

垂直腔面发射激光器的混沌同步恢复时间研究

吴梅^{1,2}, 王龙生^{1,2}, 王云才^{1,3,4}, 王安帮^{1,2,3*}

¹新型传感器与智能控制教育部重点实验室(太原理工大学), 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;

³广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006;

⁴广东省光子学信息技术重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 利用半导体激光器的混沌同步有望实现高速物理随机密钥分发,然而激光器的混沌同步恢复时间限制密钥分发的速率。为此数值研究垂直腔面发射激光器(VCSEL)在开环注入锁定同步系统中,影响混沌同步恢复时间的因素。模拟结果表明,可以通过三种途径缩短混沌同步恢复时间,增加激光器的偏置电流、微分增益系数,或减小光子、载流子寿命来缩短弛豫振荡周期;减小线宽增强因子来减小激光混沌的复杂度;增加注入强度、减小频率失谐来实现强注入锁定。研究结果对提高基于混沌激光同步的密钥分发速率具有理论借鉴的意义。

关键词 光通信; 混沌保密通信; 密钥分发; 半导体激光器; 混沌同步恢复时间

中图分类号 TN929.11 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210607

Research on Chaos Resynchronization Time of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Wu Mei^{1,2}, Wang Longsheng^{1,2}, Wang Yuncai^{1,3,4}, Wang Anbang^{1,2,3*}

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;

³School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

⁴Guangdong Provincial Key Laboratory of Photonics Information Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Chaos synchronization using semiconductor lasers achieves high-speed physical-layer key distribution, but the chaos synchronization time of lasers limits the rate of key distribution. Consequently, the factors affecting the chaos resynchronization time in an open-loop injection-locked synchronization system of the vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) have been numerically studied. Moreover, the experimental results demonstrate that the chaos resynchronization time can be reduced in three ways: increasing the bias current of the laser and the differential gain coefficient, or reducing the photon and carrier lifetime to shorten the relaxation oscillation period; reducing the linewidth enhancement factor that can reduce the complexity of laser chaos; and increasing the injection intensity and reducing the frequency detuning, which can achieve strong injection locking. Based on chaos synchronization, the results have theoretical reference significance for improving the key distribution rate.

Key words optical communications; chaos secure communication; key distribution; semiconductor lasers; chaos resynchronization time

OCIS codes 060.4510; 060.4785; 140.1540; 140.5960

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-06-02; 录用日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803505)、国家自然科学基金(61822509, 61713014, 61961136002, 61805170, 61805171)、山西人才计划(201805D211027)、山西“1331项目”重点创新研究团队、山西省高等学校优秀中青年创新人才计划和广东省创新创业团队计划

* E-mail: wanganbang@tyut.edu.cn

1 引言

混沌激光器是一种宽带物理随机熵源,在保密通信领域中具有重要的应用价值^[1-8]。传统的混沌激光保密通信方案是利用参数匹配的激光器作为收发机以产生同步的混沌载波,进而实现信息的掩藏、传输和解调^[2],其安全强度依赖于收发机的硬件参数空间^[9]。2012年, Yoshimura等^[10-11]提出了另一种保密通信方案,即混沌激光同步密钥分发,其是使用同一个光源来驱动一对参数匹配的混沌激光器以实现非耦合同步,并通过混沌态的随机键控来实现相同物理密钥的安全分发。相比于传统的混沌载波通信方案,混沌激光同步密钥分发方案中引入的混沌态随机键控可以提高安全强度,因此逐渐受到科研人员的关注,相继提出了基于光子集成半导体激光器^[12]、分布式反馈(DFB)激光器及其后处理^[13-14]、垂直腔面发射激光器(VCSEL)的随机偏振光对称注入^[15]、光电振荡器与激光器的混合混沌源^[16]和光电耦合振荡网络^[17]等密钥分发方案。然而,混沌同步恢复时间(CRT)限制了键控速率,进而严重限制密钥分发的速率。如 Yoshimura等^[10]利用了DFB半导体激光器在数十纳秒量级的CRT下,仅实现距离为120 km、速率为182 kbps/s的密钥分发。因此,探明CRT的影响因素对提升密钥分发的速率是至关重要的。

Vicente等^[18]数值对比了开环和闭环耦合系统中DFB激光器完全混沌同步的性能,发现开环系统(无外光反馈)中激光器完全同步的恢复时间约为

200 ps,闭环系统(有光反馈)中激光器完全同步的CRT比开环系统高出2~3个量级,且随着反馈延时的增加而增大。Uchida等^[19]数值研究发现了完全同步的CRT正比于注入混沌波形的最大李雅普诺夫指数,而强注入锁定同步的CRT不会受到注入混沌波形复杂度的影响。Sasaki等^[12]实验发现了光子集成的光反馈半导体激光器在注入锁定同步状态下的CRT约为68 ns,说明减小反馈延时并不能缩短CRT。Jiang等^[15]基于VCSEL的混沌密钥分发进行数值研究,当注入光偏振角在90°与0°两者间键控混沌同步状态时,闭环系统的CRT范围为(13±5) ns。目前,基于VCSEL的CRT未得到系统地研究,激光器CRT的关键影响因素也鲜有报导。

