

半导体环形激光器的混沌同步及优化

薛萍萍 张建忠 杨玲珍 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, 山西 太原 030024

摘要 数值模拟了半导体环形激光器(SRLs)的同步. 在频率失谐为 -20 GHz, 注入系数大于 2.5 时, 两种方案(闭环、开环)的SRLs均可以获得互相关系数大于 0.95 以上的同步. 讨论了在不同的注入系数下同步对频率失谐的稳健性, 结果表明开环同步对频率失谐的稳健性更好. 研究了SRLs内部参数的变化对同步的影响, 通过适当调节SRLs内部参数的数值可使两种结构的同步质量都得到优化. 闭环同步的互相关系数从 0.96 提高到 0.99 (开环同步互相关系数从 0.95 提高到 0.97). 最后讨论了在闭环结构中偏置电流和反馈延迟时间失谐对同步的影响.

关键词 激光器; 半导体环形激光器; 混沌; 自反馈; 同步优化

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0414002

Chaotic Synchronization and Optimization of Semiconductor Ring Lasers

Xue Pingping Zhang Jianzhong Yang Lingzhen Zhang Zhaoxia

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

Abstract Synchronizations of semiconductor ring lasers are investigated numerically. When the frequency mismatch is -20 GHz and the injection coefficient is greater than 2.5 , the semiconductor ring lasers in two different configurations (open and closed loops) can all achieve good synchronizations with cross correlation coefficient above 0.95 . The robustness of two schemes to frequency detuning with different injection coefficients are discussed and the results show the robustness of open loop structure are better than that of closed loop structure. The influences of internal parameters' mismatches on the chaos synchronization are also studied. The synchronization of two structures can be optimized by choosing appropriate internal parameters. The correlation coefficient of closed loop increases from 0.96 to 0.99 (0.95 to 0.97 about open loop). At last the impacts of the feedback delay time and bias current on the synchronization in the closed loop structure are analyzed.

Key words lasers; semiconductor ring laser; chaos; self-feedback; synchronization optimization

OCIS codes 140.3560; 140.1540; 060.4510

1 引 言

自从1990年Pecora和Carroll^[1]预言了混沌同步,这一现象不断被广泛而深入地研究.由于混沌同步在安全通信和信息解码方面有着极其重要的应用^[2],因此基于耦合的非线性激光系统的混沌振荡同步逐渐成为研究的热点^[3-7].传统的混沌半导体激光器的同步技术已经较为成熟^[8-11],然而随着网络通信的发展,越来越要求混沌激光器小型化.半导体环形激光器(SRLs)由于具有双稳态运行的特点并且易于集成^[12]到一个小的芯片上,在近几年内出现并逐渐开始为人们所关注. SRLs在光存储、全光逻辑门、全光转换、全光信号处理、全光随机数产生等方面都有着重要的应用^[13-15].格拉斯哥大学在这方面处于国际领先水平,他们在实验以及应用方面做出了很大贡献,这对于将来实现大范围的全光通信有着不可估量的推动作用. InGaAs-InP型的半导体环形激光器可以产生高维的混沌信号^[16-18],因此基于SRLs的混沌信号同步也开始被人们研究^[19-22].

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-12-04

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,讲师,主要从事激光混沌以及同步方面的研究. 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

Ermakov 课题组^[19]讨论了基于 SRLs 混沌通信的同步,发现交叉反馈产生混沌的情况下,闭环结构与开环结构相比更能够使顺时针(CW)模式和逆时针(CCW)模式同时产生质量较好的同步。潘炜等^[20]通过将混沌信号注入其他两个 SRLs 中实现了混沌通信同步,并比较了自反馈混沌和交叉反馈混沌的同步(均为开环结构)^[21],发现自反馈的混沌同步要优于交叉反馈混沌同步。本文基于上述结论研究了 SRLs 在自反馈产生混沌的前提下,开环同步和闭环同步的差异,并且在研究过程中通过对激光器内部参数的合理设置将同步质量进一步优化。

