

基于光反馈双模 DFB 激光器的宽带混沌信号产生

张艺腾^{1,2}, 贾志伟^{1,2}, 李青天^{1,2}, 王龙生^{1,2}, 王安帮^{1,2*}

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

²太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 提出并数值验证了一种利用光反馈双模分布式反馈(DM-DFB)半导体激光器产生宽带混沌信号的方法。通过双纵模 Lang-Kobayashi 方程建立了光反馈 DM-DFB 半导体激光器的理论模型, 探明了宽带混沌信号产生的物理机制为模式拍频, 数值分析了模式间隔、偏置电流和反馈系数对混沌带宽的影响。仿真设计了双模激光器, 在镜面反馈系统中, 高偏置电流和强反馈强度条件下可以产生 38.6 GHz 的混沌信号。这一结构为宽带集成混沌源提供了一种新思路。

关键词 激光器; 半导体激光器; 双模分布式反馈激光器; 宽带混沌; 光反馈; 光子集成

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2114001

Broadband Chaos Signal Generation Based on Dual-mode DFB Laser with Optical Feedback

Zhang Yiteng^{1,2}, Jia Zhiwei^{1,2}, Li Qingtian^{1,2}, Wang Longsheng^{1,2}, Wang Anbang^{1,2*}

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

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

Abstract We proposed and numerically verified a method of generating broadband chaotic signals using a dual-mode distributed feedback (DM-DFB) semiconductor laser with optical feedback. A theoretical model of the laser was established according to the dual-longitudinal-mode Lang-Kobayashi equation. It was determined that the generation mechanism of the broadband chaotic signals was the mode beat effect. The influences of mode interval, bias current, and feedback coefficient on the chaotic signal bandwidth were numerically investigated. Subsequently, a dual-mode laser was designed by simulation. In the mirror feedback system, a chaotic signal with a bandwidth of 38.6 GHz was generated under a high bias current and strong feedback intensity. The structure provides a new idea for broadband integrated chaotic sources.

Key words lasers; semiconductor lasers; dual-mode distributed feedback lasers; broadband chaos; optical feedback; photonic integration

OCIS codes 140.5960; 140.3490; 140.1540; 130.3120

1 引言

混沌激光是激光输出的一种特殊形式, 具有类噪声的随机时域特性和宽带频域特性, 在保密通

信^[1-4]、随机密钥产生^[5-6]、密钥分发^[7-8]、激光测距^[9-11]等领域具有良好的应用前景。在保密通信领域, 基于激光混沌同步的混沌保密通信具有物理层加密带来的安全性和与现行光纤网络通信的兼容

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61822509, 62035009, 61713014, 61927811, 61961136002)、山西“1331 项目”重点创新研究团队

通信作者: *wanganbang@tyut.edu.cn

性,且具有实现高速保密通信的潜力。

高速混沌保密通信的实现依赖于宽带、可同步混沌激光源的使用。然而,常用的光反馈半导体激光器^[12]产生的混沌激光是外腔振荡过程与激光器内部弛豫振荡过程相互作用的结果。受限于激光器中的弛豫振荡现象,其混沌激光的 80% 能量带宽通常小于 10 GHz。近些年来,人们对提高混沌激光器的带宽进行了大量研究:将连续光注入混沌激光器或者将混沌激光注入稳态激光器中可以产生 20 GHz 的混沌信号^[13-15];采用光纤环形振荡器可以将混沌信号的带宽提高到 26.5 GHz^[16-17];利用平衡探测器对两个外腔长度不同的混沌信号进行拍频,通过光外差产生了 14 GHz 的白混沌信号^[18];通过延迟自干涉自相位调制以及自相位调制与色散模块级联同样可以达到带宽增大的目的^[19-20]。相比于光反馈方法,上述方法的结构复杂,不利于同步。因此,对于结构简单、可集成的光子宽带混沌激光源的需求仍十分迫切。

