

一种可产生高带宽混沌的外腔半导体激光器的设计及其动态特性

王永胜^{1,2}, 赵彤^{1,2}, 王安帮^{1,2}, 张明江^{1,2}, 王云才^{1,2}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

²太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西 太原 030024

摘要 设计一种新型的可产生高带宽混沌的面向蝶形封装的外腔半导体激光器,并在理论上研究了反馈率、注入电流比和载流子寿命对其动态特性的影响。数值仿真结果表明,调节反馈率或增加注入电流比时,该结构的输出光经历从稳定状态、准周期状态、混沌状态再到稳定状态的周期演化。增大注入电流比或减小载流子寿命时,外腔激光器的弛豫振荡频率增大。在大弛豫振荡频率和大外腔振荡频率下,能够生成有效带宽高达 70 GHz 的混沌。分析了这种高带宽混沌生成的机理,也为高速随机数的生成提供了新的熵源。此外,在弱光反馈下,尝试利用激光器的弛豫振荡来掩盖反馈的时延特征,并分析了时延对外腔振荡频率的影响。

关键词 激光器; 半导体激光器; 短腔反馈; 高带宽混沌

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.111401

Design and Dynamic Characteristics of an External-Cavity Semiconductor Laser Generating Wide Bandwidth Chaos

Wang Yongsheng^{1,2}, Zhao Tong^{1,2}, Wang Anbang^{1,2}, Zhang Mingjiang^{1,2}, Wang Yuncai^{1,2}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract A novel external-cavity semiconductor laser faced to butterfly packaging which can generate wide bandwidth chaos is designed, and the influences of feedback ratio, injection current ratio and carrier lifetime on dynamic performance of the designed structure are investigated. Numerical simulation results demonstrate that diversely dynamical states including the stable state, as well as the so-called period-one, and chaotic states can be observed when the feedback ratio is adjusted or the injection current ratio is increased. The relaxation oscillation frequency of the external-cavity semiconductor laser rises with the increasing injection current ratio or the decreasing carrier lifetime. So it is much easier to generate chaotic signal with effective bandwidth of 70 GHz when the relaxation oscillation frequency and oscillation frequency of the external-cavity are at high level. The mechanism to generate such a chaos with wide bandwidth is analyzed, which provides a new source of entropy for the generation of random number. In addition, we use the relaxation oscillation of laser to cover time delay characteristics of feedback when the feedback is weak, and analyze the influence of feedback time delay on the dynamics of oscillation frequency of the external-cavity.

Key words lasers; semiconductor lasers; short-cavity feedback; wide bandwidth chaos

OCIS codes 140.5960; 140.1540; 130.3120

收稿日期: 2017-05-21; 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)

1 引言

混沌激光具有宽频谱类噪声特性。近年来,基于混沌激光的应用技术相继被提出,并受到越来越多的关注。目前,已被广泛应用到保密通信^[1-7]、高速随机数生成^[8-11]、混沌雷达^[12-13]、混沌光时域反射仪^[14-15]、测距和光纤传感等方面。同时,这些应用正逐步向实用化和市场化方向迈进。

混沌激光的产生系统主要通过分立元件搭建而成,但基于分立元件的混沌半导体激光器存在结构不稳定、体积大、应用受限、成本高等问题,只适用于实验室。与离散器件组成的装置相比,光子集成电路具有独特的优势,如尺寸较小,成本较低,稳定性较好,适用于大批量生产^[16-18]。集成电路与半导体激光器相结合将是混沌应用实用化和市场化的关键所在。近年来,相关研究应运而生,并已取得一系列成果^[19-37]。

Ushakov 等^[20]研究了一种超短集成分布式光反馈单片集成半导体激光器的动态特性,并且观测到了 2 种与不同频率规则自脉冲有关的霍普夫分岔。Yousefi 等^[21]报道了单片集成半导体激光器中倍周期进入混沌的现象,并且证明与离散器件组成的装置相比,单片集成半导体激光器在整个寿命周期中都具有更加稳定的动态特性。Argyris 等^[22,30,34]设计并研制了一种四段式单片集成半导体激光器,该激光器结构紧凑,是一种具有潜力的发射器。Harayama 等^[24]联合研制了一种带有波导结构的环形单片集成半导体激光器芯片,此芯片包含 1 个分布反馈式(DFB)激光器、2 个独立的光放大区(SOA)、环形无源光波导,以及 1 个快速光电探测器(PD),将 2 片此种混沌半导体激光器芯片封装在 1 个模块中,可并行输出 2 路不相关的混沌电信号。Tronciu 等^[23]研制了一种带有空气隙的多反馈光子集成半导体激光器芯片。Wu 等^[26]设计并研制了一种尺寸为 780 μm 的单片集成放大反馈半导体激光器芯片,并研究了其动态特性。要指出的是,以上的集成结构中至少包含了放大区、相位区或者高反射层中的一种。