2 理论模型

图 1 是自反馈的 SRLs 混沌同步方案草图(包括开环和闭环两种结构)。其中,SRL1 和 SRL2 均由一个环形激光腔和两个直波导组成,两者之间通过耦合区(直波导和环波导之间的区域)联系。耦合区可以将部分光信号从环内耦合输出到直波导。SRL1 环腔中黑色的虚线箭头表示 CW 模式的信号,这部分的光信号经过耦合区被耦合到 SRL1 下方直波导中并从左端输出,然后再反馈回 SRL1 上面的直波导中(图中也是用黑色虚线箭头表示),这样 SRL1 由于受到反馈扰动产生 CW 模式的混沌信号。将 SRL1 产生的混沌信号注入到同样结构的 SRL2 中(图中注入用红色的虚线箭头表示)闭环同步就可以产生。图中绿颜色的矩形框中是 SRL2 的自反馈部分,开环结构中 SRL2 没有这部分反馈。SRLs 内部的激光信号有 CW 和 CCW 两种模式,图中只画出了 CW 模式,因为当 CW 模式反馈进入 SRLs 时由于模式竞争 CW 模式会占据主导位置,而 CCW 模式几乎可以忽略。

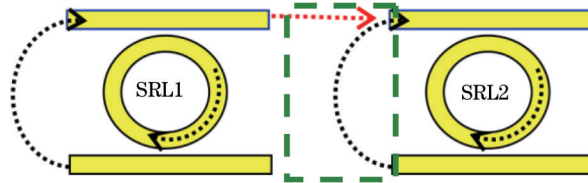


图 1 两个半导体环形激光器的混沌同步方案草图。(a)主激光器 SRL1; (b)从激光器 SRL2

Fig.1 Chaos synchronization sketch map of two SRLs. (a) Master laser SRL1; (b) slave laser SRL2

模拟中使用的是双模式模型,该模型通常用来分析一个单腔谐振中一对反向传输的纵模之间的竞争,并且成功解释了 SRL 的功率-电流($P-I$)特性曲线中的交替振荡现象以及作为陀螺方面的机理。在单模运行时环腔内的电场可以表示为

$$E(x, t) = E_1(t)\exp[-i(\omega_{01}t - k_1x)] + E_2(t)\exp[-i(\omega_{02}t + k_2x)], \quad (1)$$

式中 E_1 和 E_2 为两个反向传输模式的电场,1 为 CW 电场,2 为 CCW 电场; x 是沿着环腔的纵向空间坐标(假设 CW 方向为正方向), k_1, k_2 为波矢, ω_{01}, ω_{02} 为激光纵模的光频;由于这两个模式频率差别很小模拟中忽略^[23],本文在双模式模型^[23-25]基础上加入反馈项和注入项来模拟混沌信号的产生和同步。(2)式由反映两个反向模式的非线性增益饱和效应的非线性耦合项、激光器的反馈项和注入项组成,包括开环和闭环两种结构。发射激光器顺时针模式的速率方程是(2)式中除了蓝色框中注入项以外的部分。接收激光器的顺时针模式的速率方程则要分成开环和闭环两种不同结构时的公式。其中开环结构的速率方程是除了(2)式绿色框中反馈项以外的部分,闭环结构速率方程则是完整的(2)式。(3),(4)式分别是发射和接收激光器逆时针模式的速率方程和载流子公式,这两个公式对于发射和接收激光器来讲都相同。模拟中由于偏置电流(176 mA)远大于阈值电流,因此忽略了线性耦合项和自发辐射项^[23]。

$$\frac{dE_{tr}^1}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha)[\Gamma\nu_g g_n(N_{tr} - N_0)(1 - \varepsilon_s |E_{tr}^1|^2 - \varepsilon_c |E_{tr}^2|^2) - \frac{1}{\tau_p} E_{tr}^1 + i(\omega_{tr} - \omega_{trh})E_{tr}^1 + \frac{k_f}{\tau_{in}} E_{tr}^1(t - \tau_f)\exp(-i\omega_{tr}\tau_f)] + \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} E_{tr}^1(t)\exp[-i\omega_{tr}\tau_{inj} - (\omega_l - \omega_{tr})t], \quad (2)$$