本文利用光反馈双模分布式反馈(DM-DFB)半

导体激光器来产生宽带混沌激光。将折射率耦合型分布式反馈(DFB)激光器的布拉格光栅设置在约束限制层中,其内部的反馈方式为由折射率周期性变化引起的布拉格反射。折射率耦合型 DFB 激光器存在双模简并态,通过对激光器的双腔面镀相同反射率的薄膜,可以使激光器输出双模激光^[21]。双模半导体激光器中存在的弛豫振荡和拍频振荡,与光反馈引入的外腔振荡相互作用,从而产生宽带混沌激光。本文给出了光反馈双模半导体激光器的速率方程模型,并从理论上验证了宽带混沌激光产生的可行性;采用 VPIcomponentMaker (VPI) 仿真软件,利用 DFB 半导体激光器的本征双模,结合光反馈方法,产生有效带宽高达 38.6 GHz 的宽带混沌激光;分析了反馈时延对混沌带宽的影响,有望获得带宽超过 30 GHz 的集成混沌源。

2 Lang-Kobayashi 模型及数值结果

基于 Lang-Kobayashi 方程,光反馈 DM-DFB 激光器的速率方程^[22-24]为

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1 + i\alpha}{2} \left\{ \frac{g[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon \sum_{m=0}^1 |E_m(t)|^2} \left[1 - \left(\frac{m \Delta\omega_L}{\Delta\omega_g} \right)^2 \right] - \frac{1}{\tau_p} \right\} E_m(t) + \frac{\kappa_f}{\tau_L} E_m(t - \tau_f) \exp(-i\omega_m \tau_f) + F(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N(t)}{\tau_N} - \sum_{m=0}^1 \frac{g[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon \sum_{m=0}^1 |E_m(t)|^2} \left[1 - \left(\frac{m \Delta\omega_L}{\Delta\omega_g} \right)^2 \right] |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

式中: $E(t)$ 为激光电场的复振幅; ω 表示光角频率; $m=0, 1$ 分别表示激光器输出的两个模式,当 $m=0$ 时对应增益峰值频率; $N(t)$ 表示载流子数; $\Delta\omega_L = 2\pi/\tau_L$ 为光角频率间隔; τ_L 表示光在腔内的往返时间; κ_f 和 τ_f 分别表示幅度反馈系数和反馈时延 $\kappa_f = (1 - r_0^2)r_e/r_0$,其中 r_0 为激光器端面幅度反射率, r_e 为反射镜幅度反射率, r_e 的取值范围为 $0 \sim 0.705$,对应的幅度反馈系数 κ_f 的变化范围为 $0 \sim 0.9$; $F(t) = \sqrt{2\beta\xi(t)}$ 为自发辐射噪声, $\xi(t)$ 为高斯白噪声, β 为自发辐射因子; I 为激光器的偏置电流, $I_{th} = 17.7$ mA 表示阈值电流。(1)式等号右边第二项为反馈项。采用四阶龙格-库塔方法对速率方程进行求解,方程中的其他参数及取值如表 1 所示。

图 1 所示为 DM-DFB 激光器自由运行的输出状态,此时偏置电流 $I = 8I_{th}$ 。自由运行的 DM-DFB 激光器光谱如图 1(a) 所示, ν_0 和 ν_1 表示激光器稳

表 1 光反馈 DM-DFB 激光器的模拟参数

Table 1 Simulation parameters of the DM-DFB laser with optical feedback

Description	Symbol	Value
Linewidth enhancement factor	α	5
Differential gain coefficient / s^{-1}	g	3.2×10^3
Transparency carrier number	N_0	1.25×10^8
Gain saturation coefficient	ϵ	1×10^{-23}
Optical angular frequency interval / GHz	$\Delta\omega_L$	$2\pi \times 35$
Gain peak frequency / THz	$\Delta\omega_c$	$2\pi \times 193.5$
Gain width / THz	$\Delta\omega_g$	$2\pi \times 10$
Photon lifetime / ps	τ_p	4.2
Feedback delay time / ns	τ_f	5
Spontaneous emission factor	β	0.001
Facet amplitude reflectivity	r_0	0.548
Internal round-trip time / ps	τ_L	28.57
Carrier lifetime / ns	τ_N	1.6
Elementary charge / C	q	1.602×10^{-19}

定工作的两个模式的光频,其中 $\nu_0 = 193.5$ THz, $\nu_1 = 193.465$ THz, 光频差 $\Delta\nu = 35$ GHz。由于两个模式之间存在拍频, 激光器输出强度产生一个周期振荡, 如

