated chaotic semiconductor laser with long external cavity

有影响,也对输出信号的动力学特性有影响,这主要是因为调节 SOA 改变了反馈强度。通过调节 SOA1,该激光器可以实现从脉冲状态进入混沌状态<sup>[38]</sup>。

### 2.6 互注入结构

除了光反馈结构外,一些基于光注入的光子集成混沌半导体激光器也被提出。注入结构中一个激光器的输出会对另外一个激光器内腔造成扰动,在一定的频率失谐情况下,不同光频成分之间会发生丰富的非线性效应,而且光注入结构容易产生高频信号。互注入结构的器件在混沌同步等领域具有重要的应用价值。

2009 年, M.P. Vaughan 等人提出一种基于 DBR 激光器的互耦合结构,如图 9(a) 所示,该结构包括两个 DBR 激光器,两激光器输出经过一个多模干涉仪进入 SOA,输出非线性动力学状态。在该结构中,低耦合高增益时可观察到混沌状态,在低增益的时候,调节两激光器之间的失谐量,也会出现多模激光,研究表明该激光器状态的改变不仅是由 SOA 中的非线性效应造成的,还有互耦合作用<sup>[39-40]</sup>。

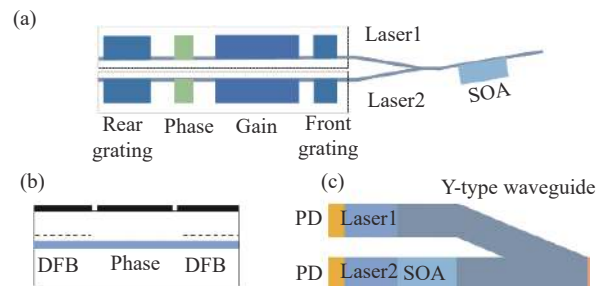


图 9 互注入光子集成混沌半导体激光器。(a) 双 DBR-LD 通过 Y 型波导互耦合; (b) 双 DFB-LD 互注入; (c) 双 DFB-LD 通过 Y 型波导互注入

Fig.9 Mutual injection photonic integrated chaotic semiconductor laser.

(a) Two DBR-LD coupled by the Y-type waveguide; (b) Two DFB-LD mutual injected; (c) Two DFB-LD mutual injected by the Y-type waveguide

2014 年,孙长征等人研制了一种超短延迟时间的互耦合单片集成混沌半导体激光器芯片,如图 9(b) 所示,该芯片由两个互耦合的 DFB 激光器和中间的相区构成。两个 DFB 激光器的光栅刻蚀和激光器内腔设计均相同,DFB 激光器区为 InGaAlAs 多量子阱材料,激射波长为 1 550 nm<sup>[41-43]</sup>。调节相区可以实现耦

合强度和时延的微调,调节两个 DFB 激光器的偏置电流可以实现两个激光器之间频率失谐的调节。在互注入结构中可以通过调节两个激光器的失谐量对输出特性进行调节。该结构的芯片也可以产生丰富的动力学状态,包括互注入锁定、单倍周期、频率锁定、倍周期振荡和混沌。其中产生混沌的原因主要是四波混频和两个激光器模式之间的拍频效应。

2017 年,日本埼玉大学 Shoma Ohara 等人提出一种用 Y 型波导连接的互耦合光子集成激光器芯片。如图 9(c) 所示,该光子集成芯片包括两个互注入的 DFB 激光器,两个 PD,一个 SOA,一个无源 Y 型光波导,和一个外腔镜。每一个 DFB 激光器输出的光经过外腔镜反馈注入到另外一个激光器中,在此结构中外腔镜提供的光反馈和互注入耦合以实现共延时反馈耦合,该结构可以在两个激光器互注入耦合的单个芯片上实现混沌同步<sup>[44]</sup>。

