

相位共轭光反馈下半导体环形激光器的动力学

张定梅*, 蒋再富

荆楚理工学院数理学院, 湖北 荆门 448000

摘要 利用双模行波模型, 数值研究了半导体环形激光器(SRL)在相位共轭交叉光反馈下的非线性动力学特性。研究发现, 当两个模式的相位变化不同步时, SRL 表现出低频反相振荡, 其振荡周期随着反馈时间的增大逐渐增加。而对于相位变化同步的情况, 通过改变注入强度, SRL 可输出单周期态、多周期态和混沌态。利用自相关函数识别了产生的混沌信号的时延特征(TDS)并利用功率谱技术计算了相应的带宽, 发现 TDS 随着反馈强度的增加先逐渐减小再增大, 而带宽随着反馈强度的增加呈近似线性增加。这说明通过恰当调节反馈强度, 混沌信号的 TDS 可以被较好地抑制, 该信号可应用于安全保密通信和随机数产生中。

关键词 非线性光学; 半导体环形激光器; 相位共轭; 混沌; 时延特征

中图分类号 O437.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1919001

Dynamics of Semiconductor Ring Laser Subject to Phase Conjugate Optical Feedback

Zhang Dingmei*, Jiang Zaifu

School of Mathematics and Physics, Jingchu University of Technology, Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract Based on the two-mode traveling wave model, the nonlinear dynamics of a semiconductor ring laser (SRL) subject to phase conjugate cross optical feedback is numerically studied. It is found that the SRL shows low frequency anti-phase oscillation when the phase changes of these two modes are desynchronized, and the oscillation period increases with the increase of feedback time. In contrast, in the case that the phase changes are synchronized, the two-mode output of the SRL can be one-periodic, multiply-periodic and chaotic by changing injection intensity. In addition, the time-delay signature (TDS) of the generated chaotic signal is identified by the autocorrelation function (ACF), and the corresponding bandwidth is calculated by using the power spectrum. It is found that the TDS first decreases and then increases with the increase of feedback strength, however the bandwidth increases approximately linearly, which indicates that by properly adjusting the feedback strength, the TDS of chaotic signals can be well suppressed and these signals can be used for secure communications and random number generation.

Key words nonlinear optics; semiconductor ring laser; phase conjugate; chaos; time-delay signature

OCIS codes 190.1450; 190.3100; 190.5040

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2020-12-20; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目 (B2020194, B2020197)

通信作者: *13469761852@163.com

1 引言

外部光反馈下的半导体激光器(SL)系统能够产生自脉冲、单周期、倍周期、间歇性振荡和混沌等丰富的非线性动力学行为,这些动力学行为可应用于光子微波信号产生及处理、混沌保密通信、人工光子神经网络、传感器及随机数产生等领域^[1-8]。其中,关于相位共轭光反馈下的SL的动力学研究一直是理论和实验研究的热点^[9-19]。相位共轭光反馈与普通光反馈的区别是将普通的平面反射镜替代为相位共轭镜,使反馈回激光器中的电场复振幅共轭并且相位发生相应移动^[12]。目前,关于SL在相位共轭光反馈下的非线性动力学研究已有大量报道。例如, Mercier等^[9]从理论和实验上研究了SL在相位共轭光反馈下的动力学演化路径,当反馈速率逐渐增加时,先后观察到了稳态、无阻尼弛豫振荡、准周期振荡、混沌和振荡频率高达外腔频率13倍的谐波振荡。Sattar等^[12]理论分析了相位共轭反馈下的纳米SL的动力学响应,发现在同等条件下产生混沌信号时,相位共轭光反馈比传统的镜像反馈需要更高的反馈速率,但是前者比后者的噪声更低。Jiang等^[13]系统地研究了SL在闭环外腔相位共轭光反馈下的混沌同步和通信特性。研究表明,相对于传统的光反馈情况,相位共轭光反馈系统的混沌同步质量更高,混沌通信的性能更好。Bouchez等^[15]从实验和理论上分析了SL在相位共轭反馈作用下产生的混沌动力学行为。其中,相位共轭是基于BaTiO₃光折变晶体中的四波混频得到的。他们实验发现,混沌带宽首先随反馈强度的增加呈线性增加,直至饱和值(18 GHz左右),此值约为自由运行SL的弛豫振荡频率的5倍。数值模拟结果证实了他们的实验观察结果,并揭示出晶体的有限穿透深度是导致带宽饱和的原因。此外,相关研究还表明,SL在相位共轭反馈下还会展示出低频波动和自脉冲动力学行为^[15]。

半导体环形激光器(SRL)是一种含有环形波导谐振腔的激光器,它的腔内能够产生两个相向的传播模式,即顺时针(CW)和逆时针(CCW)模式。由于SRL的特殊结构,它成为光子集成电路的理想光源^[16]。此外,在外部扰动的作用下,它也展示出许多有趣的非线性动力学行为^[20-27]。例如,在双向交叉光反馈的作用下,SRL的两个模式能够出现交替开关的行为^[20],并且通过增加SRL的线宽增强因子,能够获得低时延特征的混沌信号^[21]。在单向反向反馈或者交叉互反馈下会出现SRL的一个模式或两个模式的方波振荡^[22-23]。另外,通过将光反馈下SRL产生的混沌信号注入到另一个SRL中,能够产生大带宽、低时间延迟特征的混沌信号,此信号可应用于随机数产生中^[24]。此外,在外部光脉冲注入下,SRL能够产生全光开关行为和双稳现象^[25]。虽然关于SRL在外部光注入和光反馈下的非线性动力学已有较多研究,并取得了较为丰硕的成果,然而,关于相位共轭光反馈下SRL的研究却鲜有报道。本文利用双模SRL的行波模型研究了SRL在外部相位共轭光反馈下的非线性动力学行为,通过时间序列、光谱以及吸引子图,判断了几种典型参数下的动力学类型,并且详细讨论了产生混沌信号的时间延迟特征和带宽。