图 1(b) 所示, 频谱在 $f_0 = 35$ GHz 处出现峰值。激光器静态输出的时间序列如图 1(c) 所示, 呈现规则的周期振荡波形, 其振荡周期 $\tau_0 = 1/\Delta\nu = 0.0286$ ns。

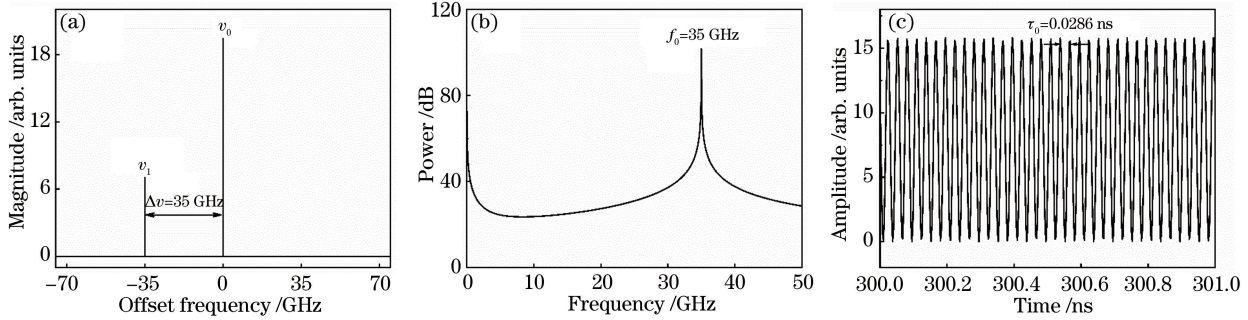


图 1 DM-DFB 激光器在 $8I_{th}$ 偏置电流下的静态特性。(a) 光谱; (b) 频谱; (c) 时序

Fig. 1 Static characteristics of DM-DFB laser at $I = 8I_{th}$. (a) Optical spectrum;

(b) power spectrum; (c) time series

图 2 所示为 DM-DFB 激光器在 $8I_{th}$ 偏置电流下不同反馈强度的混沌输出状态, 包括光谱、频谱以及时序, 此时 $\tau_f = 5$ ns。从上至下, 幅度反馈系数分别为 0.2、0.5 和 0.8。当反馈系数为 0.2 时, 从频域可以看到明显的弛豫振荡峰以及 ν_0 和 ν_1 之间的拍频率。由于此时反馈系数较小, 光谱并没有完全展宽, 从频谱上可以观察到明显的弛豫振荡频率 f_R , 并且在 f_0 周围频率间隔为 f_R 的峰值频谱的低频混沌振荡与高频振荡相互分离, 混沌信号的带宽

较小。为了便于定量分析, 只考虑有足够功率的频谱谱段, 采用离散的谱段包含总功率谱能量的 80% 来衡量混沌信号的有效带宽^[25], 如图 2(a2)、(b2)、(c2) 中灰色区域所示。增大反馈系数到 0.5, 此时混沌激光的相位动态变化速度随着反馈系数的增大而加快, 光谱展宽。频谱混沌振荡与高频振荡逐渐结合, 带宽增大, 而此时频谱能量仍集中于弛豫振荡峰附近, 因此带宽仍受到弛豫振荡的限制。继续增大反馈系数到 0.8 时, 光谱进一步展宽; 虽然存在双