为了减小集成成本、降低集成工艺复杂度,在现有的蝶形封装基础上进行改进,设计一种新型的面向蝶形封装的混沌外腔半导体激光器。该激光器不需要集成结构中的放大区和相位区,因而极大地简化了集成工艺,降低了集成成本。特别要说明的是,本设计之所以能降低集成成本,是因为省去了放大区和相位区,但结构仍是集成结构,而不是离散分离器件。为了探究微米级混沌外腔半导体激光器的特性及优势,从理论上研究了反馈率、注入电流比和载流子寿命对这种面向蝶形封装的外腔半导体激光器动态特性的影响。首先,研究载流子寿命和注入电流比对面向蝶形封装的外腔半导体激光器弛豫振荡频率的影响;接着,研究反馈时延对外腔振荡频率的影响,并分析高带宽混沌生成的原因;最后,讨论分析短腔反馈时延被隐藏的原因。研究频谱特征的意义在于为高带宽混沌的生成提供新思路。选择合适参数的激光器有利于提高振荡频率,进而生成高维高带宽混沌,比如在大注入电流比下,选择载流子寿命较小的半导体激光器芯片来生成高带宽混沌。以这种高带宽混沌激光器作为物理熵源可以生成高速随机数。

2 理论模拟

2.1 原理

光子集成混沌激光器的设计原理如下。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,构建产生高带宽混沌所需的条件和结构,即特定的外腔腔长和外腔反馈率等。然后将所需的激光器芯片、半透半反镜、准直透镜和耦合透镜进行蝶形封装。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。如图 1 所示,DFB 激光器芯片输出的一部分光经过红色虚线所示路径进行传播,并在半透半反镜处将光反馈回到 DFB 激光器芯片,形成光反馈。最后混沌光经耦合透镜输出。模拟的外腔尺寸为 5.4 mm。

2.2 理论模型及其速率方程

针对图 1 所示装置结构,采用典型的单反馈半导体激光器的速率方程:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} [G_n (N - N_0) - \tau_p^{-1}] A + k_{ap} A (t - \tau_f) \cos \Theta, \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\alpha}{2} [G_n (N - N_0) - \tau_p^{-1}] - k_{ap} \frac{A(t - \tau_f)}{A(t)} \sin \Theta, \quad (2)$$

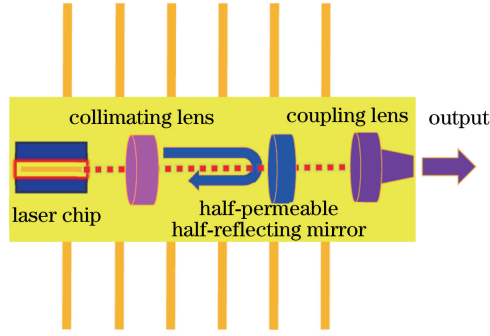


图1 面向蝶形封装的混沌外腔半导体激光器原理图

Fig. 1 Schematic of a chaotic external-cavity semiconductor laser faced to butterfly packaging

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_{th} \times J_r}{\tau_n} - \frac{N}{\tau_n} - G_n(N - N_0)A^2, \quad (3)$$

模拟半导体激光器的电场振幅 A 、相位 Φ 和腔内载流子密度 N ，式中 G_n 为增益系数 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)， N_0 为透明载流子密度 (m^{-3})， τ_p 是光子寿命 (s)， k_{ap} 为外腔的反馈强度， Θ 为反馈相位， α 为线宽增强因子， τ_f 为反馈延迟时间， N_{th} 为阈值载流子密度 (m^{-3})， J_r 为注入电流比， τ_n 为载流子寿命 (s)。

