

半导体环形激光器高偏置电流下的动态特性

薛萍萍 杨玲珍 张建忠 张朝霞

太原理工大学物理与光电工程学院 光电工程研究所, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 数值模拟了高的偏置电流下半导体环形激光器的动态特性, 给出了不同反馈系数、偏置电流以及延迟时间下的混沌分叉图。详细的过程状态表明在不同参数下半导体环形激光器进入混沌的路径不同。结果发现半导体环形激光器在高的电流驱动下产生混沌信号具有高带宽的特点。并研究了不同的参数对混沌带宽的影响, 发现在反馈系数为0.5时, 混沌带宽可以达到18 GHz。

关键词 激光光学; 半导体环形激光器; 混沌; 光反馈; 宽带

中图分类号 TN249

文献表示码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202002

Dynamic Characteristics of Semiconductor Ring Laser with High Bias Current

Xue Pingping Yang Lingzhen Zhang Jianzhong Zhang Zhaoxia

Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The dynamic characteristics of semiconductor ring laser (SRL) with high bias current are numerically investigated, the bifurcation diagrams of different feedback coefficients, bias currents and delay time are displayed. The detailed process states demonstrate that the chaos paths with different parameters are different. The results show that the chaos generated by SRL with high bias current has broad bandwidth characteristic. The influences of parameters on the bandwidth of chaos are also studied. It is found that the widest bandwidth is about 18 GHz when the feedback coefficient is 0.5.

Key words laser optics; semiconductor ring laser; chaos; optical feedback; broadband

OCIS codes 140.1540; 140.3325; 140.3560

1 引言

混沌信号由于它的随机振荡特性在很多领域被应用, 例如安全通信^[1-3]、快速物理随机数的产生^[4-6]、高质量的雷达^[7-9]、光时域反射仪^[10]以及断点检测^[11-13]等方面。近几年基于传统的边发射激光器(TEEL)的混沌信号吸引了很多关注。通过外腔的扰动TEEL可以产生混沌信号, 例如光反馈^[14-16]、光耦合^[17-18]以及光注入^[19-20]。而激光通信的发展越来越要求混沌激光器小型化, 但是由于TEEL在集成方面具有一个致命的缺点, 即无法消除多通道光信号之间的串扰, 近几十年半导体环形激光器(SRL)的出现解决了这一问题。它体积小且具有双稳态的特征, 并且易于与其他的光电器件集成而受到广泛关注^[21-22]。尤其在光存储^[23]、高速的全光信号处理^[24]、全光开关^[25-26]等方面都有着潜在的应用。InGaAsP-InP型的SRL在交叉反馈和注入下可以产生混沌^[27-29]。若将SRL加反馈集成混沌源则可以满足混沌激光器的小型化的发展需求。在高的偏置电流下SRL处于单模运行状态, 本文详细讨论了高的偏置电流下光反馈SRL产生混沌的过程以及它的宽带特征, 给出了不同参

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61205142, 61274089)、山西省基础研究计划(2013011019-6)

作者简介: 薛萍萍(1976—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光混沌以及同步等方面的研究。E-mail: xpp8888@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

数下的混沌分叉图,发现在不同参数下进入混沌的路径不同,列出了详细的过程状态,混沌信号带宽以及参数对带宽的影响也进行了研究。

2 理论模型

SRL中有两个反向传输的模式:顺时针模式(CW)和逆时针模式(CCW),分析这两种模式在环腔谐振中竞争时采用双模式模型^[30],此模型成功地解释了SRL $L-I$ 特性曲线中两个模式交替振荡行为。在单模情况下环腔内部的电场可以表示为

$$E(x,t) = E_1(t)\exp[-i(\omega_{01}t - \mathbf{k}_1x)] + E_2(t)\exp[-i(\omega_{02}t + \mathbf{k}_2x)], \quad (1)$$

式中 E_1 和 E_2 表示顺时针和逆时针传输模式的电场,模式1代表CW方向传输的信号,模式2代表CCW方向传输的信号; x 是沿着环周长方向的纵向空间坐标(假设CW方向为正向); k_1, k_2 是波矢, SRL是单纵模输出, ω_{01}, ω_{02} 是激光纵模的光频,由于这两个模式频率差别很小,所以在模拟中忽略^[29]。带有光反馈项的SRL双模式模型的速率方程为