上述关于CRT的研究主要集中在边发射半导体激光器。目前,由于VCSEL具有独特的偏振动态特性和大带宽,在混沌保密通信领域中备受关注^[15,20-24]。本文采用数值方法研究开环注入锁定同步系统中VCSEL的CRT,详细分析激光器的参数和注入参数对CRT的影响,初步明确缩短CRT的途径。

2 理论模型

图1(a)为基于VCSEL的单向开环混沌同步系统。主激光器(M-VCSEL)在反射镜的反馈下产生混沌激光,通过光隔离器后单向注入到不带反馈的从激光器(S-VCSEL)中。其中参数 k_i 和 τ_i 表示主激光器的反馈速率和反馈延时, k_j 和 τ_j 表示从激光器的注入速率和注入延时。

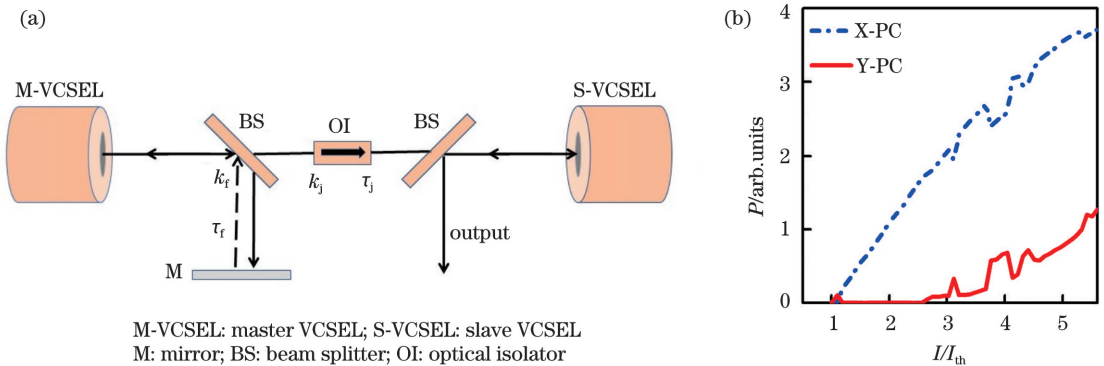


图1 开环系统结构和VCSEL的性能曲线。(a)基于VCSEL的单向开环同步系统;(b)自由运行VCSEL的P-I特性曲线
Fig. 1 Open-loop system structure and VCSEL performance curves. (a) Unidirectional open-loop synchronization system based on VCSEL; (b) P-I characteristic curves of free-running VCSEL

由于VCSEL的有源区存在各向异性,所以可能存在两个正交的偏振分量。基于自旋翻转模

型^[25],M-VCSEL和S-VCSEL的速率方程可以表示为

$$\frac{dE_{1x,1y}}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N_1 - 1)E_{1x,1y} \pm in_1 E_{1y,1x}] \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{1x,1y} + k_f E_{1x,1y}(t - \tau_f) + \sqrt{\beta_{SP}} \xi_{1x,1y}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_{2x,2y}}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N_2 - 1)E_{2x,2y} \pm in_2 E_{2y,2x}] \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{2x,2y} + k_j E_{1x,1y}(t - \tau_j) e^{i2\pi\Delta\nu t} + \sqrt{\beta_{SP}} \xi_{2x,2y}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_{1,2}}{dt} = \gamma_N [\mu - N_{1,2}(1 + |E_{1x,2x}|^2 + |E_{1y,2y}|^2) + in_{1,2}(E_{1x,2x}E_{1y,2y}^* - E_{1y,2y}E_{1x,2x}^*)], \quad (3)$$

$$\frac{dn_{1,2}}{dt} = -\gamma_s n_{1,2} - \gamma_N [n_{1,2}(|E_{1x,2x}|^2 + |E_{1y,2y}|^2) + iN_{1,2}(E_{1y,2y}E_{1x,2x}^* - E_{1x,2x}E_{1y,2y}^*)], \quad (4)$$