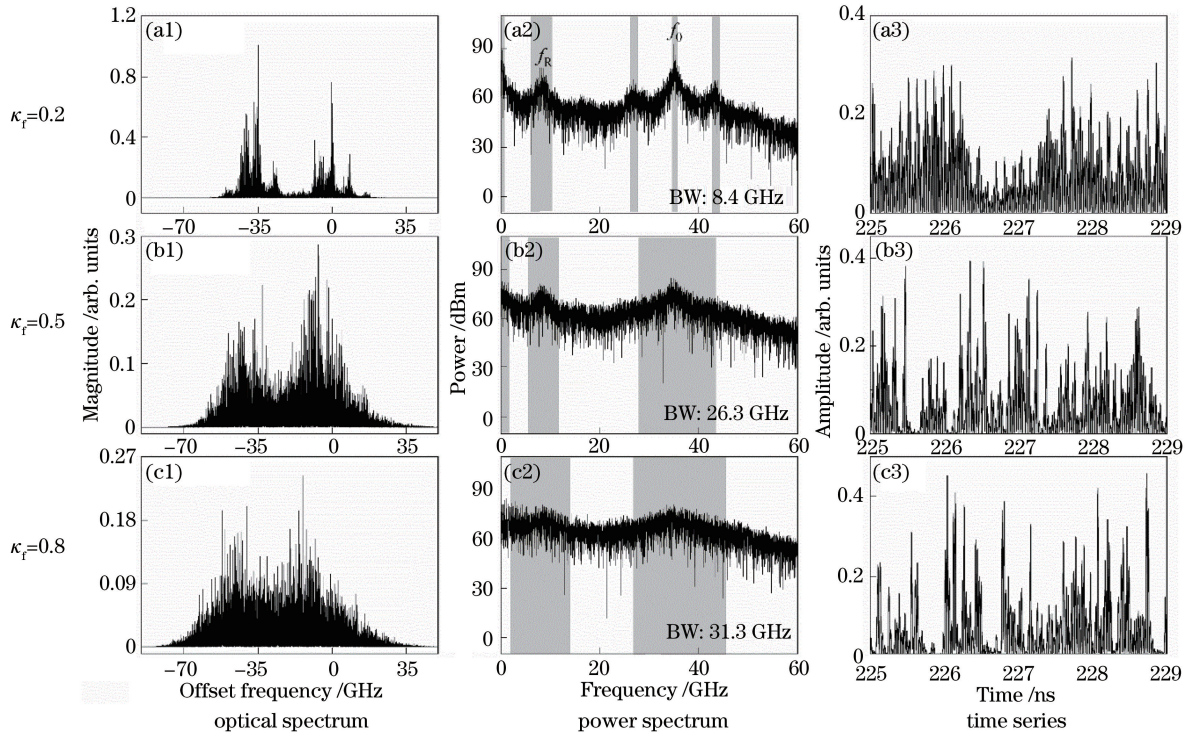


图 2 $8I_{th}$ 偏置电流下光反馈 DM-DFB 激光器的典型混沌状态

Fig. 2 Typical chaotic states of optical feedback DM-DFB laser at $I = 8I_{th}$

模特性,但 ν_0 和 ν_1 模式重叠部分增多。频谱中,弛豫振荡位置处不再具有明显的峰值,且高频振荡部分进一步展宽,混沌带宽增大,此时 DM-DFB 激光器产生混沌信号的带宽(BW)为 31.3 GHz。

图 3 比较了在两个偏置电流下双模的模式间隔对于混沌信号带宽的影响,此时幅度反馈系数为 0.8。从图 3 可以看出,模式间隔在 20~40 GHz 范围内,混沌带宽随着模式间隔的增加而增大,几乎呈线性增加的趋势。对比发现,高偏置电流($8I_{th}$)下,带宽增加的趋势更明显,其原因在于,高偏置电流下混沌振荡与高频振荡更容易互相交叠形成宽带频谱。

图 4 所示为在不同的模式间隔以及偏置电流下,反馈系数对混沌带宽的影响。从图 4(a)可以看到,在不同的模式间隔下,混沌信号的带宽都随着反馈系数的增加而增大,并在 $\kappa_f = 0.8$ 时,混沌带宽达

到最大值并趋于稳定。较大的模式间隔更有利于产生带宽增大的混沌信号。从图 4(b)可以看到,在相同的模式间隔下,随着反馈系数的增加,高偏置电流下信号的带宽更大,这一结果与图 3 所示的结果一致。