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(1 - i\alpha) \left[\Gamma \nu_g g_n (N - N_0) \times (1 - \varepsilon_s |E_1|^2 - \varepsilon_c |E_2|^2) - \frac{1}{\tau_p} \right] E_1 + i(\omega_{01} - \omega_{th})E_1 + \frac{k_f}{\tau_{in}} E_1(t - \tau) \exp(-i\omega_{01}\tau), \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(1 - i\alpha) \left[\Gamma \nu_g g_n (N - N_0) \times (1 - \varepsilon_s |E_2|^2 - \varepsilon_c |E_1|^2) - \frac{1}{\tau_p} \right] E_2 + i(\omega_{02} - \omega_{th})E_2, \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{eV} - \frac{N}{\tau_s} - \nu_g g_n (N - N_0) \times [(1 - \varepsilon_s |E_1|^2 - \varepsilon_c |E_2|^2) |E_1|^2 + (1 - \varepsilon_s |E_2|^2 - \varepsilon_c |E_1|^2) |E_2|^2], \quad (4)$$

式中 α 线宽增强因子; Γ 限制因子; ν_g 群速度; g_n 微分增益系数; N_0 透明载流子密度; ε_s 和 ε_c 自增益饱和系数和交叉增益饱和系数; τ_p 表示环腔中两个模式的光子寿命; τ_s 载流子寿命; ω_{th} 阈值谐振频率; k_f 反馈系数; τ_{in} 光信号绕环一周的时间; τ 反馈信号的延迟时间; N 有源区的载流子密度; I 偏置电流; η_i 电流注入系数; e 基本电荷; V 量子井有源区的体积。图1表示SRL光反馈的装置示意图。它包括一个环形激光腔和通过方向耦合器与之耦合的两个输出直波导。方向耦合器将SRL中的部分信号光通过耦合器输出到直波导, CW模式的光信号经过耦合器输出并且反馈回SRL中的CW模式中。(2)式和(3)式中没有加线性耦合和自发辐射噪声,因为在高偏置电流时这两个因素相对于非线性因素来讲影响较小^[31],所以在模拟中忽略了这两项。模拟中使用的参数如表1所示。

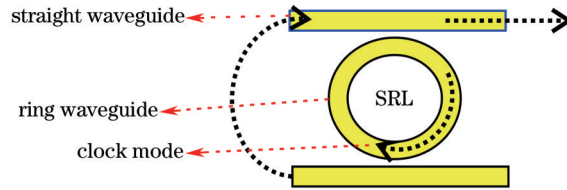


图1 光反馈SRL的示意图

Fig.1 Schematic diagram of SRL with optical feedback

表1 模拟中使用的参数

Table 1 Parameters in simulation

Parameter	Value
SRL radius $R / \mu\text{m}$	100
Differential gain g_n	1.17×10^{-19}
Group velocity $\nu_g / (\text{m/s})$	8.57×10^7
Line-width enhancement factor α	4
Carrier density at transparency N_0 / m^{-3}	7.6×10^{23}
Threshold current I_{th} / mA	21.5
Injection efficiency η_i	0.5
Self-saturation coefficient ε_s / m	3.16×10^{-23}

Parameter	Value
Cross-gain coefficient ε_c /m	6.32×10^{-23}
Photon lifetime τ_p /s	5.17×10^{-12}
Carrier lifetime τ_s /s	3.15×10^{-9}
Optical round-trip time in the ring τ_{in} /s	7.33×10^{-12}
Quantum well active region volume V /m ³	2.58×10^{-16}
Optical confinement factor Γ	0.226
Wavelength of SRL λ /nm	1550