$$\frac{dE_{tr}^2}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha)[\Gamma\nu_g g_n(N_{tr} - N_0)(1 - \varepsilon_s |E_{tr}^2|^2 - \varepsilon_c |E_{tr}^1|^2) - \frac{1}{\tau_p} E_{tr}^2 + i(\omega_{tr} - \omega_{trh})E_{tr}^2], \quad (3)$$

$$\frac{dN_{tr}}{dt} = \frac{\eta_i I_{tr}}{eV} - \frac{N_{tr}}{\tau_s} - \nu_g g_n (N_{tr} - N_0) [(1 - \varepsilon_s |E_{tr}^1|^2 - \varepsilon_c |E_{tr}^2|^2) |E_{tr}^1|^2 + (1 - \varepsilon_s |E_{tr}^2|^2 - \varepsilon_c |E_{tr}^1|^2) |E_{tr}^2|^2], \quad (4)$$

式中 E_{tr}^1, E_{tr}^2 表示发射和接收激光器的 CW 和 CCW 的复振幅, 上标 '1, 2' 表示 CW、CCW 模式。 N_{tr} 为有源区的载流子密度; α 为线宽增强因子, Γ 为限制因子, ν_g 为群速度, g_n 为微分增益系数, N_0 为透明载流子密度, ε_s 和 ε_c 分别为自增益饱和系数和交叉增益饱和系数, τ_p 为环腔中两个模式的光子寿命, τ_s 为载流子寿命, ω_{tr} 为发射和接收激光器的角频率, ω_{th} 阈值谐振频率, k_f 为反馈系数, k_{inj} 为注入系数, τ_f 为反馈延迟时间, τ_{inj} 为注入延迟时间, τ_{in} 为光信号绕环一周的时间, I_{tr} 为偏置电流, η_i 为电流注入系数, e 为基本电荷, V 为量子阱有源区的体积。模拟中两个激光器的参数取一致, 输出波长为 1550 nm, 为单纵模输出, 具体参数见表 1。

表 1 激光器的内部参数

Table 1 Internal parameters of laser

Description	Symbol	Value
SRL radius	R	100 μm
Differential gain	G_n	1.17×10^{-19}
Group velocity	v_g	$8.57 \times 10^7 \text{ m/s}$
Line-width enhancement factor	α	4
Carrier density at transparency	N_0	$7.6 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$
Threshold current	I_{th}	21.5 mA
Injection efficiency	η_i	0.5
Self-saturation coefficients	ε_s	$3.16 \times 10^{-23} \text{ m}$
Cross-gain coefficients	ε_c	$2\varepsilon_s$
Photon lifetime	τ_p	$5.17 \times 10^{-12} \text{ s}$
Carrier lifetime	τ_s	$3.15 \times 10^{-9} \text{ s}$
Optical round-trip time in the ring	τ_{in}	$7.33 \times 10^{-12} \text{ s}$
Quantum well active region volume	V	$2.58 \times 10^{-16} \text{ m}^3$
Optical confinement factor	Γ	0.226

3 混沌同步

3.1 混沌同步的结果

$I_{tr}=176 \text{ mA}, \tau_f=0.1 \text{ ns}, k_f=0.3$ 时, SRL1 输出混沌信号, 注入到 SRL2 中产生混沌同步 (闭环结构时两个激光器的自反馈延迟时间均为 0.1 ns, 反馈系数也相同)。定义 SRL1 和 SRL2 的频率失谐为 $(\omega_1 - \omega_2)$, 图 2 是两种结构同步结果的时序、频谱和相关图。左图为闭环, 右图为开环同步结果。在模拟中由于注入有延迟, 取了延