2 理论模型描述

图1展示了SRL在外部相位共轭交叉光反馈下的示意图。SRL有两个输出模式(CW模式和CCW模式),其中CW(CCW)方向的输出光经相位共轭镜(PCM)后反馈回腔内CCW(CW)方向,此结构为交叉光反馈结构。本文采用双模行波模型来描述SRL的动力学行为,该模型成功解释了实验中所观测到的双模同时辐射、单模辐射和两个模式竞争等物理现象^[28]。模型考虑了反向散射的保守和耗散耦合,并加入了自饱和与互饱和因子。考虑相位共轭反馈项后,描述SRL的动力学的速率方程^[20,28]为

$$E(x, t) = E_1(t) \exp[-i(\Omega t - Kx)] + E_2(t) \exp[-i(\Omega t + Kx)], \quad (1)$$

$$\frac{dE_1}{dt} = K(1 + i\alpha)(g_1 N - 1)E_1 - (k_d + ik_c)E_2 \exp(i\phi) + k_2 E_2^*(t - T_2) \exp(i\Phi_2), \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = K(1 + i\alpha)(g_2 N - 1)E_2 - (k_d + ik_c)E_1 \exp(i\phi) + k_1 E_1^*(t - T_1) \exp(i\Phi_1), \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = \gamma \left(\mu - N - g_1 N |E_1|^2 - g_2 N |E_2|^2 \right), \quad (4)$$

$$g_1 = 1 - s |E_1|^2 + c |E_2|^2, \quad (5)$$

$$g_2 = 1 - s |E_2|^2 + c |E_1|^2, \quad (6)$$

式中： E 表示腔内传播的复电场； E_1 和 E_2 分别表示CW和CCW模式的电场； x 表示腔内坐标； Ω 表示光的角频率； $K=2\pi/\lambda$ 表示波矢大小，其中 λ 表示光波波长； N 表示载流子数； g_1 和 g_2 分别表示两个模式的增益； $k_1E^*(t-\tau_1)$ 和 $k_2E^*(t-\tau_2)$ 表示两个模式的共轭反馈项，其中 k_1 和 k_2 表示反馈速率； T_1 和 T_2 表示反馈时间； Φ_1 和 Φ_2 表示共轭镜引起的电场相位的变化^[14]。由于参数较多，本文考虑 $T_1=T_2=T$ 和 $k_1=k_2=k$ 的情况。其他的器件参数及取值如表1所示。

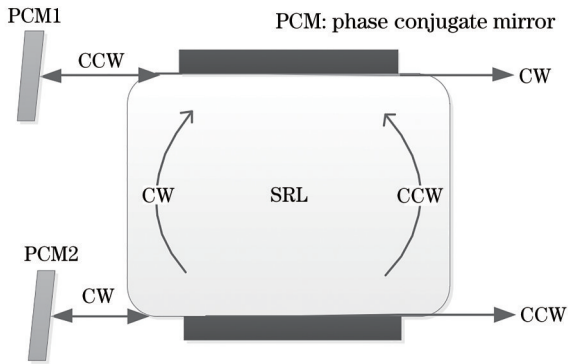


图1 SRL在相位共轭交叉光反馈下的示意图

Fig. 1 Scheme diagram of SRL subject to phase conjugate optical feedback

表1 SRL的物理参数及取值

Table 1 Physical parameters and values related to SRL

Symbol	Parameter	Value
μ	Renormalized bias current	2.4
s	Self-saturation coefficient	5×10^{-3}
c	Cross-saturation coefficient	0.01
k	Field decay rate /ns ⁻¹	100
γ	Carrier inversion decay rate /ns ⁻¹	0.2
ϕ	Coupling phase	0
k_d	Dissipative coupling rate /ns ⁻¹	0.033
k_c	Conservative coupling rate /ns ⁻¹	0.44
α	Linewidth enhancement factor	3.5

为了量化混沌信号的时间延迟特征，本文引入了自相关函数：

$$C(\Delta t) = \frac{\langle (P(t+\Delta t) - \langle P(t) \rangle)(P(t) - \langle P(t) \rangle) \rangle}{\left(\langle (P(t+\Delta t) - \langle P(t) \rangle)^2 \rangle \langle (P(t) - \langle P(t) \rangle)^2 \rangle \right)^{1/2}}, \quad (7)$$

式中： $P(t)$ 和 $P(t+\Delta t)$ 为混沌时间序列在 t 和 $t+\Delta t$ 时刻的强度值； $\langle \cdot \rangle$ 为取平均。