3 模拟结果

3.1 混沌分叉图

为了研究在高电流驱动下 SRL 的动态特性, 本文用四阶龙格库塔法数值积分方程模型, 详细模拟了随着反馈系数、偏置电流以及延迟时间变化的混沌分叉图(见图 2), 模拟中电流取 4 倍阈值以上。从图中可以看出在参数变化过程中, SRL 进入混沌的过程是不一样的。混沌分叉图的纵轴是时间序列中的峰值, 从图上来看在不同的参数条件下, SRL 的动态特性不同, 表现出了很丰富的动态行为。图 2(a)显示了随着反馈系数 k_f 的变化的混沌路径。S 表示稳态 P 表示周期态, DP 表示倍周期, 从图中可以看出 SRL 开始处于激光器发射的 S 态, 然后随着反馈系数的增加过渡到 P 态, P 态图中显示很多数值点分布在一小片像三角形的区域中, 这是因为周期信号的强度不是很稳定, 有一些小的起伏。经过这个过程 SRL 又进入 DP 态最终进入混沌状态。当反馈系数继续增加到 0.175 时 SRL 再次进入周期状态然后又进入混沌态。在 SRL 结构中允许双向传输的信号同时存在, 高电流偏置时由于 SRL 处于单向传输, 所以此时受到环形激光器环长的调制, 输出信号呈现周期信号。而当反馈系数逐渐增加时, 外部的信号扰动与环内的信号不断进行拍频, 由于每次拍频的周期不同, 周期信号的成分逐渐减弱导致混沌信号的产生。图 2(b)中随偏置电流的增加, SRL 输出呈现间歇混沌的状态。偏置电流的变化决定着环内信号的强度, 虽然在高的电流下主要呈现单模传输, 但是反向模式仍然存在, 随着强度的不断变化两种模式之间的相互作用是不稳定的, 因此出现了间歇混沌输出。图 2(c)的分叉图是从周期态直接进入混沌态。此时由于反馈系数为 0.3, 相对于延迟时间来讲反馈系数仍然是产生混沌的一个很重要的因素。在此反馈强度下反馈延迟很小时反馈信号与环内信号之间的相位差不是很大, 因此在小的范围内对于 SRL 输出的信号影响不是很大, 仍然是周期性的信号。随着延迟时间的增加, 这种差异逐渐变大最终扰动生成混沌信号。从上面的结果可以看出 SRL 具有非常复杂的动态特征。

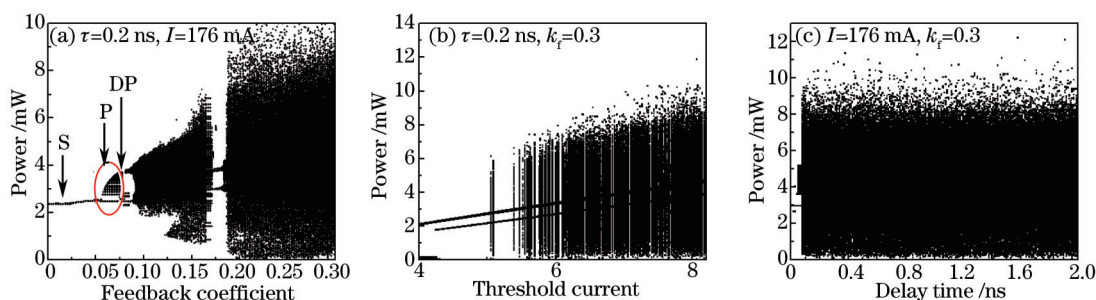


图 2 高的电流驱动下 SRL 输出信号随(a)反馈系数、(b)偏置电流、(c)延迟时间的分叉图

Fig.2 Bifurcation diagrams of SRL's output signals with (a) feedback coefficient, (b) bias current (c) and delay time

3.2 混沌路径

为了更好地解释 SRL 的动态过程, 图 3~5 分别给出了具体的过程状态。图 3(a1)显示当反馈系数为 0.07 时, 时序中有明显的单周期信号; 图 3(b1)和图 3(c1)也反映了这个状态特征; 反馈系数 0.08 时周期信号过渡到倍周期如图 3(a2)所示, 从图 3(c2)可以看出相图出现双环; 而当反馈系数增加到 0.09 时, SRL 输出信号接近混沌状态, 如图 3(a3)所示, 可以看出随机振荡已经明显出现, 而频谱也突然功率增加, 在频谱中依然可以看到