互注入结构中存在两个模式之间的拍频效应,可以产生宽带混沌激光,但是固定的外腔结构无法避免混沌激光存在时延特征的问题。针对混沌激光带宽受限、暗含周期性的问题,笔者所在课题组提出了一种基于随机光栅与互注入的单片集成混沌半导体激光器。该混沌激光器为五段式结构,结构如图 10 所示,基于随机光栅的互注入单片集成混沌半导体激光器包括两个 DFB 激光器 (DFB-LD)、两个 SOA 和一段无源光波导,光栅沿着无源光波导随机分布。两个分布式反馈激光器互注入实现混沌信号整形和带宽增强,无源波导中的随机光栅提供随机光反馈以消除混沌信号时延特征。基于半导体激光器速率方程,建立了互注入与随机反馈联合扰动产生混沌激光的仿真模型,速率方程如下:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2} \left[ \frac{g(N_1 - N_0)}{1 + \varepsilon|E_1|^2} - \frac{1}{\tau_p} \right] E_1 + \frac{1}{\tau_{in1}} \sum_{n=1}^N k_{fn1} E_1(t - \tau_{fn1}) \cdot \exp(-i\omega_1 \tau_{fn1}) + \frac{k_{21}}{\tau_{in2}} E_2(t - \tau_{j,21}) \exp(-i\omega_2 \tau_{j,21}) \exp(-i\Delta\omega t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_1}{\tau_s} - \frac{g(N_1 - N_0)}{1 + \varepsilon|E_1|^2} |E_1|^2 \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2} \left[ \frac{g(N_2 - N_0)}{1 + \varepsilon|E_2|^2} - \frac{1}{\tau_p} \right] E_2 + \frac{1}{\tau_{in2}} \sum_{n=1}^N k_{fn2} E_2(t - \tau_{fn2}) \exp(-i\omega_2 \tau_{fn2}) + \frac{k_{12}}{\tau_{in1}} E_1(t - \tau_{j,12}) \exp(-i\omega_1 \tau_{j,12}) \exp(i\Delta\omega t) \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_2}{\tau_s} - \frac{g(N_2 - N_0)}{1 + \varepsilon|E_2|^2} |E_2|^2 \quad (4)$$

式中:下标 1 和 2 分别代表 DFB-LD1 和 DFB-LD2;  $E$  为激光器的电场;  $N$  为激光器的载流子密度。

图 11 为该仿真模型输出的混沌激光特性,时序呈现出规律特性,时延特征值为 0.06、带宽达 13.12 GHz,相图呈现复杂,遍历和有界的混沌吸引子特性。在该结构中,反馈系数、互注入系数和失谐量等参数对混沌激光时延特性和带宽等均存在一定的影响。结果表明,在一定的参数空间内,可以实现宽

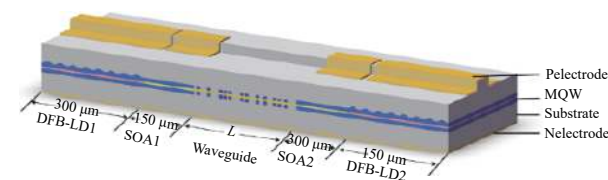
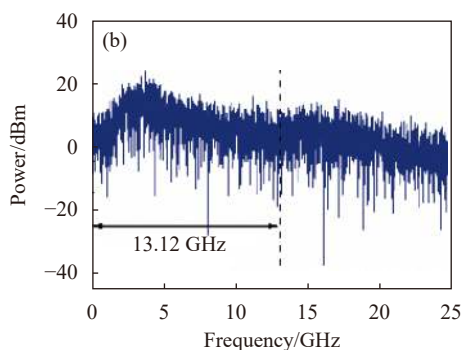
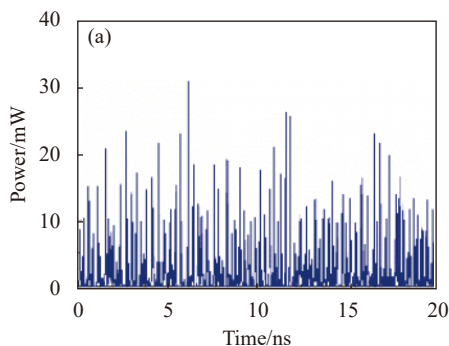


图 10 基于随机光栅的互注入单片集成混沌半导体激光器结构图  
Fig.10 Structure of mutual injection monolithically integrated chaotic semiconductor laser based on random grating