3 结果与讨论

首先研究了双路相位共轭交叉光反馈下相位变化不同步的情况，图2给出了 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.5\pi$ 和 $k = 0.8 \text{ ns}^{-1}$ 下反馈时间取不同值时SRL输出的时间序列。当注入电流为2.4时，自由运行下SRL的弛豫振荡时间为 $\tau_{RO} \approx 2\pi/\sqrt{2(\mu-1)\gamma k} = 0.84 \text{ ns}$ 。当反馈时间 $T = 5 \text{ ns}$ 时，如图2(a)所示，CW模和CCW模的输出强度呈现出低频反相振荡，振荡周期近似为19 ns，频率为52.6 MHz。图2(a)中的插图给出了850~880 ns区间的放大图，可以看出，两个模式出现了与光学开关类似的交替振荡行为。同时，除了频率为52.6 MHz的慢速振荡，当两个模式中的一个模式成为主振模式后，该模式还将进行一段快速的振荡，振荡周期与SRL的弛豫振荡周期相同，这是系统在外部扰动下的弛豫振荡引起

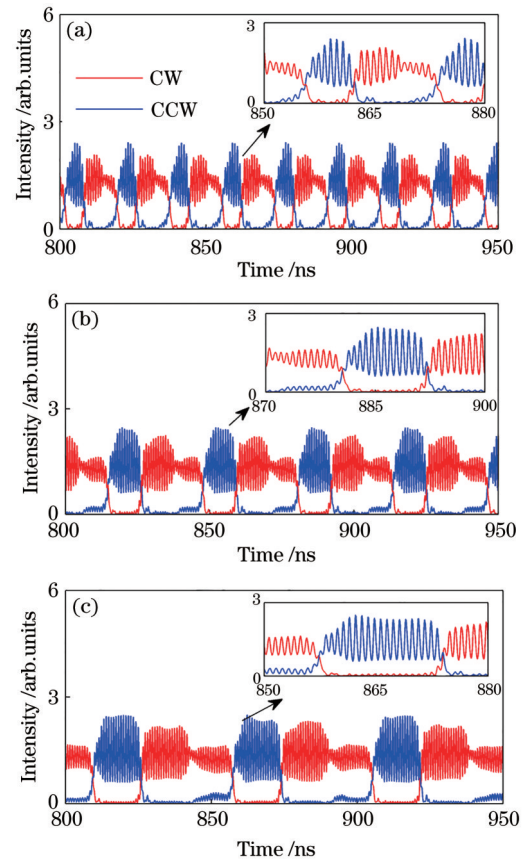


图2 当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.5\pi$ ， $k = 0.8 \text{ ns}^{-1}$ 时不同 T 下顺时针和逆时针模式的时间序列。(a) $T = 5 \text{ ns}$ ；(b) $T = 10 \text{ ns}$ ；(c) $T = 15 \text{ ns}$

Fig. 2 Time series of CW and CCW modes for different T when $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.5\pi$ and $k = 0.8 \text{ ns}^{-1}$. (a) $T = 5 \text{ ns}$ ；(b) $T = 10 \text{ ns}$ ；(c) $T = 15 \text{ ns}$

的。在传统光学反馈情况下,低频振荡已被认为是确定性的高维混沌,它是混沌演化过程中稳定的固定点吸引子被破坏造成的^[16]。类似的低频振荡现象在普通的SL相位共轭反馈下也被观察到了^[14,16]。但是,与传统的单模SL不同的是,SRL具有两个反向的传播模式,这两个模式的振荡的方式是反相的。这与量子点SL在外部光注入下出现的双模振荡相类似,这种振荡行为在光子神经元通信上具有潜在的应用,目前已经成为了研究的热点^[29]。当 $T=10$ ns时,如图2(b)所示,随着反馈时间变长,低频振荡的周期增加到了33.5 ns,相应频率减小到29.9 MHz。但是对于快速振荡的部分,振荡周期还是与弛豫振荡周期相同。当 $T=15$ ns时,低频反相振荡周期进一步增加,达到了48.1 ns(频率为20.8 MHz),而快速振荡部分还是与弛豫振荡频率相同。低频反相振荡周期随着反馈延时 T 的增加而增加,这是因为随着 T 的增加,反馈引起的自我复制时间变长。这说明在两个模式相位变化不相同的情况下,通过改变反馈延迟时间,可以调

节低频反相振荡的周期,但是与弛豫振荡频率相关的振荡周期却始终保持不变。

研究了双路相位共轭光反馈下相位变化同步的情况,由于对称光反馈下CW模式和CCW模式的输出相同,图3只给出了 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0, T = 5$ ns时SRL输出CW模式的时间序列、光谱和相图。当 $k = 0.4$ ns⁻¹时,如图3(a)~(c)所示,时间序列表现为单周期振荡。光谱中包含一系列等间隔的频率成分,频率间隔为1.26 GHz,与此电流下的弛豫振荡频率($f_{RO} = 1/\tau_{RO} = 1.19$ GHz)近似相等,说明光反馈诱导了SRL的持续弛豫振荡。相图表现为一个闭合的圆环,进一步说明此时SRL工作在单周期态。当 $k = 0.8$ ns⁻¹时,如图3(d)~(f)所示,时间序列为多个峰值的周期性振荡,光谱中的频率成分明显增多,相图表现为多个圆环重叠在一起,说明此时SRL进入了多周期态。当 $k_1 = 6$ ns⁻¹时,如图3(g)~(i)所示,时间序列表现为无规则振荡,光谱明显展宽且无明显峰值,相图中的吸引子为无限

