

光子集成混沌激光器的研究进展

王永胜^{1,2}, 王云才^{1,2}, 郭夔强^{1,2}¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 近年来,混沌激光已广泛应用于保密通信、高速随机数生成、混沌激光雷达、混沌光时域反射仪、光纤传感和测距等方面。与离散器件构成的装置不同,集成芯片具有尺寸较小、功耗较低、稳定性较好和适用于大批量生产等优点。结合混沌应用和集成芯片的优势,光子集成的混沌半导体激光器应运而生。将光子集成混沌半导体激光器分为五类,并分别介绍了国内外相关机构在集成结构、集成区域的尺寸、集成构成的特点及集成混沌激光器的应用等方面的研究进展。另外,设计并介绍了一种新型的面向蝶形封装的混沌外腔半导体激光器。

关键词 激光器; 半导体激光器; 混沌; 光子集成

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100005

Research Progress of the Photonic Integrated Chaotic Lasers

Wang Yongsheng^{1,2}, Wang Yuncui^{1,2}, Guo Yanqiang^{1,2}¹ College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;² Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The chaos laser has received in-depth investigation in recent years owing to its important applications, such as secure communications, fast physical random bit generation, chaotic laser radar, chaotic time domain reflectometer, optical fiber sensing and ranging. The integrated chips have advantages over those setups composed of discrete components for some unique virtues such as smaller size, lower cost, better stability and reproducibility via mass production. Combining with the advantages of the chaotic applications and integrated chips, the integration of chaotic semiconductor laser arises at the historic moment. The integration of chaotic semiconductor laser is divided into five categories to introduce the domestic and oversea research progress of the relevant institutions in the respect of integrated structure, size of the integrated area, features of integration and applications of integrated chaotic laser. Finally, we design a novel butterfly packaging integrated chaotic semiconductor laser with an external-cavity.

Key words lasers; semiconductor lasers; chaos; photonic integration

OCIS codes 140.5960; 140.1540; 130.3120

1 引言

混沌激光具有宽频谱类噪声的特性,其物理熵源具有宽带、不可预测、类随机等特征。近年来,基于混沌激光的一些应用技术相继提出并受到越来越多的关注^[1-12]。目前已广泛应用到保密通信^[3-5]、高速随机数生成^[6-9]、混沌雷达^[10]、激光雷达^[1-2]、混沌光时域反射仪^[11-12]、测距和光纤传感等方面,同时这些应用正逐步走向实用化和市场化。与离散器件组成的装置相比,集成芯片具有其独特的优点,如尺寸较小、成本较低、稳定

收稿日期: 2017-05-08; **收到修改稿日期:** 2017-05-31

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFA50870)、国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(61527819)

作者简介: 王永胜(1990—),男,硕士研究生,主要从事混沌激光产生方面的研究。E-mail: wangystyut@163.com

导师简介: 王云才(1965—),男,博士,教授,主要从事混沌激光的产生及其应用方面的研究。

E-mail: wangyc@tyut.edu.cn(通信联系人)