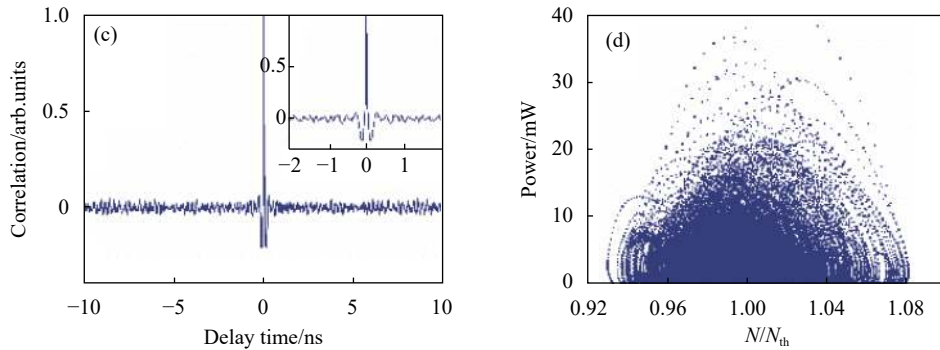


图 11 宽带无时延混沌激光特性。(a) 时序图; (b) 频谱图; (c) 自相关; (d) 相图

Fig.11 Broadband chaotic laser without TDS. (a) Time series; (b) Power spectra; (c) Autocorrelation curve; (d) Phase portraits

带混沌激光时延特征的抑制<sup>[45]</sup>。

### 2.7 光子集成混沌半导体激光器特性分析对比

表 1 对目前光子集成混沌半导体激光器的特性进行了分析,将不同结构的光子集成混沌激光器从扰动方式、外腔结构、带宽特性、器件长度和性

能特征等方面进行了对比。从表 1 的分析中可以看出,这些单片集成混沌激光器结构简单,带宽在 GHz 以上,最小的器件长度为 780 μm,集成度高,性能稳定,并且可以实现带宽调节,混沌同步等功能,有利于混沌激光在通信和随机数产生等领域的应用。

表 1 典型光子集成混沌半导体激光器

Method	External cavity	Year	Institute	Band width	Length	Performance
Optical feedback	SOA+phase+straight waveguide	2008	University of Athens (Greece)	20.0 GHz	1.065 cm	Typical single optical feedback
	Phase+SOA	2013	Southwest University; Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science (China)	26.5 GHz	780 μm	
	Multi-feedback with air gap	2010	Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics (Germany)	7.0 GHz	10.705 mm	Multi-dimension chaos
	Two SOAs+straight waveguide	2011	NTT Communication Science Laboratories (Japan)		10.55 mm	The feedback intensity can be coarse and fine tuned
	Ring waveguide	2011	NTT Communication Science Laboratories (Japan)	10.0 GHz	3.5 mm×3.5 mm	Strong optical feedback
	Two-dimension external cavity	2014	Kanazawa University (Japan)	5.0 GHz	230 μm×1 mm	A long time delay can be achieved with the small area
Mutual injection	Short cavity	2017	Taiyuan University of Technology (China)	5.9 GHz	14-pin butterfly packaging	Hybrid integrated, easy to implement
	Straight waveguide	2014	Tsinghua University (China)		1 200 μm	
	Y-type waveguide	2017	Saitama University (Japan)		11 mm	Can be used for chaotic synchronization
	Random grating	2020	Taiyuan University of Technology (China)	13.1 GHz	5.9 mm~2.09 cm	Broad bandwidth and time delay signature suppressed

### 3 光子集成混沌半导体激光器的应用

受限于目前光子集成的工艺,光子集成混沌半导体激光器在带宽和功率等方面还无法达到理想的水平,且调控范围有限。因此,虽然针对混沌激光的研究已经非常成熟,且应用领域广泛,但是集成混沌半

导体激光器的应用依然有限,目前已报道的光子集成混沌激光器的应用主要包括其在光时域反射技术、混沌保密通信和高速随机数产生方面的应用。

#### 3.1 混沌光时域反射技术

光时域反射技术是检测光纤故障断点的重要工具。以混沌激光为光源的光时域反射 (Optical Time-

domain Reflectometer, OTDR) 技术可以实现长距离高分辨率测量,而集成的混沌激光源体积小,成本低,输出信号稳定,易于批量化生产,可促进混沌 OTDR 的产业化和实用化。2017 年,赵玲娟等人以 AFL 芯片作为混沌 OTDR 系统的光源,在 47 km 断点处实现了 2.6 mm 的空间分辨率<sup>[46]</sup>。2019 年,笔者所在课题组将所研制的混合集成混沌半导体激光器应用于 OTDR 技术中,实现了长距离与高分辨率的断点测量,测量距离可达 76.54 km,空间分辨率为 1 cm<sup>[47]</sup>。