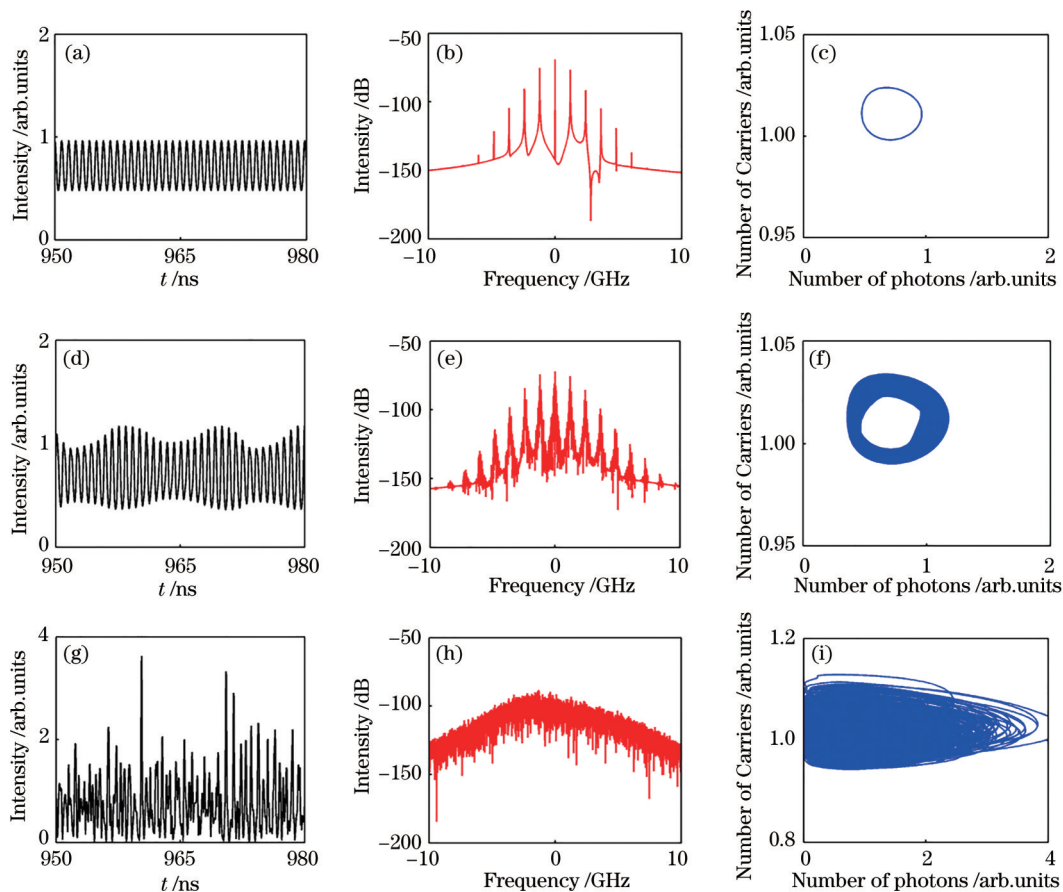


图3 当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0, T = 5$ ns时不同 k 下SRL输出的时间序列(第一列)、光谱(第二列)和相图(第三列)。

(a)(b)(c) $k = 0.4$ ns⁻¹; (d)(e)(f) $k = 0.8$ ns⁻¹; (g)(h)(i) $k = 6$ ns⁻¹

Fig. 3 Time series (first column), optical spectra (second column), and phase portraits (third column) of SRL for different k when $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$ and $T = 5$ ns. (a)(b)(c) $k = 0.4$ ns⁻¹; (d)(e)(f) $k = 0.8$ ns⁻¹; (g)(h)(i) $k = 6$ ns⁻¹

多个重叠在一起的圆环并具有遍历性,说明此时 SRL 进入了混沌态。以上研究表明,在相位共轭光反馈下,SRL 能产生单周期、多周期和混沌等动力学行为。SRL 在共轭光反馈下产生这些动力学行为的物理原因是激光器的弛豫振荡频率 f_{RO} 和外腔模频率 $f_{EC}=c/2L$ 竞争的结果,其中 c 为光速, L 为外腔长。当 $f_{EC} \ll f_{RO}$ 时,可产生低频波动和周期性脉冲到混沌动力学的演化,而混沌动力学是相干塌陷的结果^[4]。此外,产生的混沌信号的光谱与放大的自发辐射(ASE)噪声谱相类似^[30]。