外腔反馈强度 (k_{ap}) 的计算公式为

$$k_{ap} = \frac{(1 - r_2^2) \times r_3}{r_2 \tau_{in}}, \quad (4)$$

式中 r_2 、 r_3 分别为激光器内、外腔反馈率 (%)， τ_{in} 为光在激光腔内往返的时间 (s)。

弱反馈时，激光器固有的弛豫振荡频率 (f_r , GHz) 可以描述为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_r - 1}{\tau_n \tau_p} (1 + G_n N_{th} \tau_p)} \sqrt{\frac{(1 - 2k_{ap} \tau_p \cos \Theta)(1 + 2k_{ap} \tau_f \cos \Theta - a \sin \Theta)}{1 + k_{ap}^2 \tau_f^2 \cos \Theta}}, \quad (5)$$

外腔振荡频率 (f_{ext} , GHz) 可以表示为

$$f_{ext} = \frac{1}{\tau_f} = \frac{c}{2nl}, \quad (6)$$

式中 a 为线宽增强因子， l 为外腔长度， c 为光速， n 为反馈回路中集成材料的平均折射率。

由(5)式可知，弛豫振荡频率的大小与注入电流和载流子寿命有关；由(6)式可知，外腔振荡频率也与外腔反馈的时延有关。激光器本身的材料、结构及外部条件会影响激光器的弛豫振荡频率、外腔振荡频率和混沌维度等，进而影响混沌的频谱带宽，因而高带宽混沌生成与激光器本身的材料、结构及外部条件有关。载流子寿命与激光器本身的材料有关，外部条件中外腔长度严重影响外腔振荡频率，因此，在一定条件下重点分析激光器本身的载流子寿命和外腔长度对特征频率的影响，进而分析其对频谱带宽的影响。

载流子寿命是指载流子间的复合使载流子逐渐消失时载流子平均存在的时间。一般来说，载流子寿命取决于复合概率和材料中的载流子浓度，实际操作中利用缩减激光器基底区厚度的方法可以将载流子寿命缩减到皮秒量级。Cartledge 等^[38]测得 DFB 半导体激光器的载流子寿命范围为 0.7~1.0 ns，另有研究人员测得 3 组半导体激光器的载流子寿命范围为 0.2~0.4 ns^[39-40]。根据以上研究的测试范围及本课题组所使用激光器载流子寿命的范围，选定在 0.1~2.0 ns 载流子寿命范围内进行理论仿真。

2.3 带宽计算及时延信息量

频谱带宽是指该信号所包含的不同频率成分所占据的频率范围，在本研究中计算的是 80% 能量所占的频率范围。混沌时序强度关联自相关函数的计算公式为

$$C_I(\Delta t) = \frac{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (7)$$

式中 Δt 为延迟时间， $\langle \rangle$ 表示关于时间求平均数， I 为光反馈产生的时间序列的功率。

3 面向蝶形封装的外腔半导体激光器的动态特性

为了探究微米尺度混沌外腔半导体激光器的特性,研究了载流子寿命 $\tau_n = 0.3$ ns、注入电流阈值 $J_r = 3$ 时,不同外腔反馈率下激光器输出的动态特性,分别用时序、频谱、自相关函数(ACF)和相图进行分析,结果如图 2 所示。当反馈率 $r_3 = 3\%$ (图 2 第 1 行)或 $r_3 = 7\%$ (图 2 第 6 行)时,输出功率是恒定值,功率谱接近于