性较好和适用于大批量生产等。为了结合混沌应用和集成电路的优势,光子集成的混沌半导体激光器应运而生,它是混沌应用实用化和市场化的关键。国外的光子集成混沌半导体激光器的研制主要集中在美国、希腊、西班牙、意大利、德国、英国、法国、爱尔兰等,其研究机构和光子器件公司联合实施的光子集成组件应用于安全的混沌编码光通信系统(PICASSO)计划。国内则主要集中在中国科学院半导体研究所、西南大学、清华大学和太原理工大学等。希腊雅典大学和德国海因里希-赫兹研究院弗劳恩霍夫电信研究所研制的混沌芯片,由集成耦合分布反馈(DFB)激光源、增益/吸收区(GAS)、相位控制区和反馈腔(无源波导镀膜层)4部分组成混沌激光源,并将其用于混沌保密通信、140 Gb/s 高速真随机数的生成、能量存储的提高等。日本埼玉大学和日本电报电话公司(NTT)通信科学实验室研制的集成混沌芯片包含一个 DFB 激光器、两个独立的半导体光放大器(SOA)、环形无源光波导或线型波导以及一个快速光电探测器(PD)。与原先的带有线型波导和端面反馈的混沌激光芯片相比,这种环形结构实现了更强的光反馈。集成 PD 对光信号实现了有效探测,降低了损耗。通过调节两个 SOA 的注入电流,可获得高维混沌态,产生频谱为 ± 6.5 dB、带宽达到 10 GHz 的混沌输出。然后将两片线型波导的芯片封装在同一模块中,可生成 2.08 Gb/s 的高速物理随机码^[13]。2014 年,Harayama 等^[14]使用不同外腔长的光子集成电路(PICs),从产生的混沌序列中生成高速随机码。结果表明:当腔长为 3,4,5,10 mm 时,都通过了随机测试。西班牙巴利阿里群岛大学 Tronciu 研究小组研制的集成多光反馈半导体激光器芯片,具有 3 个外腔的集成多腔半导体激光器芯片。中国科学院半导体研究所赵玲娟等和西南大学夏光琼等提出并研制的三段式集成混沌芯片,由 DFB 激光器区、相位区和放大区 3 部分组成,生成混沌的频谱带宽达到 26.5 GHz,一倍周期的振荡频率约为 10 GHz, M-B 脉冲的频率超过 40 GHz,这两种频率远高于普通激光器^[15]。外部光注入单片集成半导体激光器(MISL)后,生成混沌信号的有效带宽可以超出单独 MISL 产生的混沌信号最大值的 2.5 倍。实验可实现稳定的高带宽混沌信号,50 GHz 的频率范围内,频谱的带宽为 32 GHz,有效带宽达 28 GHz,平坦度为 6.3 dB^[16]。本文结合目前国内外研究现状,分类介绍光子集成混沌半导体激光器的结构。

2 光子集成结构

2.1 集成增益区-相位区-反馈层

第一类为希腊雅典大学和德国海因里希-赫兹研究院弗劳恩霍夫电信研究所研制的混沌芯片,首次将 DFB 激光源、增益/吸收区(GAS)、相位控制区和反馈腔(无源波导镀膜层)4 部分集成为混沌激光源。2008 年,Argyris 等^[17]的集成混沌激光芯片原理图,如图 1(a)所示。对于利用混沌数据加密的高速光通信系统来说,这种集成结构被视为紧凑并具有潜力的发射器。2008 年,Chlouverakis 等^[18]实验报道了在光子集成芯片中,随着反馈相位的变化,会出现周期轨道产生和消失的循环现象。结果证明,上述混沌吸引子的统计特性是随赫斯特指数 H 而变化的。如在 $H=0.5$ 的临界值上下无序浮动,表明了布朗运动规律。2009 年, Syvridis 等^[19]将这一单片集成混沌激光器进行混沌同步的研究,表明此集成混沌激光器芯片可用于混沌保密通信。通过混沌载波(使合适的接收器与本地再生载体同步)的同步能力,研究了其在高速长距离的混沌光通信中的应用。2010 年,Argyris 等^[20]报道了单片集成混沌激光器芯片封装后的模块化器件,如图 1(b)所示,基于混沌激光器产生的稳定混沌激光,并在光纤链路中验证了混沌保密通信过程中数据传输的安全性。同年,用此集成混沌模块产生了 140 Gb/s 的真随机数^[21]。2010 年,Bogris 等^[22]分析了基于光子集成混沌电路混沌通信系统的加密效率,并对比了外部基带和副载波调制两种编码方法。结果表明,副载波调制在授权方与窃听者之间的误码率上提供一个更高的识别率。2013 年,Liu 等^[23]利用这种结构生成的混沌来提高能量存储;2016 年,Sunada 等^[24]分析了这种球场型光子集成混沌激光器的外腔特性。2011 年,Kapsalis 等^[25]进行了有源-无源集成微环激光器的设计和实验评估,研究了环半径、波导侧面和整体结构对耦合效率、阈值电流与光谱特征的影响。2012 年,Kapsalis 等^[26]通过测量线宽和相对强度噪声,检验了无源波导耦合微环激光器的相位和噪声强度,研究了此结构噪声特性。2015 年,Toomey 等^[27]研究了光反馈半导体激光器从短腔机制到长腔机制的过渡转换。