为了全面掌握 SRL 在双路相位共轭光反馈下的动力学演化路径,绘制了当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0, T = 5$ ns 时的分岔图,如图 4 所示,其中点代表了每一个反馈强度所对应的时间序列的极值。当 k 从 0 增加到 0.25 ns^{-1} 时,分岔图中只有一个极值,SRL 工作在稳定态。出现稳定态的原因是,当反馈强度较小时,外腔模与弛豫振荡的竞争较弱,因此不能扰动 SRL 发生更复杂的动力学行为。当 k 位于 0.25 ns^{-1} 和 0.60 ns^{-1} 之间时,分岔图中有两个极值,分别对应于强度时间序列的极大值和极小值,此时 SRL 工作在单周期态。单周期态的出现是由于外部光反馈的扰动使 SRL 出现了持续的无阻尼弛豫振荡。 k 继续从 0.60 ns^{-1} 增加到 0.90 ns^{-1} ,分岔图中出现了多个极值,但是不具备遍历性,说明此时 SRL 工作在多周期态。当 k 大于 0.90 ns^{-1} 时,分叉图中的极值数增多并具有遍历性,说明此时 SRL 工作在混沌态。混沌态的产生是由于外腔模与弛豫振荡的竞争加剧而出现了相干塌陷,并出现了高维吸引子。混沌态可应用于安全通信、随机数产生、光子神经网络等领域,接下来将讨论 SRL 在共轭交叉光反馈下产生的混沌信号的时延特征(TDS)和带宽(BW)。在下面的讨论中, $\Phi_2 - \Phi_1$ 固定为 0, T 固定为 5 ns。

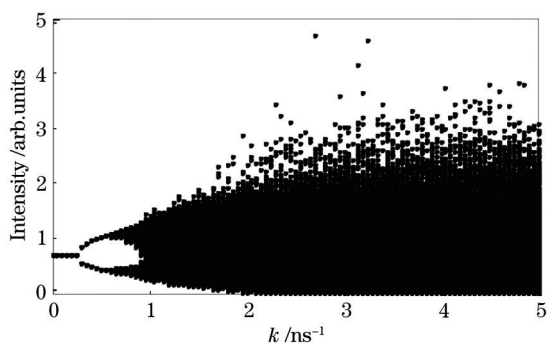


图 4 当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0, T = 5$ ns 时 SRL 输出的分岔图
Fig. 4 Bifurcation diagram output from SRL under $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$ and $T = 5$ ns

在激光混沌的应用中,与延迟时间相关的时延特征会降低其性能,例如降低混沌态的测距精度和随机数的复杂度。TDS 是强度时间序列经过延迟后的自我重复,通常采用自相关函数(ACF)进行识别和量化。图 5 给出了相位共轭光交叉反馈下 SRL 输出的时间序列、功率谱和自相关图。其中功率谱是对强度时间序列作傅里叶变换得到的,而自相关的值是由(7)式计算得出的。当 $k = 2 \text{ ns}^{-1}$ 时,如图 5(a)所示,在外部光反馈的扰动下,SRL 已经进入了混沌态;功率谱[图 5(b)]明显展宽且峰值位于弛豫振荡频率 f_0 附近,这是典型的由无阻尼弛豫振荡引起的半导体激光器混沌现象。图 5(c)给出了自相关函数值的分布,可以看出,在延迟时间 $T = 5$ ns 和 T 的倍数附近有明显的峰值,且自相关的值具有明显的振荡,振荡周期与弛豫周期 τ_{RO} 近似相等。在 $t = 5.7$ ns 处自相关取最大值 0.38,说明此时时延特征明显,不利于混沌信号的应用。在反馈延迟处出现较强 TDS,这是由于混沌信号经过反馈时间 T 后再注入到 SRL 的腔内,这相当于腔内信号自我复制,因此在 T 的倍数处出现了可识别的 TDS。当 $k = 3 \text{ ns}^{-1}$ 时,如图 5(d)、(e)所示,强度时间序列的振荡幅度变大,功率谱中的高频成分变多。在此反馈强度处出现了 TDS 被抑制的现象,这可能是外部扰动信号扰动了 SRL 的内部场,使非线性相互作用增强。自相关函数[图 5(f)]在时间延迟 T 的附近无明显峰值,此时 TDS 为 0.07,时延特征得到较好的隐藏。当 $k = 8 \text{ ns}^{-1}$ 时,如图 5(g)~(i)所示,时间序列中的振荡幅值进一步增大,功率谱中与弛豫振荡相关的峰值明显降低,但自相关函数在 T 处的峰值 TDS 为 0.40,此时时延特征变得较为明显。值得注意的是,虽然自相关函数在 T 附近有较大的值,但是未出现与图 5(c)相似的振荡,说明增加反馈强度弱化了弛豫振荡,功率谱[图 5(h)]也说明了这一点。当 $k = 15 \text{ ns}^{-1}$ 时,强度时间序列的振荡变得更加密集,功率谱中的高频率成分进一步增多且弛豫振荡峰值变得不可识别,自相关函数在 T 处的峰值 TDS 为 -0.5,为反相相关,此时时延特征非常明显。因此,通过适当调节反馈强度,SRL 在共轭光反馈下产生的混沌信号的时延特征能有效隐藏,这有利于混沌信号的应用。