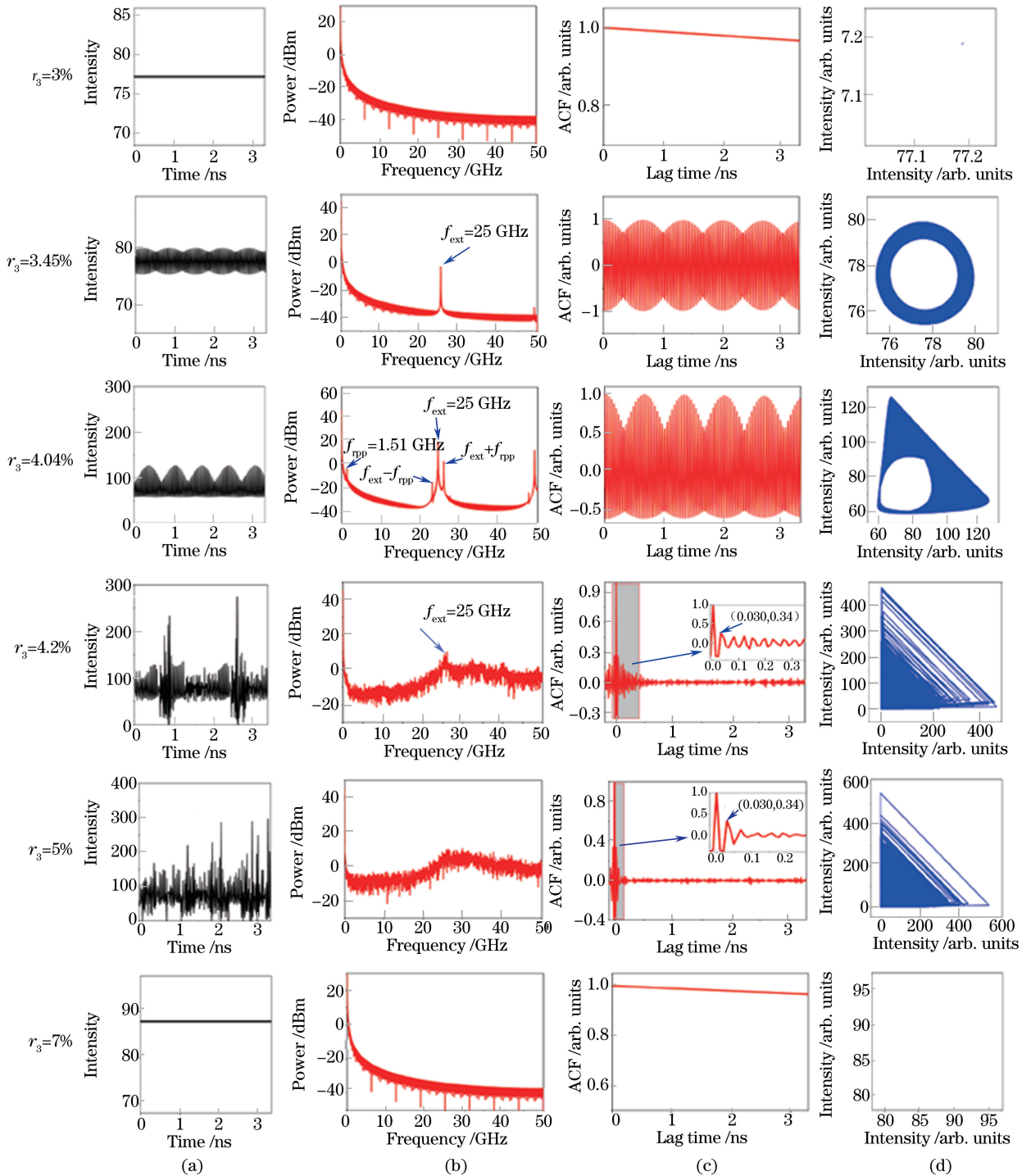


图 2 不同外腔反馈率条件下面向蝶形封装的激光源输出的(a)时序、(b)频谱、(c)自相关函数和(d)相图
 Fig. 2 (a) Time series, (b) frequency spectra, (c) autocorrelation functions and (d) phase portraits of typical dynamical states output from the external-cavity semiconductor laser faced to butterfly packaging under different external cavity feedback ratios

噪声基底,自相关的时延峰峰值接近于1,此时,外腔半导体激光器的动态状态是稳定态。当反馈率 $r_3 = 3.45\%$ (图2第2行)时,输出时序呈周期性振荡,其振荡周期为 $0.04 \text{ ns}(1/f_{\text{ext}})$,频谱有1个明显的峰,峰值的基频频率接近于弛豫振荡频率,功率谱的峰值频率大约是 $25 \text{ GHz}(f_{\text{ext}})$,自相关函数也呈周期性振荡,基频弛豫振荡的周期是 $0.04 \text{ ns}(1/f_{\text{ext}})$,相图是一个圆环,此时,单片集成外腔半导体激光器的动态状态是准周期状态。当反馈率 $r_3 = 4.04\%$ (图2第3行)时,输出时序呈周期性振荡,其振荡周期和规则脉冲包周期分别为 $0.04 \text{ ns}(1/f_{\text{ext}})$ 和 $0.66 \text{ ns}(1/f_{\text{rpp}})$,基频频率接近于弛豫振荡频率,功率谱的峰值频率是 $25 \text{ GHz}(f_{\text{ext}})$,规则脉冲包的振荡频率 $f_{\text{rpp}} = 1.51 \text{ GHz}$,自相关函数的振荡周期和规则脉冲包周期分别是 $0.04 \text{ ns}(1/f_{\text{ext}})$ 和 $0.66 \text{ ns}(1/f_{\text{rpp}})$,相图是一个变形的圆环。当反馈率 $r_3 = 4.2\%$ (图2第4行)时,输出时序是无序无周期的,功率谱的峰值频率约为 25 GHz ,自相关曲线在 0.03 ns 点有一个小峰且峰值为 0.24 ,相图近似于一个三角形区域。当反馈率 $r_3 = 5\%$ (图2第5行)时,输出时序是无序无周期的,功率谱比较平坦,带宽比较宽,高达 40 GHz ,自相关曲线在 0.03 ns 处有一个小峰且峰值为 0.34 ,相图近似于一个三角形区域。