周期信号的频率;从图3(a4)、(b4)、(c4)可以盾出,反馈系数增致0.11时SRL已经完全进入混沌状态,图3(b4)频谱图显示几乎看不到之前的周期信号的频率成分,频谱上尖峰是由于弛豫振荡以及环的周期性共同产生的。从图3可以看出SRL进入混沌的过程不同于一般情况下的3种类型(倍周期分叉、准周期、间歇混沌),是一种复杂的混沌路径。进一步研究了SRL输出随着偏置电流的变化的动态过程,结果显示此过程为间歇混沌过程,图4给出了详细的过程状态。从左到右随着偏置电流的增加,输出信号周期、混沌状态交替出现,这是非常典型的间歇混沌过程。另外延迟时间的变化对反馈的SRL的信号输出的影响呈现在图5中,当反馈延迟时间小于0.08 ns时,SRL处于周期状态,而反馈延迟时间大于0.08 ns时,SRL进入混沌状态。图5(a1)中的时序幅度很低,经过放大(右上方)可以看到明显的周期性,频谱和相图也是经过放大后的结果。这是准周期混沌路径。

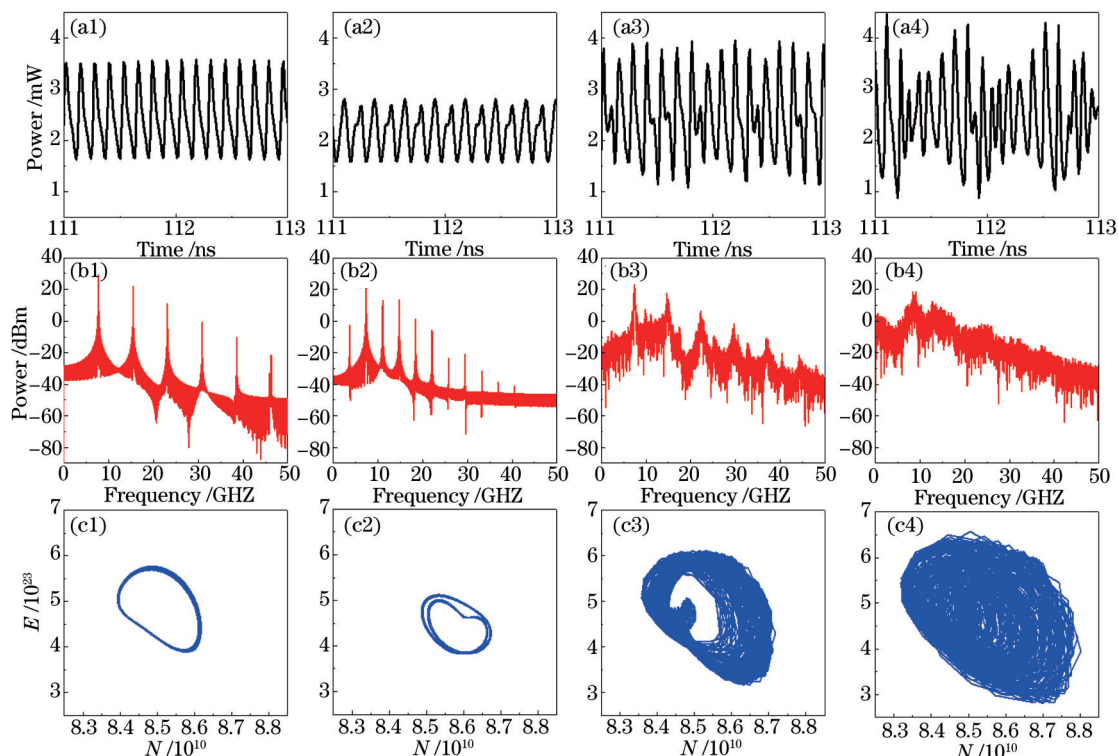


图3 随着反馈系数的变化SRL输出信号进入混沌的过程。(a) 时序;(b) 频谱;(c) 相图。(a1)~(c1) $k_f=0.07$; (a2)~(c2) $k_f=0.08$; (a3)~(c3) $k_f=0.09$; (a4)~(c4) $k_f=0.11$

Fig.3 Detailed process of SRL's output signals into chaos with the change of feedback coefficient. (a) Time series; (b) power spectra; (c) phase diagrams. (a1)~(c1) $k_f=0.07$; (a2)~(c2) $k_f=0.08$; (a3)~(c3) $k_f=0.09$; (a4)~(c4) $k_f=0.11$