图 6 展示了 SRL 输出的混沌信号的时延特征和带宽随反馈强度的变化。除 TDS 外,混沌带宽也是衡量混沌信号质量的一个重要指标,文中采用标

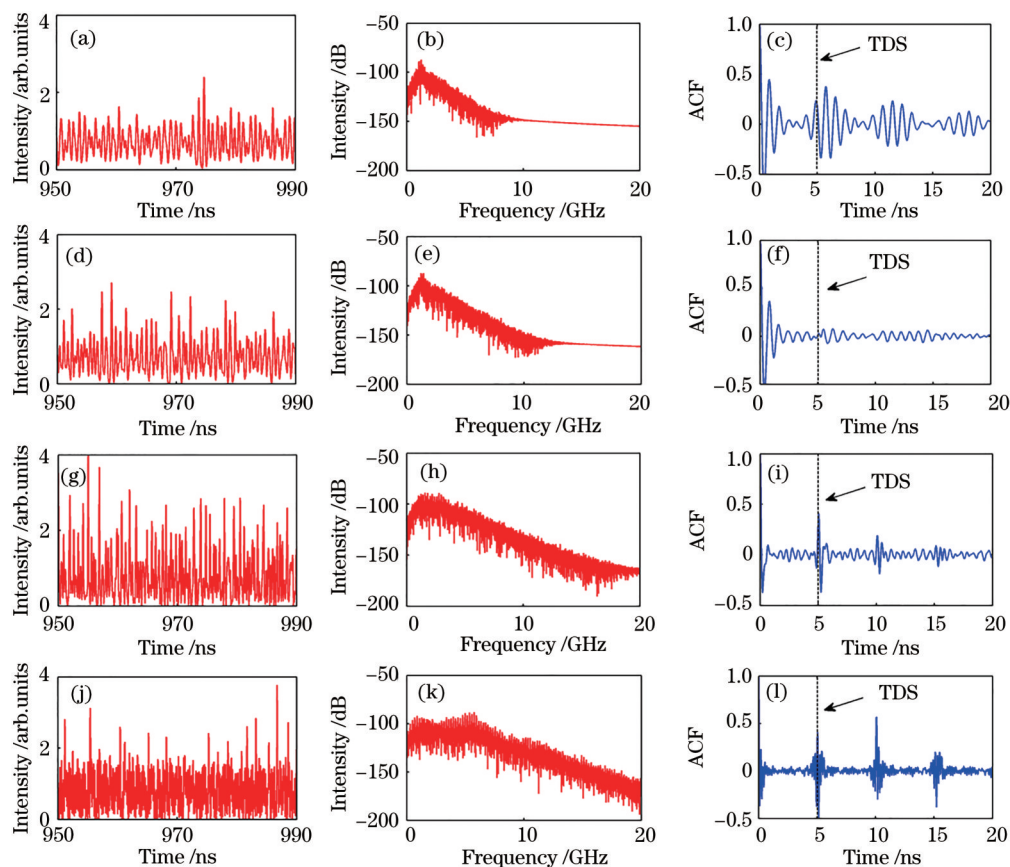


图 5 不同 k 时相位共轭反馈下 SRL 输出的时间序列 (第一列)、功率谱 (第二列) 和自相关图 (第三列)。

(a)(b)(c) $k=2 \text{ ns}^{-1}$; (d)(e)(f) $k=3 \text{ ns}^{-1}$; (g)(h)(i) $k=8 \text{ ns}^{-1}$; (j)(k)(l) $k=15 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 5 Time series (first column), power spectra (second column), and autocorrelation diagrams (third column) of SRL subject to phase conjugate feedback for different k . (a)(b)(c) $k=2 \text{ ns}^{-1}$; (d)(e)(f) $k=3 \text{ ns}^{-1}$; (g)(h)(i) $k=8 \text{ ns}^{-1}$; (j)(k)(l) $k=15 \text{ ns}^{-1}$

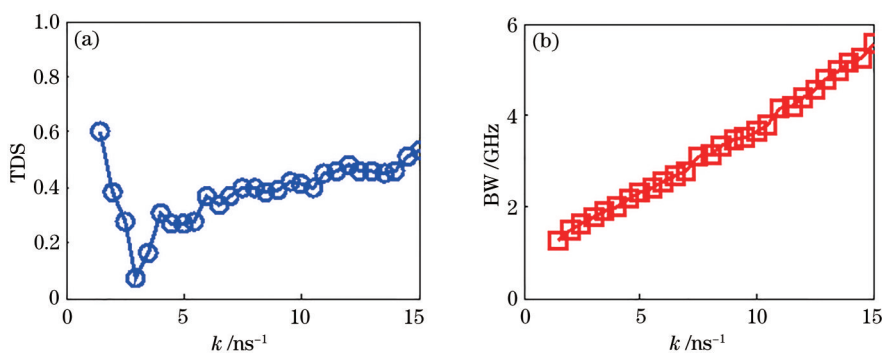


图 6 混沌信号的时延特征和带宽随反馈强度的变化。(a) TDS; (b) BW

Fig. 6 Time-delay signature and bandwidth versus feedback strength. (a) TDS; (b) BW

准带宽进行量化,标准带宽定义为功率谱中频率成分的能量累加到总能量的 80% 时所对应的频率。如图 6(a) 所示,当反馈强度由 1.5 ns^{-1} 增加到 3 ns^{-1} 时, TDS 由 0.6 逐渐减小到 0.07。反馈强度进一步从 3 ns^{-1} 增加到 15 ns^{-1} , TDS 逐渐增加并伴随着小的波动。图 6(b) 给出了相应的带宽的变化,带宽随着反馈强度的增加几乎呈线性增加。这是由于半