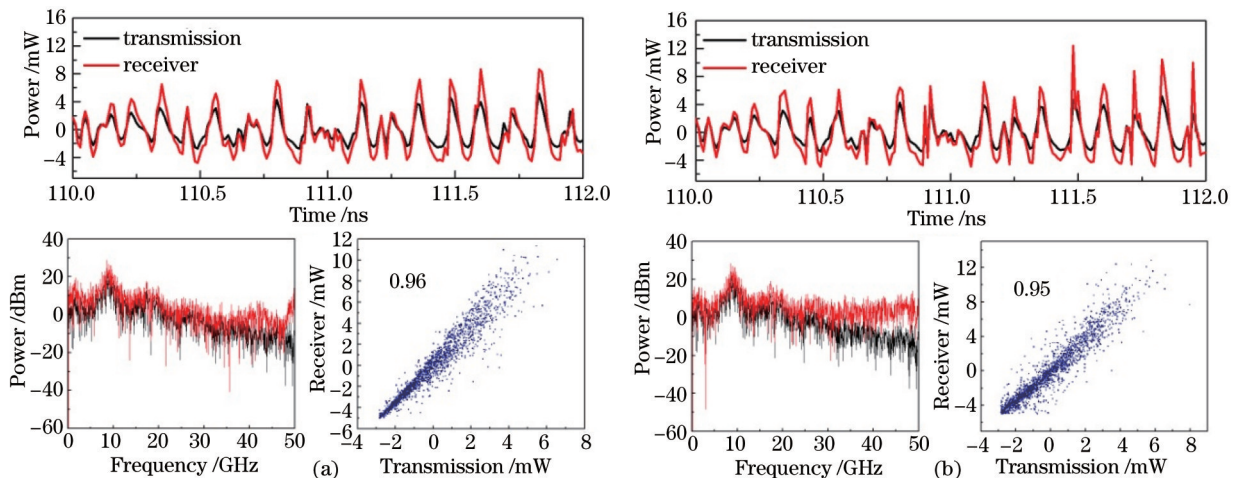


图 2 SRLs 同步时序、频谱和相关图。(a) 闭环; (b) 开环 ($\omega_1 - \omega_2 = -20 \text{ GHz}, k_{inj} = 2.5, \tau_{inj} = 6 \text{ ns}$)

Fig.2 Synchronization time series, power spectrum and correlation diagram of SRLs. (a) Closed loop; (b) open loop ($\omega_1 - \omega_2 = -20 \text{ GHz}, k_{inj} = 2.5, \tau_{inj} = 6 \text{ ns}$)

迟之前的时序,所以图2中发射和接收激光器的时序同步一致,互相关系数都在0.95以上。左图闭环结构的同步稍好于右图开环同步。这一点在频谱图中可以明显地看出差别,左图中发射和接收激光器的频谱几乎同步一致,右图中在频率较高的区域分叉比较明显。

3.2 不同注入系数下同步对频率失谐的稳健性

频率失谐是影响混沌同步的一个重要因素,图3是两种结构同步的相关系数在不同注入系数下对频率失谐稳健性的map图。

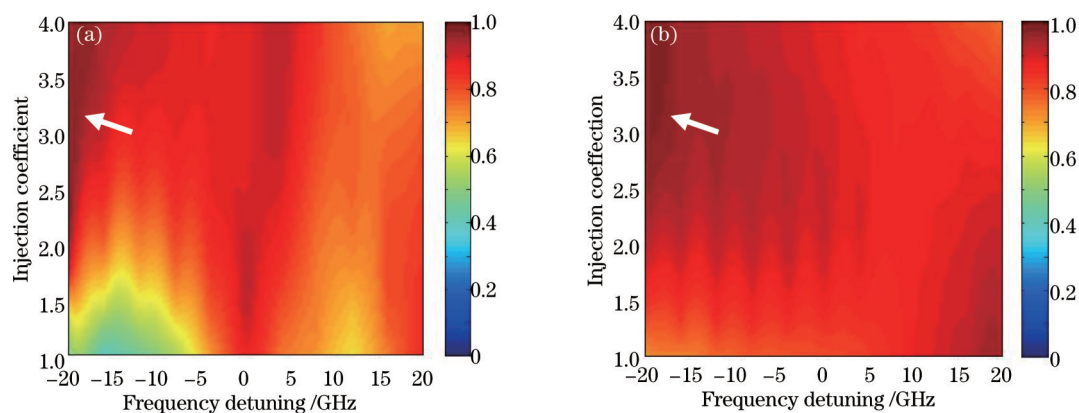


图3 不同注入系数下闭环和开环同步对频率失谐的map图。(a)闭环;(b)开环

Fig.3 Map of synchronization subject to different frequency detunings with different injection coefficients. (a) Closed loop; (b) open loop