2.2 集成光放大区-波导-光电探测器

第二类为日本埼玉大学和 NTT 通信科学实验室研制的集成混沌芯片。2011 年,Sunada 等^[28]研制出

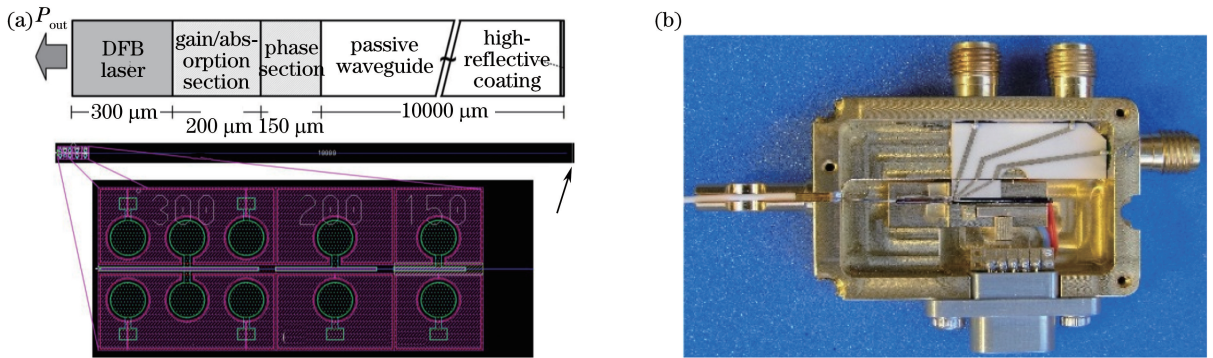


图1 单片集成混沌半导体激光器。(a)芯片^[17]；(b)包装模块^[20]

Fig. 1 Photonic monolithic integrated chaotic semiconductor laser. (a) Chip^[17]; (b) packaging module^[20]

一种单片集成混沌半导体激光芯片,包含一个DFB激光器、两个独立的SOA、环形无源光波导以及一个快速PD。与原先的带有线型波导和端面反馈的混沌激光芯片相比,这种环形结构实现了更强光反馈。集成PD实现了光信号的有效探测,降低损耗。通过调节两个SOA的注入电流,可获得高维的混沌态,产生频谱为 ± 6.5 dB、带宽达到10 GHz的混沌输出。同年,他们研制出的另一种单片集成混沌半导体激光器芯片,利用一条无源光波导作为直腔反馈装置,同时包含一个DFB激光器、两个SOA以及一个快速PD,如图2所示。将两片这种芯片封装在同一模块中,并行输出两路不相关的混沌信号。利用此模块可生成2.08 Gb/s的高速物理随机码^[13]。2012年,Harayama等^[29]理论研究表明产生高维混沌的光反馈激光器能够生成超过Gb/s完全随机的物理随机码。其理论是基于混沌的混合性质,即将激光器中自发发射的微观量子噪声转化成在离散与宏观态之间的随机转换。2014年,Takahashi等^[14]使用不同外腔长的PICs,从产生的混沌序列中生成高速随机码,研究了不同采用率下PICs一位提取法生成随机码的条件。结果表明:当腔长为3,4,5,10 mm时,都通过了随机测试。2016年,Sunada等^[30]报道了连续波运行条件下混沌和非混沌微腔激光器的光谱特征。结果表明:混沌微腔激光器在单模下运行,而非混沌微腔激光器在多模下运行。微腔激光器中多模激光被抑制是由于混沌光线轨道的遍历性,以及传遍二维腔的共振波函数多次空间折叠所致。