### 3.2 高速随机数产生

2010 年, Apostolos Argyris 等人使用四段式直腔单反馈光子集成混沌半导体激光器产生了 140 Gb/s 的真随机数<sup>[48]</sup>。如图 12 所示,潘碧玮等人通过使用 AFL 芯片在外加光纤环进行自注入扰动下,产生频谱覆盖范围超过 50 GHz,频谱平坦度为±3.6 dB 的宽带混沌信号,通过使用 4 位最低有效位保留 8 位数字化混沌波形,实现了 640 Gbit/s 的快速物理随机数的产生<sup>[49]</sup>。2014 年, Rie Takahashi 等人研究了双 SOA 结构单片集成混沌半导体激光器外腔长小于 10 mm 时(1、2、3、4、5、10 mm),该芯片应用于随机数产生的情况,采用了两种随机数提取方式:单比特数据提取方式和多比特数据提取方式。结果表明,当腔长大于 3 mm 时可以产生适用于随机数产生的宽带、平坦的混沌激光源。在反馈腔长为 5 mm 时利用多比特生成方法将随机数的产生速率提升到了 400 Gbit/s<sup>[50]</sup>。2017 年, Atsushi Uchida 等人研制了快速物理随机数发生器,主要包括封装后的双 SOA 集成混沌半导体激光器和 FPGA 电路板。在外腔长为 10.3 mm 时,用于随机数发生器码率可达 21.1 Gbit/s。该随机数发生器可以直接应用到密钥生成的系统中<sup>[51]</sup>。

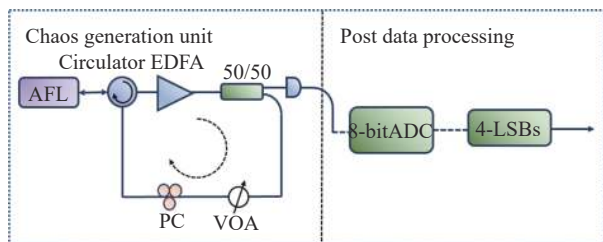


图 12 AFL 芯片应用于高速随机数产生

Fig.12 Application of AFL chip in fast random number generation

### 3.3 保密光通信

混沌同步是混沌保密光通信的基础。收发器件

实现同步,不仅需要系统参数的一致性,还需要确保收发器件内部参数的一致。而单片集成工艺可以最大限度地保证收发激光器芯片内部参数的一致性,而且可以增加器件的稳定性,这些都可以确保系统的同步性。

在通信和数据加密的应用当中,单片集成混沌半导体激光器更具有优势,主要包括以下几点:在单片集成结构中,作为硬件密钥之一的腔长信息可以隐藏,增加系统的保密度;第二,发射和接收器件的外腔长度一致可以通过单片集成工艺实现;第三,通过引入闭环接收装置,保密通信系统中的混沌载波对消度更高。

2009 年, Dimitris Syvridis 等人将四段式直腔单反馈结构光子集成混沌半导体激光器应用于保密通信系统中,研究了混沌载波与相应的接收端同步并在局部再生载波的能力<sup>[52]</sup>。2010 年, Apostolos Argyris 等人将此单片集成混沌激光器芯片进行了模块化封装,并将此集成混沌半导体激光器作为实时数据交换系统中的加密层,用于混沌保密通信系统中,首次在 100 km 传输路径的混沌保密系统中,实现了稳定、高质量的闭环同步,小幅度调制的 Gbit/s 数据序列在这些混沌载波中是完全加密的<sup>[53]</sup>。Apostolos Argyris 等人使用外部基带和副载波调制两种编码方法分析了基于光子集成混沌芯片的混沌保密通信系统的加密效率<sup>[54]</sup>。适度的信息振幅与围绕弛豫振荡频率的副载波调制的组合,以及利用外腔相位的伪随机变化,使得基于光子集成混沌半导体激光器的全光反馈技术成为当代光纤传输链路中保护安全性的一个强有力的候选技术。

未来,光子集成混沌半导体激光器在混沌激光雷达、光通信模块、分布式光纤传感等领域的应用价值会继续被开发,同时,研究者们也有望针对不同应用研发功能更加具体化的集成混沌半导体激光器进行研究。