图3分别是闭环、开环结构的同步稳健性结果。从整体来看在不同注入系数下,开环结构同步对频率失谐的稳健性要优于闭环结构。左图中除了+5 GHz和-5 GHz之间有较好的同步,大部分红色区域在频率负失谐区域。而图3(b)中大片区域都是红色,说明开环结构对频率失谐的依赖性要小。图3(a)、(b)两幅图中最好的同步状态均出现在注入系数大于2.5,频率失谐在-20 GHz附近的区域(图中用白色的箭头指出),此时的同步系数接近1。这是因为SRL与传统的半导体激光器相似,在单向注入的情况下同步会出现在一定的参数失谐的区域尤其是闭环结构,因为闭环结构速率方程中,传输激光器和接收激光器之间只差一个注入项,当注入系数很小时,较好的同步会发生在零失谐区域附近。随着注入系数的增加,SRL1产生的混沌信号注入到SRL2中产生注入锁定,此时发射和接收激光器在一定的频率失谐区域获得好的同步。另外,闭环结构的红色区域分布在整幅图的左上方,而开环结构的图中整体上都显示红色。这主要是因为开环结构速率方程中接收激光器没有反馈项,因此发射激光器会在较小的注入系数下实现注入锁定同步。而对于闭环结构则需要更大的注入系数才能实现注入锁定同步。

3.3 激光器的内部参数失谐对同步的影响及同步优化

SRLs的内部参数与激光器本身的各种因素有关,例如材料、腔内损耗、量子阱折射率、波导的高度和宽度等等。即使材料、量子阱折射率、波导高度和宽度相同,由于SRLs制备过程无法做到精准控制腔内损耗等因素,因此会导致两个SRLs内部参数的差异。这里研究了SRLs内部参数失谐对同步的影响,定义参数失谐率为SRL2(从激光器)和SRL1(主激光器)的参数差与主激光器的参数的比值。失谐的参数包括:微分增益系数、线宽增强因子、光子寿命以及环长。

图4是以上4个参数在不同失谐率时两个激光器的同步互相关系数的变化图。可以看出,与闭环结构相比,开环结构中参数失谐对同步的影响并不是很大。图4(a)闭环同步中线宽增强因子和环长失谐对同步系数的影响趋势基本一致,当失谐率从-30%增加时同步系数也随之增加,而最大的同步系数都出现在失谐率为+12%处,然后互相关系数开始下降。图4(b)中这两个参数失谐的影响同样基本一致,只是变化趋势基本上呈线性单调递减的关系,并且最好的同步失谐参数在负失谐区域。这样的影响结果除了和主从结构同步有关以外,还与模拟中两个激光器的频率失谐(-20 GHz)等因素有关。图4(a)和(b)中光子寿命失谐对同步的影响趋势基本相同,只是闭环结构的变化率要大一些。两种结构同步系数最好的光子寿命失谐率都是在负失谐区域,负失谐量越大同步质量越好。最后,微分增益失谐对同步质量的影响对于开环和闭环来讲都不