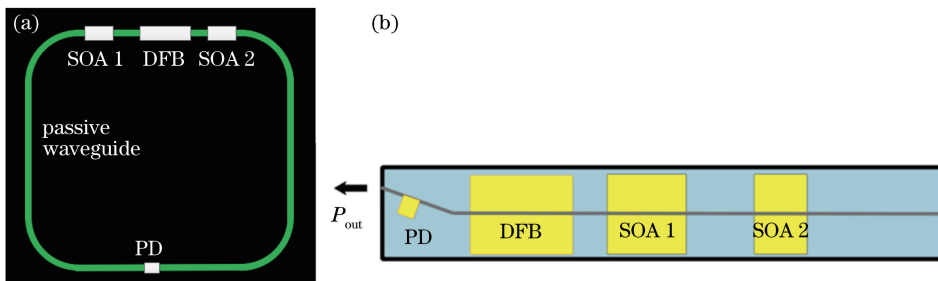


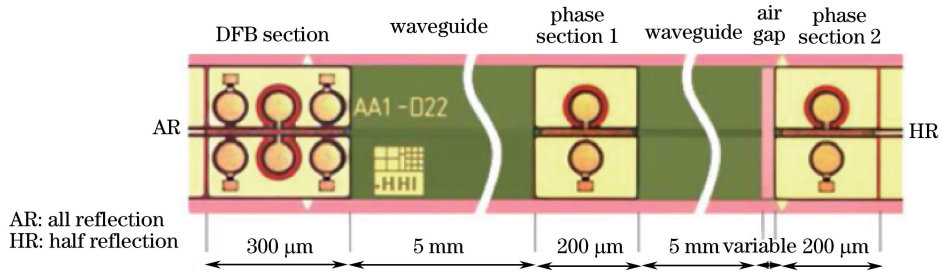
图2 带无源波导单片集成混沌半导体激光器^[13]。(a)环形波导结构；(b)直型波导结构和封装模块

Fig. 2 Photonic monolithic integrated chaotic semiconductor laser with a passive ring waveguide^[13].

(a) Ring-type structure waveguide; (b) straight structure waveguide and packaging module

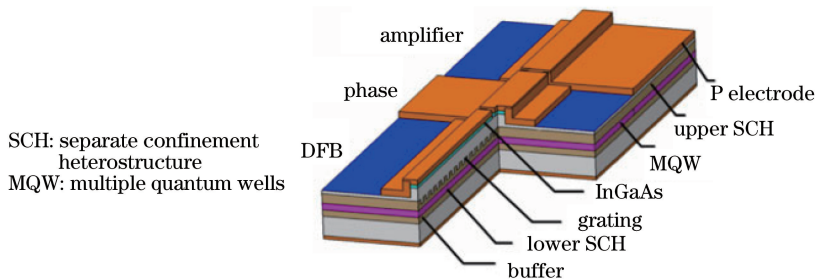
2.3 集成波导-相位-空气隙

第三类为西班牙巴利阿里群岛大学 Tronciu 研究小组研制的集成的多光反馈半导体激光器芯片,这是具有三个外腔的集成多腔半导体激光器芯片。2008年,Tronciu等^[31]理论验证了由半导体激光器和双反馈腔组成的集成器件的动态特性。由于反馈的作用,适当条件下,该系统表现出了适于混沌保密通信的混沌特性。结果表明:与单腔反馈相比,双腔反馈降低了对反馈的要求,仅需更低的反馈强度即可生成高复杂混沌。同时研究了两个非定向耦合(主-从)系统的同步和参数误配对同步质量的影响,提出和讨论了信息编码和解码的特例情形。2009年,Tronciu等^[32]提出了带有空气隙的多反馈光子集成混沌半导体激光器,实验验证了在一定条件下双反馈激光器会表现出适于混沌保密通信的动态特性,同时研究了两个非定向耦合(主-从)系统的同步,并且理论上给出多反馈激光器信息加密和提取的条件,集成芯片结构如图3所示^[33]。