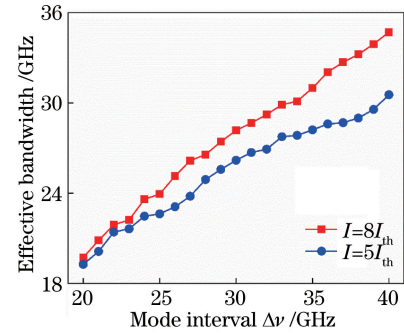


图 3 $\kappa_f = 0.8$ 时双模模式间隔对于混沌带宽的影响

Fig. 3 Effects of mode interval on chaotic bandwidth when $\kappa_f = 0.8$

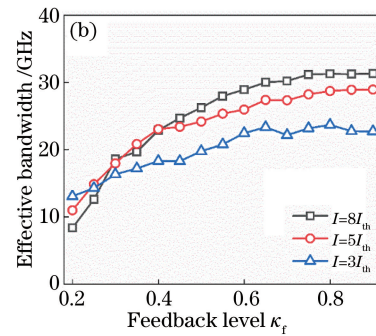
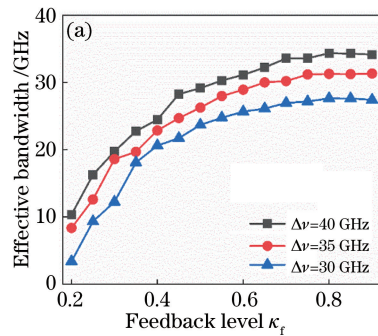


图 4 反馈系数对于混沌带宽的影响。(a) $I = 8I_{th}$ 时 $\Delta\nu$ 对带宽的影响;(b) $\Delta\nu = 35$ GHz 时 I 对带宽的影响

Fig. 4 Effect of feedback coefficients on chaotic bandwidth. (a) Effect of $\Delta\nu$ on chaotic bandwidth when $I = 8I_{th}$; (b) effect of bias current I on chaotic bandwidth when $\Delta\nu = 35$ GHz

通过分析上述数值结果,发现 DM-DFB 激光器的模式间隔在 30~40 GHz 范围内,以及高偏置电流及强反馈系数条件下,由于弛豫振荡频率、模式间的拍频率以及外腔频率相互作用,低频混沌振荡与高频振荡相互交叠,可以产生带宽为 30 GHz 以上的混沌信号。

3 仿真分析

通过 VPI 仿真软件对光反馈 DM-DFB 激光器产生宽带混沌信号的系统进行验证。该软件具有独特的传输线仿真模型,除了通过载流子、幅度以及相位来表征激光器的输出特性,还可以利用克尔效应、双光子吸收效应、双折射以及偏振耦合等来模拟激光器复杂的非线性特性,并且可以精确设计激光器有源区材料、光栅耦合系数、非线性时间常数等参数^[26]。VPI 仿真软件中激光器参数的设计对后续激光器制备更具有指导作用。

图 5 为镜面反馈的 DM-DFB 激光器在 VPI 软件中仿真的实验装置图。首先,DM-DFB 激光器产生的激光经过偏振控制器(PC)控制光的偏振状态,然后通过掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大后进入耦合比为 50:50 的耦合器(OC1),其中一路激光进入反馈路,经过反射镜(FM)产生反馈光,利用可调光衰减器(VOA)控制光路的反馈强度。反射镜的反射光信号按原路返回到激光器中形成扰动,在一定的偏振条件及反馈强度下产生混沌激光。产生的混沌激光从耦合器另一个端口输出,经过一个光隔离器(OI),在保证光单向输出后,经过光纤耦合器分为两路,一路直接由光谱分析仪(OSA)探测并采集光谱数据,另一路通过光电探测器(PD)转换为电信号,通过频谱分析仪(ESA)观察和采集信号的频谱,以及通过示波器(OSC)观察和采集信号的时域波形。DM-DFB 激光器的主要设计参数如表 2 所示。

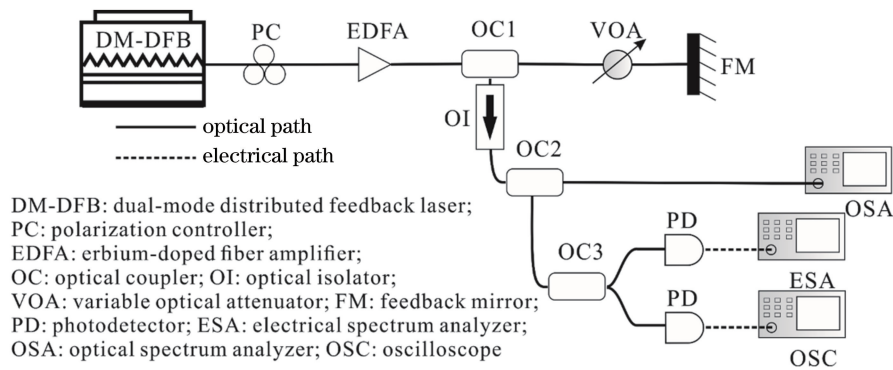


图 5 光反馈 DM-DFB 激光器产生混沌信号的装置图

Fig. 5 Setup diagram of chaotic signal generation using DM-DFB laser optical feedback