## 4 讨论

在光子集成混沌半导体激光器的研制中,芯片的结构设计与芯片集成方案是关键。单片集成芯片中,有源器件的量子阱有源区和上、下限制层的材料选择,以及掺杂浓度、厚度的确定,光栅结构的设计,无

源区的波导芯层材料选择,都直接关系着单片集成器件的后续工艺实施以及器件的性能,如输出光功率,带宽等。另外,无源区波导长度的设计决定着反馈光的强度以及延迟时间等。在单片集成器件中,有源器件和有源器件之间的集成,有源器件与无源器件之间的集成是半导体工艺的关键,常采用的方案有选择区域生长,对接耦合生长和量子阱混杂等生长方式。根据结构的不同,设计器件的集成方案,确保其在半导体技术当中是高效可行的。在保证元件功能实现的同时还要考虑该结构在混沌激光产生系统中引入的影响,例如,当引入环形波导时,需要考虑环形波导的曲率造成的弯曲损耗,当引入 PD 等有源器件时,光路中的吸收损耗也需要考虑。

在混合集成中,光学器件之间的高效耦合,反馈腔长和反射率的确定是集成混沌激光器的关键。模块化集成混沌半导体激光器各模块之间的耦合效率将直接影响到反馈回激光器的光强,从而影响混沌激光的产生,因此必须保证各模块之间的耦合效率。

由于具有固定的外腔反馈延时,混沌激光具有一定的时延特征,通过自相关分析可以提取出该时延特征值,并通过公式(5)计算出对应的外腔长。

$$L = \frac{\tau c}{2n} \quad (5)$$

式中: $L$ 为外腔长度; $\tau$ 为外腔反馈延时; $n$ 为外腔材料折射率; $c$ 为光速。时延特征的存在表明混沌激光存在一定的弱周期性,这将影响混沌激光的应用,例如降低以混沌激光作为物理熵源产生的随机数随机特性;导致混沌保密光通信系统存在安全漏洞;会对混沌雷达和光时域反射仪引入虚警和误判等。目前,消除混沌激光时延特征的方法主要有:引入分布式反馈(例如 FBG 光栅<sup>[55]</sup>、布里渊散射<sup>[56]</sup>和瑞利散射),在外腔中引入调制信号等。在光子集成混沌半导体激光器中,主要是通过改变外腔结构增强混沌激光的复杂度,例如引入二维外腔反馈结构,由于二维外腔中光路复杂,避免了固定的延时;还有在外腔结构中引入空气隙结构,通过空气隙和波导之间的折射率不匹配形成多路光反馈结构,同样可以避免单反馈结构引入的时延特征。针对混沌激光的时延特征,笔者所在课题组提出了利用随机光栅反馈的集成混沌半导体激光器。该结构中的随机光栅与激光器构成多个法布

里-珀罗谐振腔,引入多个外腔模式。随机光栅提供分布式光反馈,避免了固定的外腔反馈延时,在这种分布式反馈的结构中,混沌激光器的外腔长无法从时延特征的位置中提取出来,从原理上解决了混沌激光存在时延特征的问题。

在单片集成混沌半导体激光器中,间歇混沌是另一种特殊的动力学特性。与周期性和混沌动力学状态不同,间歇混沌是一种周期态和混沌随着时间交替出现的动力学状态,存在于混沌和周期态之间的过渡参数区域内<sup>[57-60]</sup>。夏光琼等人研究了 AFL 芯片中的间歇混沌现象,在不同的加载电流下, AFL 芯片中存在两种间歇混沌现象,一种是稳态和混沌态的随机交替产生,另一种是两倍周期状态和混沌态的随机交替产生<sup>[61]</sup>。间歇混沌与周期态和混沌态有着本质的区别,它为基于时间随机性的物理随机数的产生提供了一种新的方法。2016年, Andreas Karsaklian Dal Bosco 等人研究了双 SOA 结构(外腔长为 3.3 mm)中的间歇混沌现象。在固定的激光器的注入电流和反馈强度下,该芯片可以进入间歇混沌状态,即稳态和混沌态随着时间交替出现<sup>[62]</sup>。2017年, Andreas Karsaklian Dal Bosco 等人将该双 SOA 结构(腔长为 3.3 mm)的间歇混沌输出应用于随机数产生,利用时序的间歇性现象产生随机数,随机数的产生速率为 50.0 Mbit/s。由于时间尺度的限制,用这种方法产生随机数的速率受限,远远达不到基于混沌激光的随机数速率 Gbit/s 或者 Tbits/s。尽管基于间歇混沌产生随机数的速率有限,但是这种方法还是有一些优势,例如,时间间隔信息对噪声信号的幅值并不是很敏感,其分辨率取决于间歇波形时间间隔测量的准确性,因此可以减小外部波动或者噪声、电噪声对随机数生成的影响<sup>[63]</sup>。