导体激光器产生混沌信号的带宽是与激光器的弛豫振荡频率相关的,随着反馈强度的增加,系统的弛豫振荡频率增加,这也导致了带宽的增加。但是需要指出的是,要获的低 TDS 的混沌信号,反馈强度不能太大,一些文献所采用的方法是将其低 TDS 的混沌信号注入到另一个半导体激光器中,这样能将带宽显著增加到十几甚至几十 GHz^[24]。

上面的仿真结果是在 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$ 的情况下得到的,最后研究反馈相位差对非线性动力学的影响。图 7 给出了不同相位差下 SRL 输出的时间序列,其中反馈强度 k 固定为 0.9 ns^{-1} 。如图 7 所示,当相位差取不同值时,SRL 输出的时间序列并不相同。当相位差等于 0 时,输出的是多周期态。当相位差为

0.6π 时,SRL 输出的是规则低频振荡态。而当相位差为 $0.3\pi, 0.9\pi, 1.2\pi$ 和 1.5π 时,SRL 输出的是不规则的低频振荡态。这是由于外部反馈回 SRL 腔内的信号不仅包含电场强度部分,也包含相位部分,相位的变化会经过线宽增强因子作用到强度上,进而改变了最后的强度时间序列。

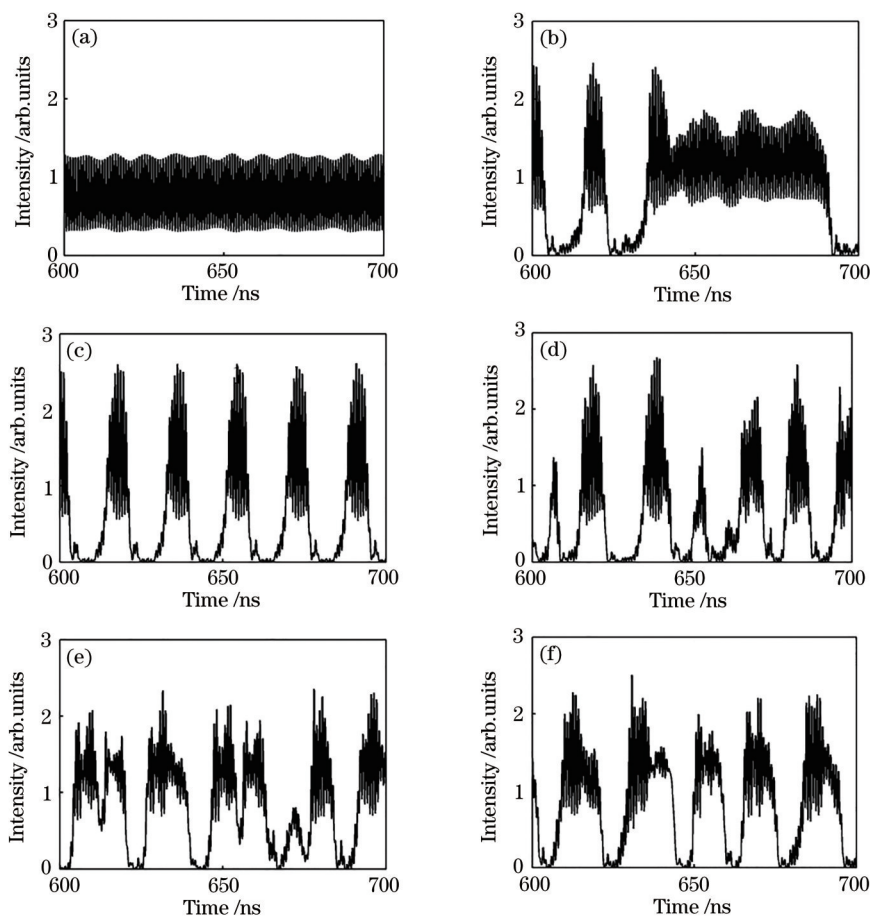


图 7 不同相位差下 SRL 输出的时间序列。(a) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$; (b) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.3\pi$; (c) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.6\pi$; (d) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.9\pi$; (e) $\Phi_2 - \Phi_1 = 1.2\pi$; (f) $\Phi_2 - \Phi_1 = 1.5\pi$

Fig. 7 Time series of SRL for different phase differences. (a) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$; (b) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.3\pi$; (c) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.6\pi$; (d) $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.9\pi$; (e) $\Phi_2 - \Phi_1 = 1.2\pi$; (f) $\Phi_2 - \Phi_1 = 1.5\pi$

4 结 论

数值研究了 SRL 在外部相位共轭交叉光反馈下的非线性动力学行为。当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0.5\pi$ 和 $k = 0.8 \text{ ns}^{-1}$ 时,SRL 的 CW 模式和 CCW 模式呈现出了低频反相振荡,这是在混沌的演化过程中稳定的固定点吸引子被破坏造成的。系统的弛豫过程在低频振荡的同时还将经历一段频率接近弛豫振荡频率的快速振荡。当 $\Phi_2 - \Phi_1 = 0$ 和 $T = 5 \text{ ns}$ 时,通过增加反馈强度,SRL 可输出单周期态、多周期态和混沌态。通过绘制分岔图,可以发现,SRL 经历了准周期态到