图3 集成的多光反馈半导体激光器芯片^[33]Fig. 3 Photonic monolithic integrated semiconductor laser with dual optical feedback^[33]

2.4 集成相位区-光放大区

第四类为中国科学院半导体研究所赵玲娟等和西南大学夏光琼等研制的三段式集成混沌芯片,其原理结构如图4所示,其由DFB激光器区、相位区和放大区3部分组成。2013年,Wu等^[34]设计并研制出尺寸为780 μm的MISL芯片。产生出具有显著维度和复杂性的混沌,频谱带宽达到26.5 GHz。通过提取不同参数条件下的动态时序、相位图、频谱和统计特性来表征进入混沌的路径。2014年,Yu等^[15]成功研制出单片集成放大反馈激光器(AFL)。理论和实验研究证明了单片集成AFL的动态特性。在相位和放大电流的参数空间中描述了动态状态和振荡频率的映射关系。对于相对较小的放大电流,随着相位电流的增加,从倍周期逐渐演化成混沌。对于相对较大的放大电流,在一定的相位电流下,观察得到一个高频mode-beating(M-B)脉冲。对于总长度为780 μm的芯片,一倍周期的振荡频率大约为10 GHz,M-B脉冲的频率超过40 GHz,这两种频率远高于普通激光器。2015年,该团队研究了外部光注入在一个三段式MISL芯片中宽带混沌信号的产生。通过评估混沌信号的有效带宽,分析光注入对MISL中混沌信号带宽的影响。结果表明:DFB电流和相位电流分别控制在70.00 mA和34.00 mA时,当放大区电流为23.22 mA时,单独MISL产生的混沌信号的最大有效带宽达到了14.36 GHz。外部光注入MISL后,生成混沌信号的有效带宽可以超出上述最大值的2.5倍。同时还研究了注入强度和频率失谐对生成混沌信号有效带宽的影响^[35]。同年,实验验证了外部光注入对一个三段式单片集成AFL非线性的影响。结果表明:对于独立三段式单片集成AFL而言,通过调节增益区(IG)和相位区(IP)的电流,能够观察到不同动力学状态演变,从一倍周期、两倍周期、多倍周期直至混沌态。但是独立三段式单片集成AFL生成混沌的区域较小,混沌态仅发生在IG电流为21.28~26.40 mA和IP电流为31~37 mA的参数空间中。引入外部光注入以后,独立三段式单片集成AFL在注入强度和频率失谐的参数空间中,大范围增益电流下都可获得宽带连续的混沌,有效地增大了混沌工作参数区域^[36]。不久,中国科学院半导体研究所Pan等^[16]提出并证明了一种新型宽带混沌激光器,即使用外光纤环驱使独立运行的三段式单片集成AFL进入混沌状态。实验可实现稳定的高带宽混沌信号,50 GHz的频率范围内,频谱的带宽为32 GHz,有效带宽为28 GHz,平坦度为6.3 dB。

图4 由DFB激光器区、相位区和放大区组成的三段式的光子MISL^[34]Fig. 4 Three section photonic MISL consisting of a DFB laser section, a phase section and an amplification section^[34]

2.5 集成耦合激光器

第五类早在2006年就已报道,清华大学信息科学与技术国家实验室孙长征等将其用来改变信号的非线

性,由两个DFB激光器区和相位区组成。2013年,Liu等^[37]提出并证明了一种新型简单的方法:用集成耦合DFB激光器生成高频毫米波信号。2014年报道了在这种超短延迟集成耦合DFB激光器中丰富的非线性动力学特性(相互稳态锁定,一倍周期振荡、频率锁定,准周期和混沌)。图5为集成激光器原理图,该激光器中无光栅相位部分长 $400\ \mu\text{m}$,相当于 $4.2\ \text{ps}$ 耦合时迟。频率失谐和耦合相位为描述激光器动态特性相应的耦合时滞微分方程中的变量。这对相互注入下频率失谐和弛豫振荡频率之间的关系及其可变动性的分析都非常重要^[38]。