## 5 总 结

目前,在光子集成混沌半导体激光器领域,研究者们结合混沌激光器外腔结构的设计与半导体工艺,提出了基于光反馈结构的直腔、环形腔、二维腔、空气隙腔等结构的单片集成混沌半导体激光器,以及基于互注入结构的 Y 型波导、直波导、波导光栅等互耦合结构单片集成混沌半导体激光器。其输出带宽可达到 GHz,器件长度可缩小至微米量级。回顾光子集成混沌半导体激光器近年来的发展历程,其研究已经

从简单的混沌激光出射转向混沌激光特性的优化和更多功能的实现, 结构也从基本的镜面光反馈发展至多路光反馈、二维光反馈以及互耦合等复杂的结构, 以实现在集成结构中宽带、无时延以及波长可调谐等功能的混沌激光输出。同时, 光子集成混沌激光器在光时域反射、高速随机数产生和混沌保密光通信等领域的应用也被广泛研究。以混合集成混沌激光器为光源的混沌 OTDR 可以在 76.54 km 距离上实现 1 cm 的空间分辨率。以 AFL 芯片为物理熵源结合不同的后处理, 产生速率为 640 Gbit/s 的高速物理随机数。基于光子集成混沌半导体激光器的混沌保密光通信系统实现了 100 km 的传输。其中, 互注入型的光子集成混沌激光器芯片由于可以产生同步信号, 更有利于在混沌保密通信系统中的应用。

**致 谢** 诚挚感谢以下合作者对文中相关工作的贡献: 王云才教授、王安帮教授、张建忠教授、鲍晓毅教授、赵彤博士、汪钦工程师

#### 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] Franken P A, Hill A E, Peters C W, et al. Generation of optical harmonics [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(4): 118-119.
- [3] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers [J]. *Physics Letters A*, 1975, 53(1): 77-78.
- [4] Xu Y P, Zhang M J, Zhang L, et al. Time-delay signature suppression in a chaotic semiconductor laser by fiber random grating induced distributed feedback [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4107-4110.
- [5] 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.
- [6] Jiang N, Wang C, Xue C P, et al. Generation of flat wideband chaos with suppressed time delay signature by using optical time lens [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14359-14367.
- [7] Zhao Q C, Yin H X. Performance analysis of orthogonal optical chaotic division multiplexing utilizing semiconductor lasers [J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 47: 208-213.
- [8] Oliver N, Soriano M C, Sukow D W, et al. Fast random bit generation using a chaotic laser: approaching the information theoretic limit [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(11): 910-918.
- [9] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [10] 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.
- [11] Urban P J, Getaneh A, von der Weid J P, et al. Detection of fiber faults in passive optical networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(11): 1111-1121.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Toomey J P, Argyris A, McMahon C, et al. Time-scale independent permutation entropy of a photonic integrated device [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1): 88-95.
- [18] 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.
- [19] Yu L, Lu D, Pan B, 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.
- [20] Bauer S, Brox O, Kreissl J, et al. Nonlinear dynamics of semiconductor lasers with active optical feedback [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 016206.
- [21] 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.