表 2 DM-DFB 激光器的 VPI 设计参数

Table 2 Parameters for DM-DFB laser used in VPI software

Description	Symbol	Value
Active section length / μm	L	900
Active section width / μm	W	2.5
Group velocity index	n_g	3.8
Index grating coupling coefficient / cm^{-1}	κ_i	5
Defect recombination coefficient / s^{-1}	A	3×10^8
Radiation recombination coefficient / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	B	1×10^{-16}
Auger recombination coefficient / $(\text{m}^6 \cdot \text{s}^{-1})$	C	1.3×10^{-41}
Internal loss factor / cm^{-1}	a	10
Linewidth enhancement factor	α	6
Transparency carrier density / m^{-3}	N_0	1.5×10^{24}
Linear material gain coefficient / m^2	G	3×10^{-20}
Reflectivity of facets	R	0.32

图 6 所示为 DM-DFB 激光器在偏置电流 $I = 8I_{\text{th}}$ ($I_{\text{th}} = 15.3 \text{ mA}$) 时的光谱、频谱和时序的模拟结果,此时 $\tau_f = 1 \text{ ns}$,对应光纤的外腔长度为 10 cm 。图 6(a1)~(a3)为此偏置电流下的稳态输出,可以看到此时激光器激射 λ_0 和 λ_1 模式的波长间隔 $\Delta\lambda = 0.28 \text{ nm}$,对应的光频差为 35 GHz ,与频谱上 f_0 处峰值保持一致。时序呈现周期为 τ_0 的周期振荡状态。当反馈强度为 $\kappa = -10 \text{ dB}$ (κ 为反馈功率与激光器输出功率之比) 时,DM-DFB 激光器产生的混沌信号的光谱、频谱和时序如图 6(b1)~(b3) 所示,从光谱来看,两个模式产生的混沌信号有一定程度的展宽,频谱上清晰地显示出弛豫振荡特征,弛豫振荡与高频振荡部分的频谱均得到展宽,但它们是相互分离的,此时混沌信号带宽较窄。在图 6(c1)~(c3) 中,当反馈强度增加到 -3 dB 时,随着反馈强度的增加,混沌信号的相位动态变化更快且更复杂^[18],从而使其光谱进一步展宽,频谱中低频能量抬升,弛豫振荡特征减弱。在弛豫振荡频率以

及拍频率与越来越多的外腔模式相互作用下,混沌振荡与高频振荡相互交叠形成宽带频谱,带宽增大,此时混沌信号的 80% 能量带宽为 38.6 GHz 。

进一步分析光反馈 DM-DFB 激光器产生的混沌信号,图 7(a)所示为混沌带宽在偏置电流和反馈强度共同作用下的变化规律。当偏置电流大于 $6I_{\text{th}}$ 时,在较大的反馈强度 ($\kappa > -4 \text{ dB}$) 下,可以产生超过 30 GHz 的宽带混沌信号。结果表明,在一定偏置电流条件下,DM-DFB 激光器产生平坦且宽带的混沌激光所需要的反馈强度存在一个优化区间。图 7(b)所示为在外部参数 $I = 8I_{\text{th}}$ 、 $\kappa = -3 \text{ dB}$ 的情况下不同反馈时延对混沌带宽的影响。可以看到,随着反馈时延的变化,混沌信号的带宽稳定在 38 GHz 左右。这表明外腔长度较小时 ($\tau_f = 0.1 \text{ ns}$) 也可以产生宽带的混沌信号。若对于集成波导外腔,其外腔长度仅为 3.95 mm ,比已报道的光子集成光反馈 DFB 激光器厘米量级的外腔长度更短^[27-28],有望实现光子集成宽带混沌光源。