混沌态的分岔路线。进一步利用自相关函数识别了混沌信号的时延特征,利用功率谱技术计算了混沌的带宽。发现 TDS 在反馈强度增加的过程中存在极小值 0.07,说明 TDS 能被有效抑制。而混沌带宽却随着反馈强度的增加逐渐增大,这是 SRL 的弛豫振荡频率逐渐增大造成的。此外,研究还表明,不同的相位差会影响 SRL 输出的动力学。研究结果为 SRL 在相关领域的应用提供了理论支持。

参 考 文 献

[1] Xu G L, Da C, Ni Q L, et al. Reconfigurable

- optoelectronic chaotic logic gates in vertical cavity surface emitting laser with optical feedback[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1206003.
- 许葛亮, 笪诚, 倪乾龙, 等. 光反馈垂直腔面发射激光器的可重构光电混沌逻辑门[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1206003.
- [2] 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.
- [3] Zhang Y N, Xu A S, Feng Y L, et al. Chaos characteristics of the output from a semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214001.
- 张依宁, 徐艾诗, 冯玉玲, 等. 光电反馈半导体激光器输出光的混沌特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1214001.
- [4] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [5] Nguimdo R M, Colet P, Larger L, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 034103.
- [6] Rontani D, Choi D, Chang C Y, et al. Compressive sensing with optical chaos[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35206.
- [7] Jiang N, Xue C P, Lü Y, et al. Physically enhanced secure wavelength division multiplexing chaos communication using multimode semiconductor lasers [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(3): 1937-1949.
- [8] Tanaka G, Yamane T, Héroux J B, et al. Recent advances in physical reservoir computing: a review [J]. *Neural Networks*, 2019, 115: 100-123.
- [9] Mercier É, Weicker L, Wolfersberger D, et al. High-order external cavity modes and restabilization of a laser diode subject to a phase-conjugate feedback [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 306-309.
- [10] Weicker L, Uy C H, Wolfersberger D, et al. Mapping of external cavity modes for a laser diode subject to phase-conjugate feedback[J]. *Chaos*, 2017, 27(11): 114314.
- [11] Green K, Krauskopf B. Bifurcation analysis of a semiconductor laser subject to non-instantaneous phase-conjugate feedback[J]. *Optics Communications*, 2004, 231(1/2/3/4/5/6): 383-393.
- [12] Sattar Z A, Shore K A. Phase conjugate feedback effects in nano-lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(4): 1-8.
- [13] Jiang N, Zhao A K, Liu S Q, et al. Injection-locking chaos synchronization and communication in closed-loop semiconductor lasers subject to phase-conjugate feedback[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9477-9486.
- [14] Mercier É, Wolfersberger D, Sciamanna M. Bifurcation to chaotic low-frequency fluctuations in a laser diode with phase-conjugate feedback[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 4021-4024.
- [15] Bouchez G, Uy C H, Macias B, et al. Wideband chaos from a laser diode with phase-conjugate feedback[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 975-978.
- [16] O'Brien D, Huyet G, McInerney J G. Low-frequency fluctuations in a semiconductor laser with phase conjugate feedback[J]. *Physical Review A*, 2001, 64(2): 025802.
- [17] Virte M, dal Bosco A K, Wolfersberger D, et al. Chaos crisis and bistability of self-pulsing dynamics in a laser diode with phase-conjugate feedback[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(4): 043836.
- [18] Green K, Krauskopf B. Global bifurcations and bistability at the locking boundaries of a semiconductor laser with phase-conjugate feedback [J]. *Physical Review E*, 2002, 66(1): 016220.
- [19] Weicker L, Wolfersberger D, Sciamanna M. Stability analysis of a quantum cascade laser subject to phase-conjugate feedback[J]. *Physical Review E*, 2018, 98(1): 012214.
- [20] Gelens L, van der Sande G, Beri S, et al. Phase-space approach to directional switching in semiconductor ring lasers[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(1): 016213.
- [21] Nguimdo R M, Verschaffelt G, Danckaert J, et al. Loss of time-delay signature in chaotic semiconductor ring lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2541-2543.
- [22] Mashal L, van der Sande G, Gelens L, et al. Square-wave oscillations in semiconductor ring lasers with delayed optical feedback[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22503-22516.
- [23] Li S S, Li X Z, Zhuang J P, et al. Square-wave oscillations in a semiconductor ring laser subject to counter-directional delayed mutual feedback[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 812-815.
- [24] Li N Q, Nguimdo R M, Locquet A, et al. Enhancing optical-feedback-induced chaotic dynamics

- in semiconductor ring lasers via optical injection[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 92(2): 315-324.
- [25] Javaloyes J, Balle S. All-optical directional switching of bistable semiconductor ring lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(8): 1078-1085.
- [26] Syed A, Tafazoli M, Davoudzadeh N, et al. An all-optical proteretic switch using semiconductor ring lasers [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126252.
- [27] Verschaffelt G, Khoder M, van der Sande G. Optical feedback sensitivity of a semiconductor ring laser with tunable directionality[J]. *Photonics*, 2019, 6(4): 112-123.
- [28] Sorel M, Giuliani G, Scire A, et al. Operating regimes of GaAs-AlGaAs semiconductor ring lasers: experiment and model[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(10): 1187-1195.
- [29] Kelleher B, Tykalewicz B, Goulding D, et al. Two-color bursting oscillations[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8414.
- [30] Yamazaki T, Uchida A. Performance of random number generators using noise-based superluminescent diode and chaos-based semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 0600309.