为了更系统、更清楚地说明载流子寿命对外腔半导体激光器频谱带宽(频谱在 80% 能量下的带宽)的影响,图3给出了外腔半导体激光器频谱带宽在载流子寿命和外腔反馈率参数空间中的分布图,黑色区域频谱带宽小于 1 GHz ,视作非混沌态,其他颜色为混沌态,其中红色区域的频谱带宽大于 70 GHz 。固定采样率为 200 GHz ,当载流子寿命从 0.01 ns 增加到 0.50 ns 、注入电流比从 2.00 增加到 3.98 时,得到面向蝶形封装的外腔半导体激光器频谱带宽的分布图。可以看出:在混沌区域中,载流子寿命越小,频谱带宽越大;注入电流比越大,频谱带宽较大的区域增大。由此可见,参数合适的蝶形封装外腔半导体激光器可以输出高维混沌,载流子寿命较小且注入电流比较大时,生成混沌的频谱带宽较大。

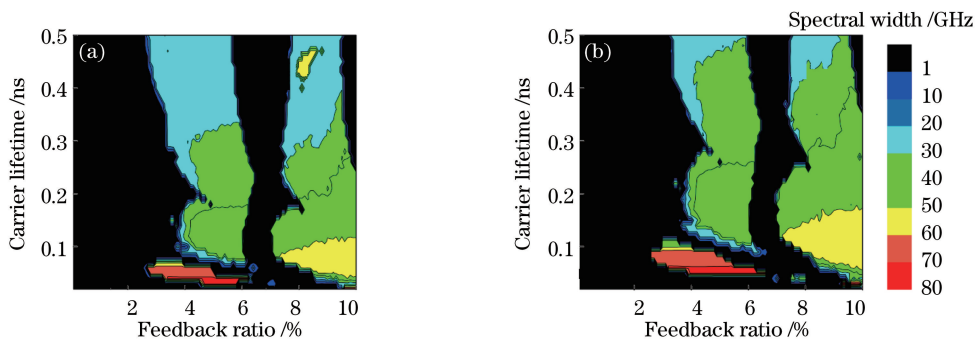


图3 面向蝶形封装的外腔半导体激光器频谱带宽在外腔反馈率和载流子寿命参数空间中的分布。(a) $J_r = 3$; (b) $J_r = 4$

Fig. 3 Mapping of the spectral bandwidth of the external-cavity semiconductor laser faced to butterfly packaging in the parameter space of carrier lifetime and feedback ratio. (a) $J_r = 3$; (b) $J_r = 4$

4 高带宽混沌生成机理

一般而言,特征频率较大的频谱具有生成高带宽的潜力,通过调节其他参数可以使这种特征频率较大的频谱变得更平坦,频谱带宽也更宽。其中,激光器的弛豫振荡频率和外腔振荡频率就是2种最典型的特征频率。

图4为不同载流子寿命下外腔半导体激光器输出的频谱,可得到载流子寿命对外腔半导体激光器弛豫振荡频率的影响。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 40 GHz ;载流子寿命为 0.3 ns 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 20 GHz ;载流子寿命为 1.0 ns 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 7 GHz ;载流子寿命为 2.0 ns 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 4.8 GHz 。载流子寿命越小,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率越大。

图5为不同注入电流比条件下外腔半导体激光器的输出频谱。注入电流比为 1.3 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 10.5 GHz ;注入电流比为 2.0 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 20 GHz ;注入电流比为 3.0 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 28 GHz ;注入电流比为 4.0 时,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率是 39 GHz 。注入电流比越大,外腔半导体激光器的弛豫振荡频率越大。