3.2 混沌信号带宽

宽带的混沌信号在通信中非常重要,能够产生带宽较宽的混沌信号对于高速网络通信将有着深远的意义。SRL在高的偏置电流下可以产生宽带的混沌信号。本文对不同参数对于SRL产生的混沌信号带宽的影响作了研究。图6给出了不同参数下信号带宽的变化,从图中可以看出带宽随驱动电流和延迟时间的变化的幅度并不是很大,而反馈系数对带宽的影响比较大。图6(a)中当驱动电流从103 mA增加到180 mA时带宽仅从16.9 GHz增加到18 GHz,变化了1.1 GHz。图6(b)中反馈系数从0.1增加到0.6时带宽变化超过4 GHz。图6(c)中带宽随着延迟时间从0.1 ns增加到1 ns带宽最大改变1 GHz。SRL产生混沌的原因主要是因为外部的反馈扰动,这一点与半导体激光器相似,但是SRL又有其特殊的结构特征,它的环内可以产生双向模式,虽然在高电流的情况下其中一种模式被抑制,但是不排除微弱的反向模式和原来的信号的相互作用。对于这种复杂的SRL产生的机制现在还没有非常准确的解释。因此详细地给出它的理论解释还需要进一步的研究。

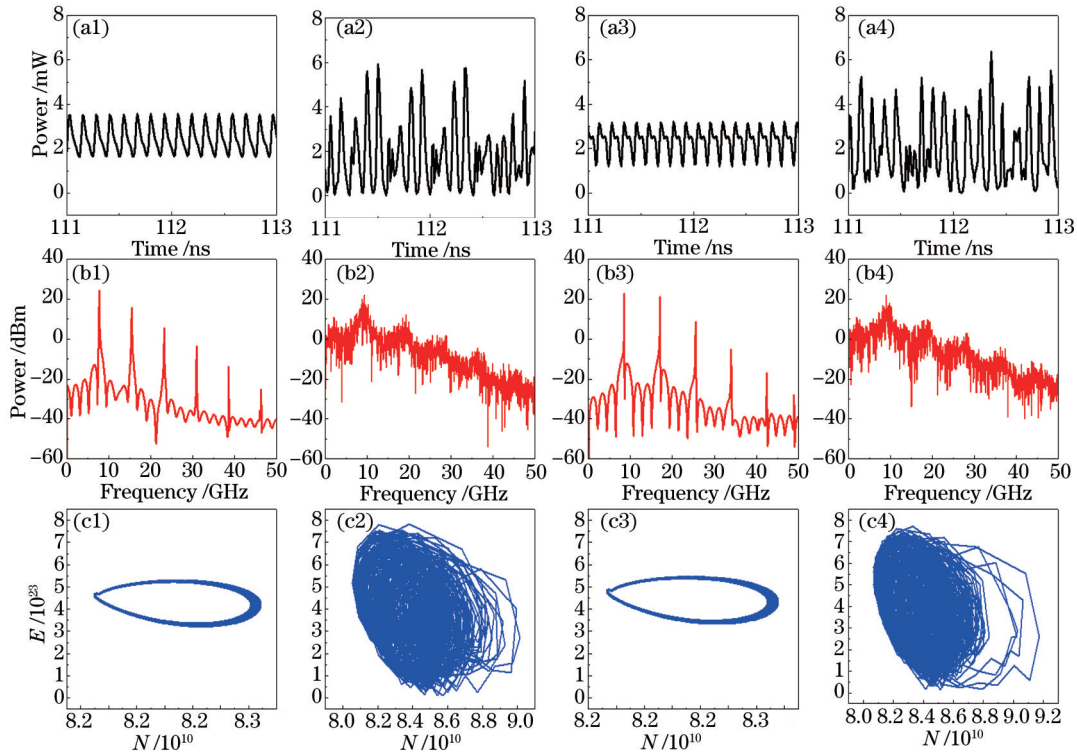


图4 偏置电流变化时的间歇混沌过程。(a) 时序; (b) 频谱; (c) 相图。(a1)~(c1) $I=116$ mA; (a2)~(c2) $I=121$ mA; (a3)~(c3) $I=123$ mA; (a4)~(c4) $I=125$ mA

Fig.4 Detailed process of intermittent chaos with the change of bias current. (a) Time series; (b) power spectra; (c) phase diagrams. (a1)~(c1) $I=116$ mA; (a2)~(c2) $I=121$ mA; (a3)~(c3) $I=123$ mA; (a4)~(c4) $I=125$ mA