是很大,这一点在图4(a)和(b)中红色的曲线可以看出,相关系数变化范围基本上都在0.05以内。两个结构最佳的微分增益失谐都在-5%左右。

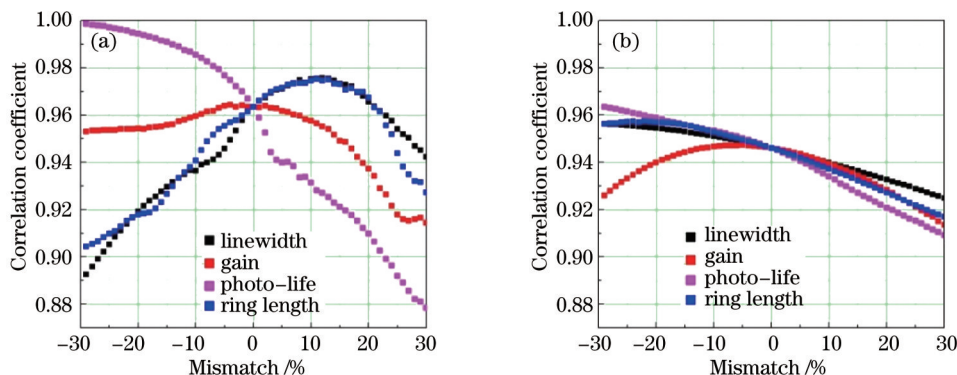


图4 参数失谐对SRLs同步的影响($\omega_r - \omega_i = -20$ GHz, $k_{inj} = 2.5$, $I = 176$ mA, $\tau_r = 0.1$ ns, $k_r = 0.3$)。(a)闭环;(b)开环
Fig.4 Impact of parameters' mismatch on the synchronization. ($\omega_r - \omega_i = -20$ GHz, $k_{inj} = 2.5$, $I = 176$ mA, $\tau_r = 0.1$ ns, $k_r = 0.3$). (a) closed loop; (b) open loop

上面的结果与文献[5]中的结果部分相似。因为半导体环形激光器也是半导体激光器的一种,它们之间有着相似的动态特性,但SRLs与传统的半导体激光器又有着结构和材料上的不同,最终导致参数失谐对同步的影响也会存在差异。

从参数失谐对同步的影响结果来看,如果适当调整激光器的内部参数值或许可以将同步质量提高。图5是通过参数调整前后的同步时序对比图。图5(a),(b)分别是闭-开环同步优化结果。图5(a)中线宽增强因子和环长失谐率取12%,微分增益失谐率取-5%,光子寿命失谐率取-30%。经过参数优化后闭环同步的互相关系数从0.96增加到0.99。图5(b)中线宽增强因子、环长、光子寿命失谐率均取-30%,微分增益失谐率取-5%,优化后同步系数从0.95增加到0.97。可以看出通过参数调整后两种结构的同步质量都得到了优化。尤其是闭环结构,发射和接收激光器的时序达到了非常一致的同步效果。这主要是因为与开环同步相比,闭环同步受参数失谐的影响要更大一些。

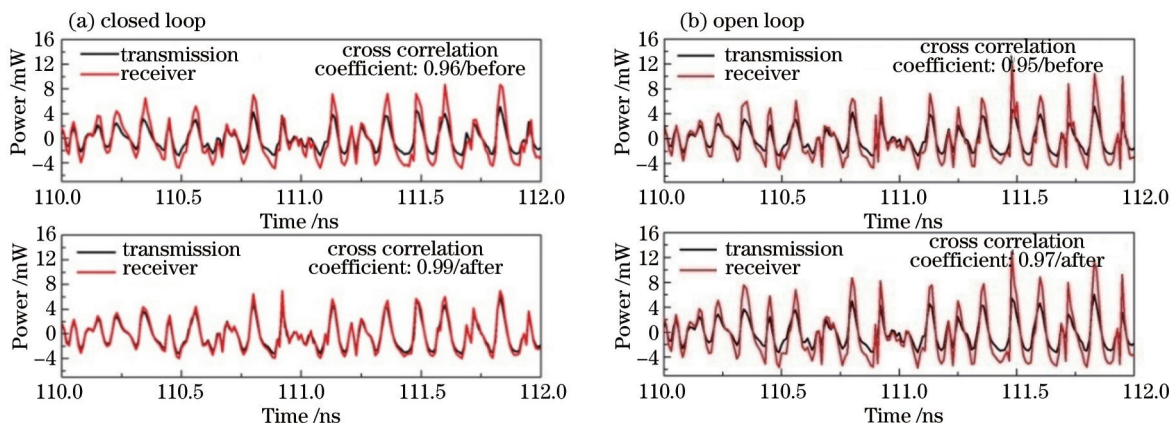


图5 参数优化后的同步比较($\omega_r - \omega_i = -20$ GHz, $k_{inj} = 2.5$, $I = 176$ mA, $\tau_r = 0.1$ ns, $k_r = 0.3$)