图6为模拟计算得到的外腔半导体激光器的频谱带宽在载流子寿命和注入电流比参数空间中的分布。

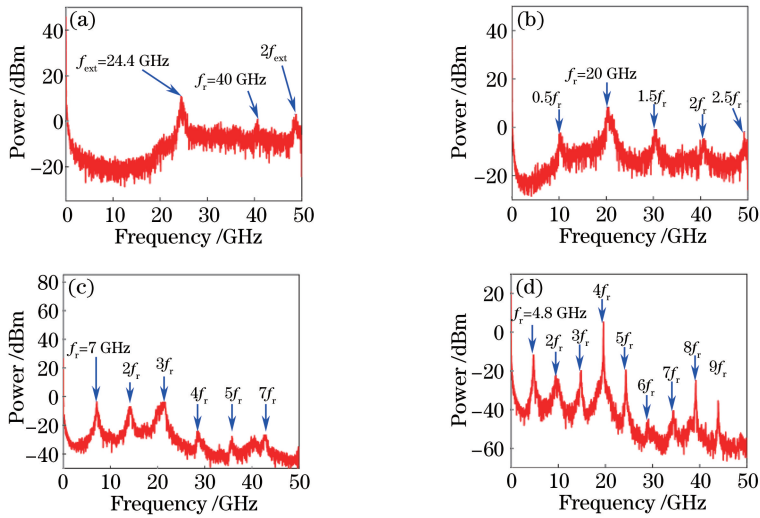


图4 不同载流子寿命下外腔半导体激光器的输出频谱。(a) $\tau_n=0.1$ ns;(b) $\tau_n=0.3$ ns;(c) $\tau_n=1.0$ ns;(d) $\tau_n=2.0$ ns

Fig. 4 Output frequency spectra from the external-cavity semiconductor laser under different carrier lifetimes. (a) $\tau_n=0.1$ ns; (b) $\tau_n=0.3$ ns; (c) $\tau_n=1.0$ ns; (d) $\tau_n=2.0$ ns

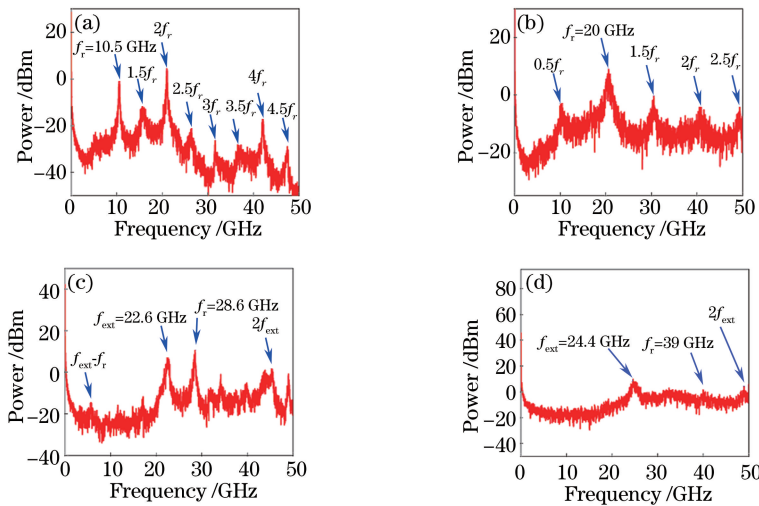


图5 不同注入电流比条件下外腔半导体激光器的输出频谱。(a) $J_r=1.3$;(b) $J_r=2.0$;(c) $J_r=3.0$;(d) $J_r=4.0$

Fig. 5 Output frequency spectra from the external-cavity semiconductor laser under different injection current ratios. (a) $J_r=1.3$; (b) $J_r=2.0$; (c) $J_r=3.0$; (d) $J_r=4.0$

在载流子寿命较小且注入电流比较大的情况下,采样率取 200 GHz,载流子寿命从 0.01 ns 增加到 0.50 ns、注入电流比从 2.00 增加到 3.98 时,载流子寿命越小,频谱带宽越大。载流子较小且注入电流较大时,图 6 中出现了深红色区域,这些深红色区域的带宽在 70~80 GHz 之间。

图 7 为不同反馈时延条件下混沌外腔半导体激光器的时序、频谱和自相关函数。反馈时延为 0.036 ns 时,外腔振荡频率是 25 GHz,自相关函数曲线中只有主峰振荡,在 0.03 ns 处峰值为 0.27,但是时序上会有 1.5 ns 的周期(反馈时延是 0.036 ns,弛豫振荡时间是 0.031 ns,1.5 ns 既不是反馈时延也不是弛豫振荡时间)。反馈时延为 2 ns 时,外腔振荡频率是 0.5 GHz,弛豫振荡频率是 32 GHz,自相关函数曲线中,除了主峰振荡以外,2.0 ns 时延处也有典型的振荡特征。当反馈时延是 0.036 ns 时,弛豫振荡时间是 0.031 ns,对应的峰值是 0.030 ns,出现了时延峰值漂移的现象。这是由于短时延弱反馈下,弛豫振荡特征明显强于外腔振荡特征,而且弛豫振荡时间接近于外腔振荡时间,因此造成激光器的弛豫振荡掩盖了外腔的反馈时延。