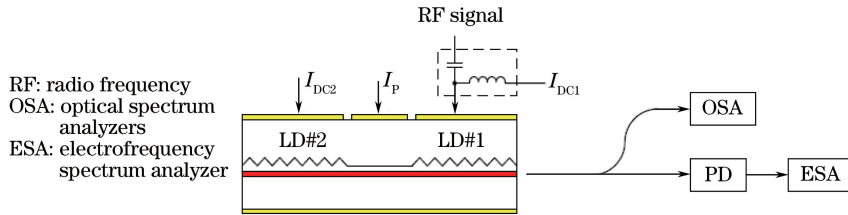


图5 集成耦合半导体激光器^[38]

Fig. 5 Integrated coupled semiconductor laser^[38]

2.6 其他相关研究

另外,国内外其他相关课题组也逐渐开始关注光子集成混沌激光器的研究,例如,2014年,大连理工大学信息与通信工程学院的殷洪玺等也在理论上设计了一种新型的单片集成混沌激光器结构,由DFB激光器、SOA、无源波导和光子晶体波导组成,如图6所示。由于在光子晶体波导中存在慢光效应,当外腔的长度缩短到 $1.125\ \text{mm}$ 时,可获得从稳态、周期状态、直至混沌的一系列动力学状态。引入光子晶体波导不仅缩小了混沌激光器的尺寸,同时还降低了功耗^[39]。另外,太原理工大学和英国Shore研究小组在光子集成混沌激光器方面进行联合开发,并已取得初步的成果。

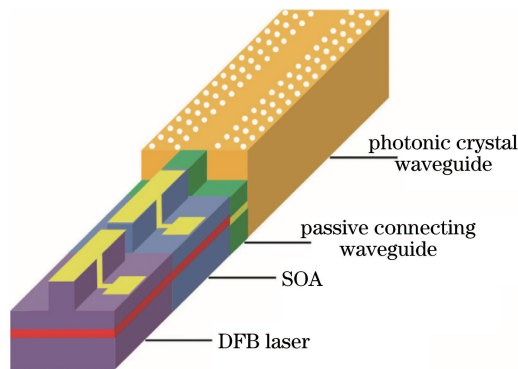


图6 光子晶体波导外腔集成半导体激光器^[39]

Fig. 6 Monolithic integrated chaotic-optical transmitter with photonic crystal waveguide in external cavity^[39]

3 集成结构对比

为了更加直观地对比各集成结构及特点,以下对上述结构做一对比总结,目前集成混沌激光器的产生方式主要分为互注入、单腔反馈、多腔级联三种方式,腔长范围在百微米到几十毫米之间。利用互注入的方式可产生腔长较短的集成混沌源^[38],而通过单腔反馈的方式同样可构建尺寸百微米左右的集成光电混沌源,最高混沌输出带宽可达 $26.5\ \text{GHz}$ ^[34],可实现速率 $2\ \text{Gb/s}$ 真随机数输出^[13],多腔级联集成混沌源可实现多参数控制,为混沌保密通信中硬件上实现大密钥空间及安全性的提高奠定基础^[33]。

4 本团队的研究情况

4.1 结构的设计

图7为光子集成混沌激光器的设计原理图,用半透半反镜取代高反射层,根据预先测试的激光器芯片的

内部参数和仿真结果,构建高带宽混沌产生所需的条件和结构,即外腔腔长和外腔反馈功率比等。将所需的激光器芯片、半透半反镜、准直透镜和耦合透镜蝶形封装在图 7 所示的结构中。封装之后,稳定蝶形封装模块的内部参数,精确控制外部注入电流,有效保证整个模块的稳定性。从 DFB 激光芯片的一部分输出光经过红色虚线所示的路径进行传播,并在半透半反镜处将光反馈回到 DFB 激光芯片,形成光反馈,经耦合透镜将混沌光输出。