Fig.5 Synchronization comparison after parameters' optimization. ($\omega_r - \omega_i = -20$ GHz, $k_{inj} = 2.5$, $I = 176$ mA, $\tau_r = 0.1$ ns, $k_r = 0.3$)

3.4 激光器的自反馈延迟时间和偏置电流对闭环同步的影响

开环结构中反馈延迟时间对同步的影响不是很大,而闭环结构中发射和接收激光器结构相同、参数相同,延迟时间不相等可能会对激光器的同步带来影响。所以本文研究了闭环结构时反馈延迟时间和偏置电流对同步的影响,如图6所示。

图6(a)的横轴是SRL1(主激光器)的自反馈延迟时间,纵轴是同步互相关系数。SRL2(从激光器)的参数在图中括号里标注。图中可以看出只有当两个激光器的自反馈延迟时间相同时同步质量才最好。图6(b)的横轴是SRL1的偏置电流,纵轴是同步互相关系数。SRL2(从激光器)的参数同样在括号中给出。同样,两个

激光器的偏置电流相同时同步相关系数最大。以上结果可知,当发射和接收激光器的延迟时间和偏置电流相同时同步质量最好,而失谐后同步互相关系数会有0.09和0.05左右的下降幅度。

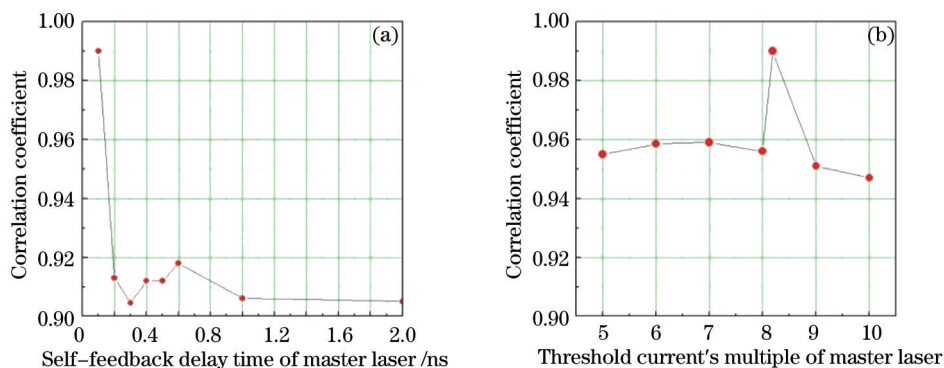


图6 闭环结构中主从激光器不同(a)延迟时间和(b)偏置电流时SRLs的同步。(从激光器 $\tau_i=0.1$ ns, $I=8.19I_{th}$)

Fig.6 Synchronization of master-slave SRLs with (a) different delay time and (b) bias currents in closed loop ($\tau_i=0.1$ ns, $I=8.19I_{th}$)

4 结 论

自反馈SRLs的同步模拟结果表明开环、闭环两种结构下,SRLs都可以得到质量很好的同步。不同注入系数时开环结构对频率失谐的稳健性优于闭环结构。同样的结论在研究激光器内部参数失谐对同步的影响中出现。参数失谐对开环结构同步的影响要弱于闭环,即开环结构能够容忍较大的参数失谐。通过对参数失谐影响的研究,选择合适的激光器参数两种结构同步都将被优化。闭环结构的同步系数从0.96提高到0.99,开环结构从0.95增加到0.97。最后讨论了闭环结构对延迟时间和偏置电流对称性要求,闭环结构要求延迟时间和偏置电流参数一致,一旦失谐同步质量就会有所下降。