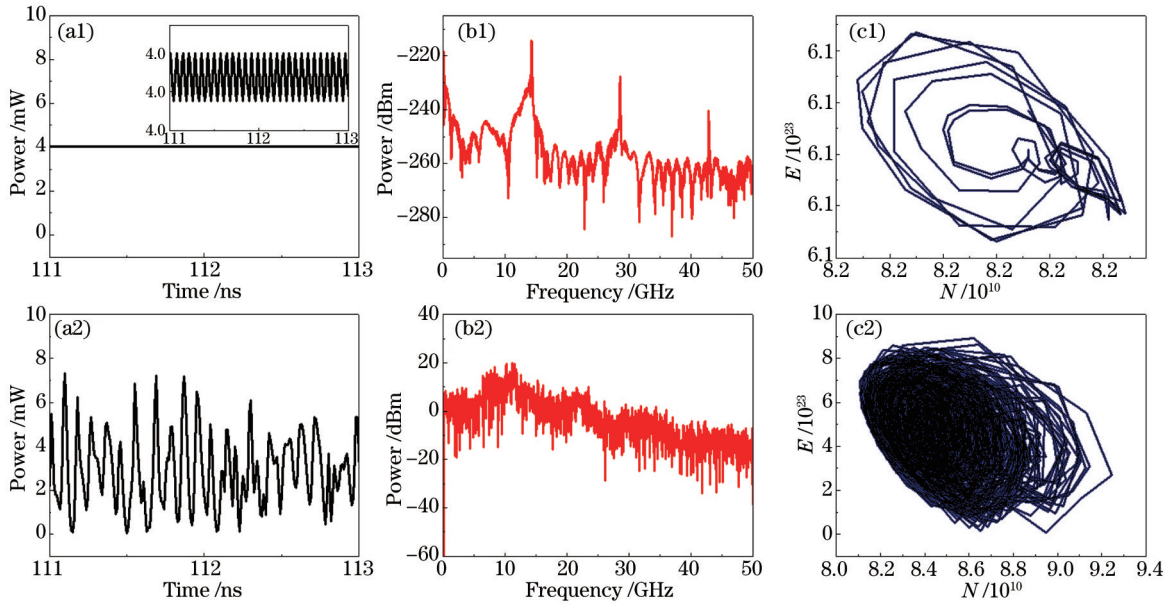


图5 延迟时间变化时的状态变化。(a) 时序; (b) 频谱; (c) 相图。(a1)~(c1) $\tau=0.06$ ns; (a2)~(c2) $I=0.08$ ns

Fig.5 State change with delay times. (a) Time series; (b) power spectra; (c) phase diagrams. (a1)~(c1) $\tau=0.06$ ns; (a2)~(c2) $I=0.08$ ns

另外,为了进一步确定混沌信号的带宽,模拟中选取了不同大小的采样率,分别为100、200、300 GHz得到了更广范围的频谱($k=0.3, I=176$ mA, $\tau=0.2$ ns),并进行了计算。图7显示了不同采样率下的频谱图。结果发现采样率的不同对于带宽的计算结果基本上没有影响。计算方法是总功率的80%的频谱带宽。计算结果发现,3种采样率下的带宽基本上都在15 GHz左右,这要比其他文献中^[27-28]报导的在反馈时产生的混沌信号带宽宽。

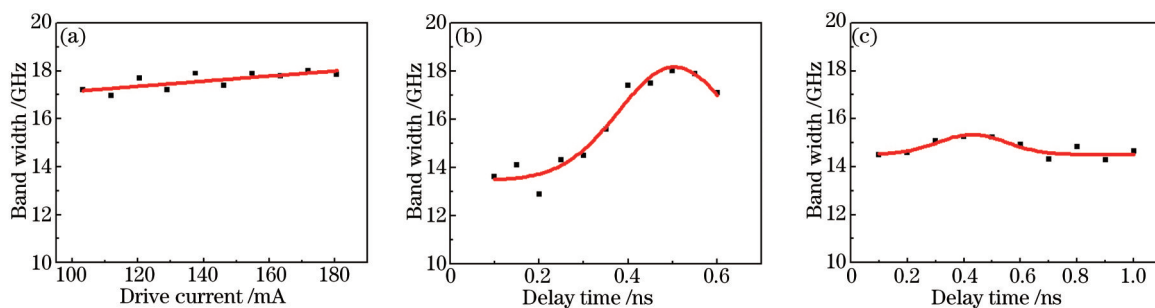


图 6 SRL 混沌带宽的变化。(a) $k_i=0.5$, $\tau=0.2$ ns; (b) $I=176$ mA, $\tau=0.2$ ns; (c) $I=176$ mA, $k_i=0.5$