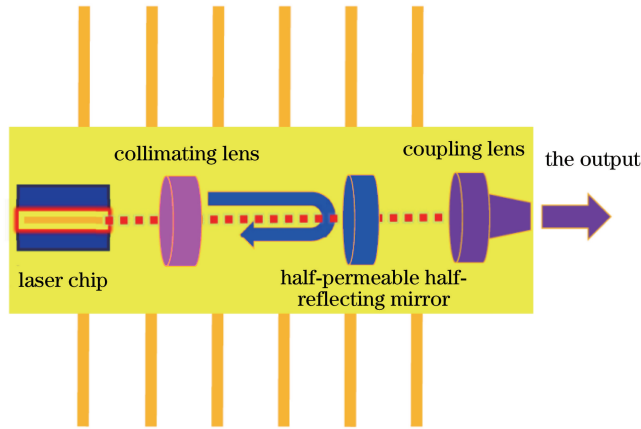


图 7 面向蝶形封装的混沌集成外腔半导体激光器的原理图

Fig. 7 Schematic of a chaotic integrated external-cavity semiconductor laser facing to the butterfly packaging

为了更好地反映结果,图 8 所示为不同载流子寿命下外腔半导体激光器输出的频谱。由图 8 可知,当载流子寿命为 0.1 ns 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 50 GHz、频谱带宽为 55.8 GHz;当载流子寿命为 0.2 ns 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 42 GHz、频谱带宽为 43 GHz。由此可知,该激光器生成频谱带宽比较宽的原因是弛豫振荡频率较大。载流子寿命与激光器本身的材料有关,外部条件中的外腔长度严重影响外腔振荡频率,因此在一定条件下分析了激光器本身的载流子寿命对特征频率的影响,进而分析了其对频谱带宽的影响。

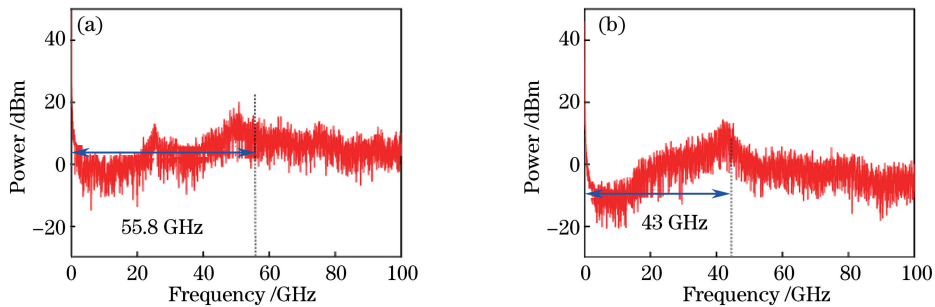


图 8 不同载流子寿命下蝶形封装集成外腔半导体激光器生成高带宽混沌时的功率谱。(a) 0.1 ns;(b) 0.2 ns

Fig. 8 Power spectra with the wide spectral bandwidth of output from the integrated external-cavity semiconductor laser facing to butterfly packaging under different carrier lifetimes. (a) 0.1 ns; (b) 0.2 ns

4.2 结构特点和性能特性

为了减小集成成本和降低集成工艺复杂度,在现有蝶形封装基础上进行改进,设计了一种新型的面向蝶形封装的混沌外腔半导体激光器。由于其不需要集成的放大区和相位区,因而极大简化集成工艺并降低集成成本。反馈光路以空气为主,在同等长度下可以缩短反馈延迟时间。此外,内外参数对混沌影响极大,需要选择合适的参数:1)内部参数,选择载流子寿命较小、线宽增强因子较大且其他参数合适的半导体激光器芯片生成高带宽混沌;2)外部参数,选择腔长较短的半导体激光器芯片生成高带宽混沌。其目的是为了提提高频谱的特征频率(即外腔振荡频率和弛豫振荡频率),从而增加频谱带宽。与其他集成结构的对比,该集成具有结构简单、成本较低、特征频率较大且具有生成超高带宽混沌的潜力等优势。光子集成混沌激光器未来的