参 考 文 献

- 1 L M Pecora, T L Carroll. Synchronization in chaotic systems [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821-824.
- 2 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.
- 3 S Tang, J M Liu. Chaos synchronization in semiconductor lasers with optoelectronic feedback [J]. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(6): 708-715.
- 4 J Liu, Z M Wu, G Q Xia. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection [J]. Opt Express, 2009, 17(15): 12619-12626.
- 5 Fan Li, Xia Guangqiong, Wu Zhengmao. Chaotic parallel synchronization of optoelectronic feedback semiconductor lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 989-994.
樊 利, 夏光琼, 吴正茂. 基于光电反馈的激光混沌并联同步系统研究[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 989-994.
- 6 Yan Senlin. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual-directional secure communication system [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(11): 1503-1509.
颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1503-1509.
- 7 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.
- 8 Li Nengyao, Wu Jiagui, Wu Zhengmao, *et al.*. Switching between complete synchronization and generalized synchronization in an open loop unidirectional optical chaos synchronization system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214008.
李能尧, 吴加贵, 吴正茂, 等. 开环单向光混沌系统中广义与完全同步转换[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214008.
- 9 Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian. Chaos synchronization through reverse-phase and its encoding in erbium-doped fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 29-32.
颜森林, 迟泽英, 陈文建. 掺铒光纤激光器反相位混沌同步及其编码[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 29-32.

- 10 Yu Hongjie, Liu Yanzhu. Synchronization of symmetrically nonlinear coupled chaotic systems [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(7): 3029–3033.
于洪洁, 刘延柱. 对称非线性耦合混沌系统的同步[J]. 物理学报, 2005, 54(7): 3029–3033.
- 11 Lei Lulu, Guo Qizhi. Instability of semiconductor laser with external light injection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 041901.
雷璐璐, 郭奇志. 具有外部注入光场的半导体激光器的不稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 041901.
- 12 Cui Rong, Yang Xiaohong, Lü Qianqian, *et al.*. InGaAs/InP photodetector on SOI circuitry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110003.
崔 荣, 杨晓红, 吕倩倩, 等. SOI波导与 InGaAs/InP 光电探测器的集成[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110003.
- 13 L Liu, R Kumar, K Huybrechts, *et al.*. An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip [J]. Nature Photon, 2010, 4(3): 182–187.
- 14 K Thakulsukanant, B Li, I Memon, *et al.*. All-optical label swapping using bistable semiconductor ring laser in an optical switching mode [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2009, 27(6): 631–638.
- 15 I V Ermakov, S Beri, M Ashour, *et al.*. Semiconductor ring laser with on-chip filtered optical feedback for discrete wavelength tuning [J]. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48(2): 129–136.
- 16 K E Chlouverakis, S Mikroulis, I Stamataki, *et al.*. Chaotic dynamics of semiconductor microring lasers[J], Opt Lett, 2007, 32(20): 2912–2914.
- 17 K E Chlouverakis, S Mikroulis, D Syvridis. Chaos and non-linear dynamics of a 1.55 μm InGaAsP–InP microring laser [C], SPIE, 2008, 6997: 699717.
- 18 G Yuan, X Zhang, Z Wang. Chaos generation in a semiconductor ring laser with an optical injection [J]. Optik–International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(22): 5715–5718.
- 19 Ilya V Ermakov, Sifeu T Kingni, Vasile Z Tronciu, *et al.*. Chaotic semiconductor ring lasers subject to optical feedback: Application to chaos-based communications [J]. Opt Commun, 2013, 286: 265–272.
- 20 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.
- 21 Nianqiang Li, Wei Pan, Lianshan Yan, *et al.*. Enhanced chaos synchronization and communication in cascade-coupled semiconductor ring lasers [J]. Commun Nonlinear Sci Number Simulat, 2013, 19(6): 1874–1883.
- 22 Yan Senlin. High rate chaos secure communication system of multiple-quantum-well lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 179–185.
颜森林. 高速多量子阱激光器混沌保密通信系统研究[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 179–185.
- 23 Guohui Yuan, Siyuan Yu. Bistability and switching properties of semiconductor ring lasers with external optical injection [J]. IEEE J Quantum Electron, 2008, 44(1): 41–48.
- 24 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.
- 25 C Born, M Sorel, S Yu. Linear and nonlinear mode interactions in a semiconductor ring laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 2005, 41(3): 261–271.

栏目编辑: 宋梅梅