Fig.6 Change of SRL chaos' bandwidth. (a) $k_i=0.5$, $\tau=0.2$ ns; (b) $I=176$ mA, $\tau=0.2$ ns; (c) $I=176$ mA, $k_i=0.5$

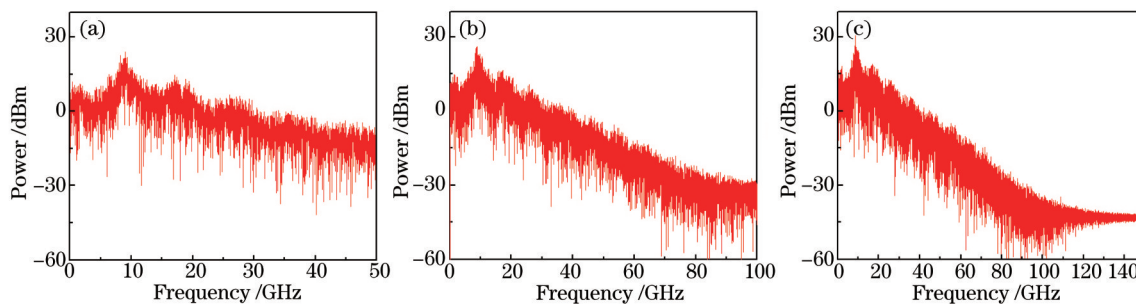


图 7 不同采样率下的频谱带宽。(a) 15.4 GHz; (b) 14.4 GHz; (c) 14.8 GHz

Fig.7 Power spectrum bandwidths with different sampling frequencies. (a) 15.4 GHz; (b) 14.4 GHz; (c) 14.8 GHz

4 结果和讨论

分析了基于光反馈的 SRL 在高偏置电流下产生混沌的过程。结果表明在合适的参数下带反馈的 SRL 可以产生混沌信号。给出了详细的混沌分叉图、具体的过程状态。从模拟结果来看 3 种不同的参数下 SRL 进入混沌的路径分别是复杂路径、间歇混沌路径、周期路径。对于高偏置电流下的混沌信号的带宽也做了较为详细的分析。结果表明,在反馈系数为 0.5 时产生的混沌信号的带宽最宽可达 18 GHz。反馈系数、延迟时间、偏置电流对混沌信号带宽的影响作了仔细研究,结果发现反馈系数是影响带宽的最大因素。此项研究对 SRL 将来作为新的混沌源的应用有着深刻的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Argyris, D Syvridis, L Pesquera, *et al.*. Chaos based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438: 343-346.
- 2 Ning Jiang, Wei Pan, Bin Luo, *et al.*. Bidirectional dual-channel communication based on polarization-division-Multiplexed chaos synchronization in mutually coupled VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1094-1096.
- 3 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.
- 4 A Uchida, K Amano, M Inoue, *et al.*. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- 5 Reidler, Y Aviad, M Rosenbluh, *et al.*. Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. Phys Rev Lett, 2009, 103(2): 024102-024105.
- 6 Anbang Wang, Pu Li, Jianguo Zhang, *et al.*. 4.5 Gbps high-speed real-time physical random bit generator[J]. Opt Express, 2013, 21(17): 20452-20462.
- 7 F Y Lin, J M Liu. Diverse waveform generation using semiconductor lasers for radar and microwave applications[J]. IEEE J Quantum Electronics, 2004, 40(6): 682-689.
- 8 F Y Lin, J M Liu. Chaotic lidar[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electronics, 2004, 10(5): 991-997.
- 9 Wang Bingjie, Qian Jianjun, Zhao Tong, *et al.*. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. Chinese J Laers, 2011, 38(5): 0514002.