由图 4~6 可知,减小载流子寿命、加大注入电流比可提高激光器的弛豫振荡频率;由图 7 可知,时延较小时,外腔振荡频率较大。因为这种蝶形封装的外腔半导体激光器的频谱具有数十吉赫兹的弛豫振荡频率

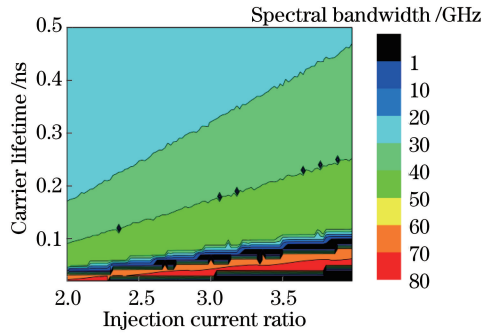


图6 面向蝶形封装的外腔半导体激光器频谱带宽在注入电流比和载流子寿命参数空间中的分布
Fig. 6 Mapping of the spectral bandwidth of the external-cavity semiconductor laser faced to butterfly packaging in the parameter space of carrier lifetime and injection current ratio

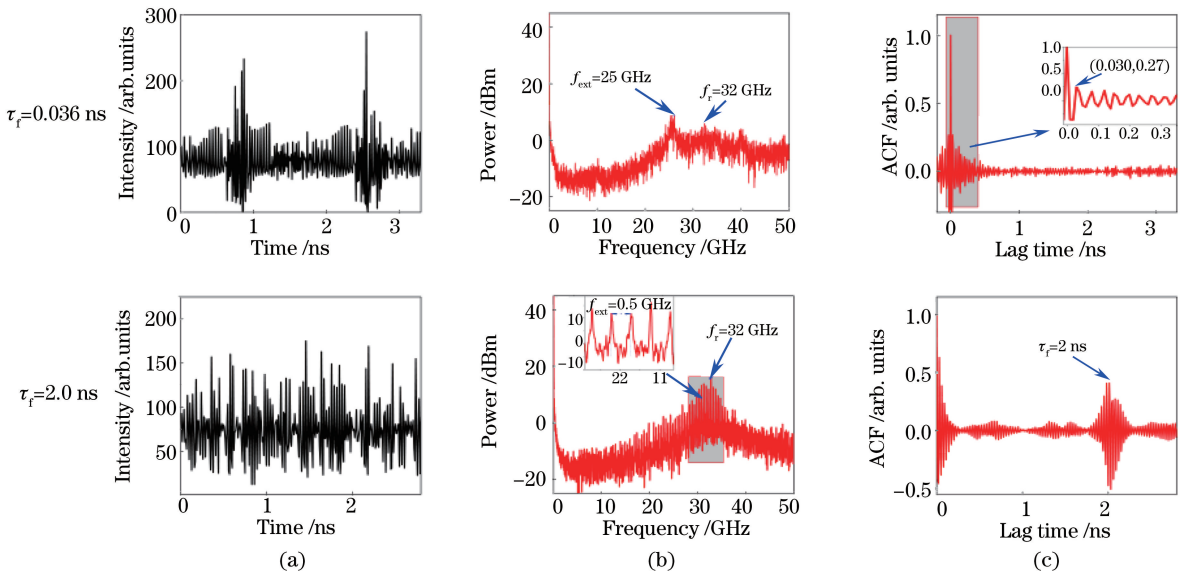


图7 不同反馈时延条件下混沌外腔半导体激光器的(a)时序、(b)频谱和(c)自相关函数
Fig. 7 (a) Time series, (b) frequency spectra and (c) autocorrelation functions of the chaotic external-cavity semiconductor laser under different feedback time delays

和外腔振荡频率,所以这种外腔半导体激光器容易生成带宽高达 70 GHz 的频谱,可为高速随机数的生成提供新的熵源。

5 结 论

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,并在理论上研究了反馈率、注入电流比和载流子寿命对这种混沌外腔半导体激光器动态特性的影响。数值仿真结果表明,调节反馈率或增加注入电流比时,该结构的输出光经历从稳定状态、准周期状态、混沌状态再到稳定状态的周期演化。增大注入电流比或减小载流子寿命时,外腔激光器的弛豫振荡频率增大。大弛豫振荡频率和大外腔振荡频率下能够生成有效带宽高达 70 GHz 的混沌。通过分析这种高带宽混沌生成的机理,提供了一种生成高带宽混沌的新思路,为高速随机数的生成提供了新的熵源。

参 考 文 献

- [1] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 151-162.
- [2] Argyris A, Syvridis D, Larger L, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343-346.