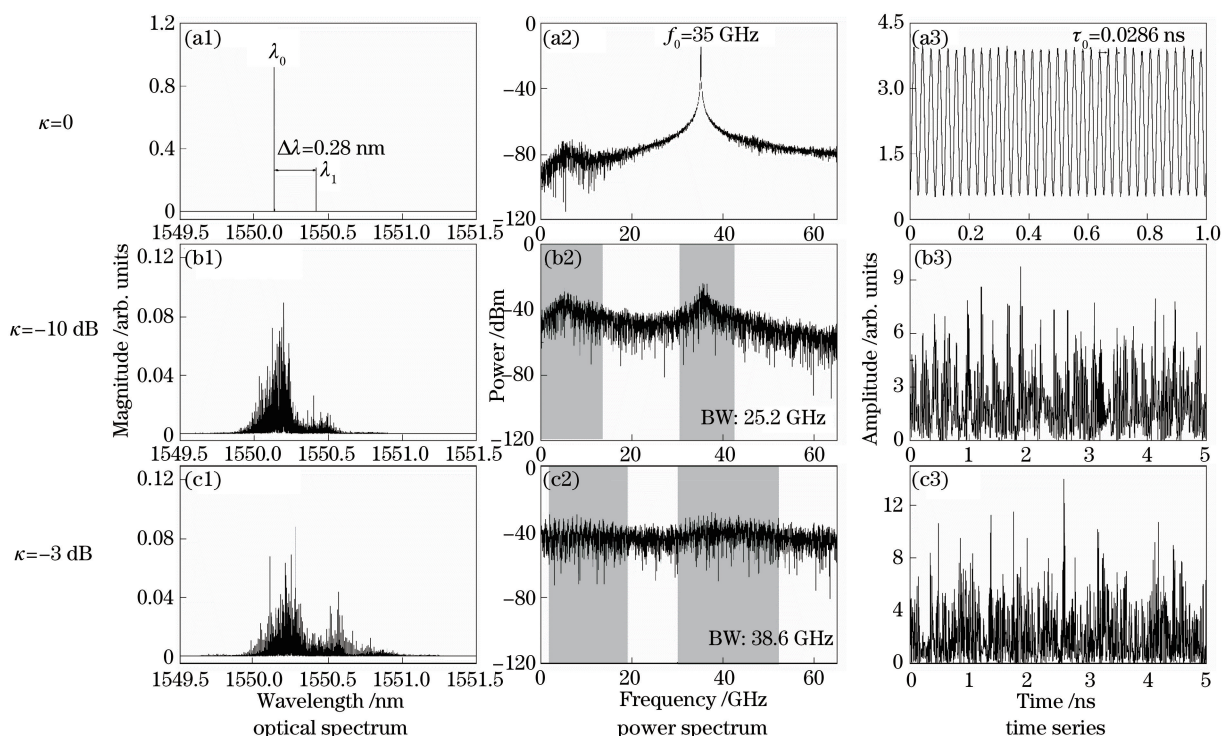


图 6 $I=8I_{th}$ 偏置电流下光反馈 DM-DFB 激光器的 VPI 模拟结果
 Fig. 6 VPI simulation results of optical feedback DM-DFB laser at $I=8I_{th}$

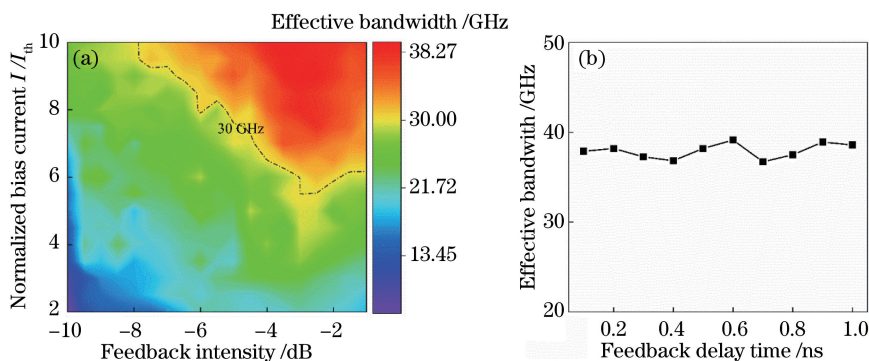


图 7 外部参数对混沌信号带宽的影响。(a) 不同偏置电流以及反馈强度下混沌带宽的分布；
 (b) $I=8I_{th}$, $\kappa=-3$ dB 时反馈时延对混沌带宽的影响