- [22] Yin X M, Zhong Z Q, Zhao L J, et al. Wide bandwidth chaotic signal generation in a monolithically integrated semiconductor laser via optical injection [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 551-557.
- [23] Zhu W Q, Wu Z M, Zhong Z Q, et al. Dynamics of a monolithically integrated semiconductor laser under optical injection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2119-2122.
- [24] Qi H F, Chen G C, Lu D, et al. A monolithically integrated laser-photodetector chip for on-chip photonic and microwave signal generation [J]. *Photonics*, 2019, 6(102).
- [25] 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.
- [26] Dou X Y, Yin H X, Tang C R, et al. Structure design and performance simulation on monolithic integrated chaotic-optical transmitter with photonic crystal waveguide in external cavity [J]. *Optik*, 2014, 125(15): 3961-3965.
- [27] Zhang M J, Xu Y H, Zhao T, et al. A hybrid integrated short-external-cavity chaotic semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1911-1914.
- [28] Zhang M J, Niu Y N, Zhao T, et al. Chaos generation by a hybrid integrated chaotic semiconductor laser [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 27(5): 126-134.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Ma X W, Huang Y Z, Long H, et al. Experimental and theoretical analysis of dynamical regimes for optically injected microdisk lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(22): 5263-5269.
- [34] Wang Y X, Jia Z W, Gao Z S, et al. Generation of laser chaos with wide-band flat power spectrum in a circular-side hexagonal resonator microlaser with optical feedback [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18507-18515.
- [35] Tager A A, Elenkrig B B. Stability regimes and high-frequency modulation of laser diodes with short external cavity [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(12): 2886-2890.
- [36] Tager A A, Petermann K. High-frequency oscillations and self-mode locking in short external-cavity laser diodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(7): 1553-1561.
- [37] Guo X X, Xiang S Y, Zhang Y H, et al. High speed neuromorphic reservoir computing based on a semiconductor nanolaser with optical feedback under electrical modulation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 101109.
- [38] Verschaffelt G, Khoder M, Sande G V D. Random number generator based on an integrated laser with on-chip optical feedback [J]. *Chaos*, 2017, 27(11): 114310.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Liu D, Sun C Z, Xiong B, et al. Suppression of chaos in integrated twin DFB lasers for millimeter-wave generation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2444-2451.
- [42] Liu D, Sun C Z, Xiong B, et al. Locked and unlocked behavior of integrated mutually coupled lasers with ultra-short delay [J]. *IEEE International Semiconductor Laser Conference*, 2014: 117-118.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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): 1-8.
- [46] 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.
- [47] Li M W, Zhang X C, Zhang J Z, et al. Long-range and high-precision fault measurement based on integrated short-external-cavity chaotic semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics*

- Technology Letters*, 2019, 31(16): 1389-1392.
- [48] Argyris A, Deligiannidis S, Pikasis E, et al. Implementation of 140 Gb/s true random bit generator based on a chaotic photonic integrated circuit [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18763-18768.
- [49] 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.
- [50] Takahashi R, Akizawa Y, Uchida A, et al. Fast physical random bit generation with photonic integrated circuits with different external cavity lengths for chaos generation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11727.
- [51] Ugajin K, Terashima Y, Iwakawa K, et al. Real-time fast physical random number generator with a photonic integrated circuit [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6511-6523.
- [52] Syvridis D, Argyris A, Bogris A, et al. Integrated devices for optical chaos generation and communication applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(11): 1421-1428.
- [53] Argyris A, Grivas E, Hamacher M, et al. Chaos-on-a-chip secures data transmission in optical fiber links [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5188-5189.
- [54] Bogris A, Argyris A, Syvridis D. Encryption efficiency analysis of chaotic communication systems based on photonic integrated chaotic circuits [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(10): 1421-1429.
- [55] 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).
- [56] Zhang J Z, Feng C K, Zhang M J, et al. Suppression of time delay signature based on Brillouin backscattering of chaotic laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1502408.
- [57] Gray G R, Huang D, Agrawal G P. Chaotic dynamics of semiconductor lasers with phase-conjugate feedback [J]. *Physical Review A*, 1994, 49(3): 2096-2105.
- [58] Sacher J, Elsässer W, Göbel E O. Intermittence in the coherence collapse of a semiconductor laser with external feedback [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(20): 2224-2227.
- [59] Tang D Y, Pujol J, Weiss C O. Type-III intermittency of a laser [J]. *Physical Review A*, 1991, 44(1): 35-38.
- [60] Tang D Y, Li M Y, Weiss C O. Laser dynamics of type-I intermittency [J]. *Physical Review A*, 1992, 46(1): 676-678.
- [61] Wang H P, Chen X, Zhao L J, et al. Experimental observation of intermittent chaos in a three-section monolithically integrated semiconductor laser [J]. *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, 2016: 4867-4870.
- [62] Bosco A K D, Akizawa Y, Kanno K, et al. Photonic integrated circuits unveil crisis-induced intermittency [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22198-22209.
- [63] Andreas K D B, Sato N, Terashima Y, et al. Random number generation from intermittent optical chaos [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6).