- [3] Soriano M C, García-Ojalvo J, Mirasso C R, *et al.* Complex photonics: Dynamics and applications of delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85(1): 421-470.
- [4] Fang Nian, Wang Lutang, Guo Shuqin, *et al.* Security of polarization-shift keying chaos optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 812-817
方捻, 王陆唐, 郭淑琴, 等. 偏振态移位键控光混沌通信系统的保密性[J]. *光学学报*, 2006, 26(6): 812-817.
- [5] Liu Jingang, Shen Ke, Zhou Liwei. Study on mechanism of secure communication with driven chaos masking in optical bistable system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(11): 1473-1478.
刘金刚, 沈柯, 周立伟. 光学双稳系统混沌驱动保密通讯原理研究[J]. *光学学报*, 1997, 17(11): 1473-1478.
- [6] Pan Xingmao, Wu Zhengmao, Tang Xi, *et al.* Chaos synchronization and communication in mesh network based on mutually coupled semiconductor lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1202005.
潘兴茂, 吴正茂, 唐曦, 等. 基于互耦半导体激光器的混沌网状网络的同步与通信[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1202005.
- [7] Wang Feifei, Zhang Li, Yang Lingzhen, *et al.* Quasi-distributed fiber Bragg grating sensing network based on fiber chaotic laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806006.
王斐斐, 张丽, 杨玲珍, 等. 基于混沌光纤激光的准分布式布拉格传感网络[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [13] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Koch T L, Koren U. Semiconductor photonic integrated circuits[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 27(3): 641-653.
- [17] Charbonneau S, Koteles E S, Poole P J, *et al.* Photonic integrated circuits fabricated using ion implantation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(4): 772-793.
- [18] Hofstetter D, Maisenholder B, Zappe H P. Quantum-well intermixing for fabrication of lasers and photonic integrated circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 4(4): 794-802.
- [19] 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.
- [20] Ushakov O, Bauer S, Brox O, *et al.* Self-organization in semiconductor lasers with ultrashort optical feedback[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(4): 043902.
- [21] Yousefi M, Barbarin Y, Beri S, *et al.* New role for nonlinear dynamics and chaos in integrated semiconductor laser technology[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(4): 044101.
- [22] 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.

- [23] Tronciu V Z, Ermakov I V, Colet P, *et al.* Chaotic dynamics of a semiconductor laser with double cavity feedback: Applications to phase shift keying modulation[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(18): 4747-4752.
- [24] 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): 622-624.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Yee D S, Leem Y A, Kim S B, *et al.* Loss-coupled distributed-feedback lasers with amplified optical feedback for optical microwave generation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(19): 2243-2245.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Wünsche H J, Bauer S, Kreissl J, *et al.* Synchronization of delay-coupled oscillators: A study of semiconductor lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(16): 163901.
- [33] Perez T, Radziunas M, Wunsche H J, *et al.* Synchronization properties of two coupled multisection semiconductor lasers emitting chaotic light[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(20): 2135-2137.
- [34] 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.
- [35] Monfils I, Cartledge J C. Detailed theoretical and experimental characterization of 10 Gb/s clock recovery using a Q-switched self-pulsating laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(5): 619-626.
- [36] Sun Y, Pan J Q, Zhao L J, *et al.* All-optical clock recovery for 20 Gb/s using an amplified feedback DFB laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(17): 2521-2525.
- [37] 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.
- [38] Cartledge J C, Srinivasan R C. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(5): 852-860.
- [39] Bjerkan L, Royset A, Hafskjaer L, *et al.* Measurement of laser parameters for simulation of high-speed fiberoptic systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(5): 839-850.
- [40] Wen Y F. Extraction of semiconductor laser rate equation parameters for simulation of fiber-optical communication system purpose[D]. Hamilton: McMaster University, 2012.