Fig. 7 The influence of external parameters on the bandwidth of chaotic signals. (a) Distribution of chaotic bandwidth as function of bias current and feedback intensity; (b) effects of feedback delay time on chaotic bandwidth when $I=8I_{th}$ and $\kappa=-3$ dB

4 结 论

提出一种光反馈 DM-DFB 半导体激光器产生宽带混沌信号的方法。通过 Lang-Kobayashi 方程理论分析了宽带激光混沌产生的机理和条件。利用 VPI 仿真软件建立光反馈 DM-DFB 激光器的系统。结果表明,当频率间隔为 35 GHz 时,在 $I > 6I_{th}$ 、 $\kappa > -4$ dB 的条件下,可以产生 30 GHz 以上的宽带混沌激光。在仿真过程中发现长度为 3.95 mm 的集成波导外腔也可以产生大带宽的混沌信号,有望

实现光子集成。所提出的带宽大于 30 GHz、可集成的混沌激光源,对高速混沌保密通信以及密钥分发的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Wang L S, Mao X X, Wang A B, et al. Scheme of

- coherent optical chaos communication [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4762-4765.
- [3] Sun W Y, Hu B J, Wang H. Chaos synchronization communication based on dual-path mutual coupling semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 211404.
孙巍阳, 胡宝洁, 王航. 双光互注入半导体激光器混沌同步通信研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 211404.
- [4] Yan S L. Theory and technique of cross transmittance and alternate parallel reception of laser chaos in secure communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906001.
颜森林. 激光混沌交叉发射与交替并行接收在保密通信中应用的基本理论与技术 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906001.
- [5] 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.
- [6] Wang L S, Zhao T, Wang D M, et al. 14-Gb/s physical random numbers generated in real time by using multi-bit quantization of chaotic laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 234205.
王龙生, 赵彤, 王大铭, 等. 利用混沌激光多位量化实时产生 14 Gb/s 的物理随机数 [J]. *物理学报*, 2017, 66(23): 234205.
- [7] 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): 26029-26044.
- [8] Wang L S, Chao M, Wang A B, et al. High-speed physical key distribution based on dispersion-shift-keying chaos synchronization in commonly driven semiconductor lasers without external feedback [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37919-37935.
- [9] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [10] 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.
- [11] Hu Z H, Zhao T, He P X, et al. Improving dynamic range of chaos optical time domain reflectometry using fiber ring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1004006.
胡志宏, 赵彤, 贺培鑫, 等. 基于光纤环的混沌光时域反射仪动态范围增大 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1004006.
- [12] 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.
- [13] Uchida A, Heil T, Liu Y, et al. High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11): 1462-1467.
- [14] Wang A B, Wang Y C, He H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1633-1635.
- [15] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A. Enhancement of chaotic signal bandwidth in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical injection [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(3): 415-419.
- [16] 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.
- [17] Hong Y H, Chen X F, Spencer P S, et al. Enhanced flat broadband optical chaos using low-cost VCSEL and fiber ring resonator [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(3): 1-6.
- [18] 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.
- [19] Zhao A K, Jiang N, Liu S Q, et al. Wideband complex-enhanced chaos generation using a semiconductor laser subject to delay-interfered self-phase-modulated feedback [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12336-12348.
- [20] 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.
- [21] Jiang J P. *Semiconductor laser [M]*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 125-132.
江剑平. *半导体激光器 [M]*. 北京: 电子工业出版社, 2000: 125-132.
- [22] Ryan A T, Agrawal G P, Gray G R, et al. Optical-feedback-induced chaos and its control in multimode semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(3): 668-679.
- [23] Yang Q, Wu Z M, Wu J G, et al. Influence of injection patterns on chaos synchronization performance between a multimode laser diode and a single-mode laser [J]. *Optics Communications*, 2008,

- 281(19): 5025-5030.
- [24] Li P, Cai Q, Zhang J G, et al. Observation of flat chaos generation using an optical feedback multi-mode laser with a band-pass filter [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17859-17867.
- [25] 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.
- [26] VPIphotonics. VPIcomponentMaker Photonic Circuits User's Manual [EB/OL]. [2021-04-20]. <https://www.vpiphotonics.com/Tools/PhotonicCircuits>.
- [27] 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.
- [28] 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.