- 王冰洁, 钱建军, 赵 彤, 等. 混沌激光雷达的抗干扰性能分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514002.
- 10 Y C Wang, B J Wang, A B Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2008, 20(19): 1636-1638.
- 11 Yang Congyuan, Wang Anbang, Zhang Zhaoxia, *et al.*. Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0208002.
杨丛渊, 王安帮, 张朝霞, 等. 混沌激光相关法光纤断点定位仪及其应用的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208002.
- 12 Kan Jie, Wang Anbang, Xu Hang, *et al.*. Differential mode delay measurement for multimode fibers using random signal correlation technique[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0705001.
阚 杰, 王安帮, 徐 航, 等. 随机信号相关法测量多模光纤差分模延迟[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0705001.
- 13 Han Guohua, Wang Yuncai. Faults location for transmission lines by using chaotic laser signal[J]. Chinese J Laers, 2010, 37(8): 2020-2024.
韩国华, 王云才. 基于混沌激光的传输线断点测量[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2020-2024.
- 14 J Mork, B Tromborg, J Mark. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: Theory and experiment[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1992, 28(1): 93-108.
- 15 S Y Xiang, W Pan, L Yan, *et al.*. Influence of polarization mode competition on chaotic unpredictability of vertical-cavity surface-emitting lasers with polarization-rotated optical feedback[J]. Opt Lett, 2011, 36(3): 310-312.
- 16 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu, *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generation utilizing external feedback laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405002.
张明江, 刘铁根, 郑建宇, 等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405002.
- 17 Y H Hong, M W Lee, P S Spencer, *et al.*. Synchronization of chaos in unidirectionally coupled vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. Opt Lett, 2004, 29(11): 1215-1217.
- 18 J G Wu, Z M Wu, G Q Xia, *et al.*. Evolution of time delay signature of chaos generated in a mutually delay-coupled semiconductor lasers system[J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1741-1753.
- 19 T B Simpson, J M Liu, A Gavrielides, *et al.*. Period-doubling cascades and chaos in a semiconductor laser with optical injection[J]. Phys Rev A, 1995, 51(5): 4181-4185.
- 20 A D Mengue, B Z Essimbi. Complex chaos and bifurcations of semiconductor lasers subjected to optical injection[J]. Optical and Quantum Electronics, 2011, 42(6-7): 389-407.
- 21 Yongzhen Huang, Jiandong Lin, Qifeng Yao, *et al.*. AlGaInAs/InP coupled-circular microlasers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(9): 091404.
- 22 Xie Sheng, Guo Weilian, Mao Luhong, *et al.*. Research and progress of InP-based ring waveguide laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(6): 761-766.
谢 生, 郭维廉, 毛陆虹, 等. InP基环形波导激光器的研究与进展[J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 761-766.
- 23 L Liu, R Kumar, K Huybrechts, *et al.*. An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip[J]. Nature Photonics, 2010, 4(3): 182-187.
- 24 Mezosi. Semiconductor Ring Lasers for All-Optical Signal Processing[D]. Gabor: University of Glasgow, 2011.
- 25 Alessandro Scirk, Antonio Perez, Toni Perez, *et al.*. Bistability and all-optical switching in semiconductor ring lasers, transparent optical networks[C]. ICTON '07:9th International Conference, 2007, 2: 21-24.
- 26 K Thakulsukanant, B Li, I Memon, *et al.*. All-optical label swapping using bistable semiconductor ring laser in an optical switching node[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(15): 631-638.
- 27 Ilya V Ermakov, Sifeu T Kingni, Vasile Z Tronciu, *et al.*. Chaotic semiconductor ring lasers subject to optical feedback: Applications to chaos-based communications[J]. Opt Commun, 2013, 286(1): 265-272.
- 28 Nianqiang Li, Wei Pan, Shuiying Xiang, *et al.*. Hybrid chaos-based communication system consisting of three chaotic semiconductor ring lasers[J]. Appl Opt, 2013, 52(7): 1523-1530.
- 29 Zhang Xin, Yuan Guohui, Wang Zhuoran. Generation of chaos in semiconductor ring laser with optical injection[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1732-1736.
张 鑫, 袁国慧, 王卓然. 用半导体环形激光器产生混沌信号[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1732-1736.
- 30 M Sorel, G Giuliani, A Scire, *et al.*. Operating regimes of GaAs-AlGaAs semiconductor ring lasers: Experiment and model[J]. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(10): 1187-1195.
- 31 Guohui Yuan, Zhuoran Wang, Bei Li, *et al.*. Theoretical and experimental studies on bistability in semiconductor ring lasers with two optical injections[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electronics, 2008, 14(3): 903-910.

栏目编辑: 张 雁