发展会越来越集成化和高性能化,逐步实现由单混沌激光器集成到多阵列混沌激光器集成的目标。

5 结束语

介绍了光子集成混沌激光的发展现状和前沿动态,将目前国内外相关研究的光子集成混沌激光器分为五类,分别针对集成结构、集成区域的尺寸、构成特点以及集成混沌的应用等方面的进展进行了说明。同时展示了本团队自行设计研发的一种新型蝶形封装的混沌外腔光子集成半导体激光器,该激光器由半导体激光器、半透半反镜、准直透镜和耦合透镜组成。

参 考 文 献

- [1] Wang Yuncai. Generation and applications of chaotic laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 13-21.
王云才. 混沌激光的产生与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 13-21.
- [2] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [3] 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.
- [4] Soriano M C, García-Ojalvo J, Mirasso C R, *et al.* Complex photonics: dynamics and applications of delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Review of Modern Physics*, 2013, 85(1): 421-470.
- [5] Zhao Qingchun, Wang Yuncai. Research progress in security analysis of chaotic optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(3): 030602.
赵清春, 王云才. 混沌激光通信的保密性能研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(3): 030602.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Li Pu, Wang Yuncai. 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.
- [9] Yan Qiurong, Cao Qingshan, Zhao Baosheng, *et al.* High speed random number generator based on digitizing bandwidth-enhanced chaotic laser signal[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1102004.
鄢秋荣, 曹青山, 赵宝升, 等. 基于数字化带宽增强混沌激光信号的高速随机源[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1102004.
- [10] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [11] Wang A, Wang N, Yang Y, *et al.* Precise fault location in WDM-PON by utilizing wavelength tunable chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(21): 3420-3426.
- [12] Wang Y, Wang B, Wang A. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [13] 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.
- [14] 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): 11727-11740.
- [15] 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.
- [16] Pan B, Lu D, Zhao L. Broadband chaos generation using monolithic dual-mode laser with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(23): 2516-2519.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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): 5188-5198.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Liu C, Di Falco A, Molinari D, *et al.* Enhanced energy storage in chaotic optical resonators[J]. Nature Photonics, 2013, 7(6): 473-478.
- [24] Sunada S, Shinohara S, Fukushima T, *et al.* Signature of wave chaos in spectral characteristics of microcavity lasers [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(20): 203903.
- [25] Kapsalis A, Stamatakis I, Mesaritakis C, *et al.* Design and experimental evaluation of active-passive integrated microring lasers: threshold current and spectral properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(12): 1557-1564.
- [26] Kapsalis A, Stamatakis I, Mesaritakis C, *et al.* Design and experimental evaluation of active-passive integrated microring lasers: noise properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(2): 99-106.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Harayama T, Sunada S, Yoshimura K, *et al.* Theory of fast nondeterministic physical random-bit generation with chaotic lasers[J]. Physical Review E, 2012, 85(4): 046215.
- [30] Sunada S, Shinohara S, Fukushima T, *et al.* Signature of wave chaos in spectral characteristics of microcavity lasers [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(20): 203903.
- [31] 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.
- [32] Tronciu V Z, Mirasso C, Colet P, *et al.* Chaos generation, synchronization and communications using an integrated source with an air gap[C]. European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: CB_P27.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Liu D, Sun C, Xiong B, *et al.* Suppression of chaos in integrated twin DFB lasers for millimeter-wave generation[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 2444-2451.
- [38] Liu D, Sun C, Xiong B, *et al.* Nonlinear dynamics in integrated coupled DFB lasers with ultra-short delay[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5614-5622.
- [39] Dou X, Yin H, Tang C, *et al.* Structure design and performance simulation on monolithic integrated chaotic-optical transmitter with photonic crystal waveguide in external cavity[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(15): 3961-3965.