式中:下标 1 和 2 分别表示 M-VCSEL 和 S-VCSEL;下标 x 和 y 分别表示 X-PC 和 Y-PC; N 表示载流子数; n 表示自旋反转的载流子数之差; ξ 表示服从标准正态分布的高斯白噪声; t 表示时刻; $\Delta\nu$ 表示 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的光频失谐, $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$; μ 表示电流参量, $\mu = 1 + (\tau_n/\tau_e)[(I/I_{th}) - 1]/[1 - N_0/N_{th}]$ ^[26];其他参数含义如表 1 所示^[27-29]。(1)式和(2)式右边第三项分别为 M-VCSEL 的反馈项和

S-VCSEL 的注入项,第四项为自发辐射噪声。为了简便计算,设置阈值处差分载流子寿命与载流子寿命的比值,即 $\tau_n/\tau_e = 0.4$ ^[27],注意载流子衰减速率 $\gamma_N = 1/\tau_n$ 。

模拟过程中采用 4 阶 Runge-Kutta 法求解(1)~(4)式,积分步长为 2 ps。VCSEL 的参量及取值如表 1 所示。此外,由于注入延时不会影响混沌同步的恢复时间,因此实验设置 $\tau_j = 0$ ns。

 表 1 VCSEL 的模拟参数值^[27-29]

 Table 1 VCSEL simulation parameter values^[27-29]

Symbol	Parameter	Value
k/ns^{-1}	Field decay rate	300
α	Linewidth enhancement factor	3
γ_a/ns^{-1}	Linear dichroism	0.5
γ_p/ns^{-1}	Linear birefringence	30
γ_N/ns^{-1}	Carrier decay rate	1
γ_s/ns^{-1}	Spin-flip relaxation rate	50
λ/nm	Central wavelength	850
$\beta_{SP}/\text{ns}^{-1}$	Spontaneous emission rate	10^{-6}
μ	μ parameter	$\mu = 1 + (\tau_n/\tau_e)[(I/I_{th}) - 1]/[1 - N_0/N_{th}]$
τ_n/τ_e	Ratio of differential carrier lifetime and carrier lifetime at threshold	0.4
e/C	Electric charge	1.602×10^{-19}
Γ	Confinement factor	0.21
$g/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Gain coefficient	2×10^{-12}
V/m^3	Active region volume	0.44×10^{-18}
N_0/m^{-3}	Transparency carrier density	2.5×10^{24}
N_{th}/m^{-3}	Threshold carrier density	$N_{th} = N_0 + 2k/\Gamma g$
I_{th}/mA	Threshold current	$I_{th} = eVN_{th}/\tau_e = 0.4eVN_{th}\gamma_N$
I/mA	Bias current	Variable
k_f/ns^{-1}	Feedback rate	5
τ_f/ns	Feedback delay time	3

图 1(b)为 VCSEL 自由运行 X 偏振模式(X-PC)和 Y 偏振模式(Y-PC)的功率-偏置电流(P - I)曲线,功率 $P = |E|^2$,其中 E 表示光场的慢

变复振幅, I_{th} 表示阈值电流。从图 1 可以看到,当偏置电流在 $1.19I_{th} \sim 2.56I_{th}$ 之间时,Y-PC 值极小可以忽略;在更高的偏置电流下,双偏振模式共存且

X-PC 占主导地位。为此选择 $1.92I_{th}$ 和 $3.76I_{th}$ 两种偏置电流,分别作为单偏振模和双偏振模的典型状态,研究 VCSEL 的 CRT。模拟结果发现,在这两个偏置电流下,通过调节注入速率 k_j 均可实现主、从激光器的互相关系数超过 0.9 的混沌同步。

3 数值模拟结果

3.1 混沌同步恢复时间

键控注入速率为 k_j 的同步恢复瞬态过程及其 CRT 计算方法,如图 2 所示。当 k_j 在 0 ns^{-1} 和 200 ns^{-1} 阶跃变化时, $\Delta\nu = -15 \text{ GHz}$ 。图 2(a) 为注入速率的阶跃信号和 M-VCSEL 混沌的输出功率 P_1 ,图 2(b)和图 2(c)分别为 S-VCSEL 在注入阶跃信号下的输出功率 P_2 和同步误差 $P_1 - P_2$,其中

P_1 和 P_2 均为归一化功率,当激光器混沌同步时, $P_1 - P_2 \simeq 0$ 。考虑到当注入锁定时激光器不能实现完全同步,CRT 定义为注入速率阶跃时刻到同步误差收敛到 ± 0.1 的时间跨度^[19]。图 2 中 image 1 为激光器在 $1.92I_{th}$ 下 X-PC 的结果, image 2 和 image 3 分别为激光器在 $3.76I_{th}$ 下 X-PC 和 Y-PC 的结果。VCSEL 在 $1.92I_{th}$ 下 X-PC 的 CRT 为 66 ps,如图 2(c) image 1 所示。VCSEL 在 $3.76I_{th}$ 下 X-PC 和 Y-PC 的 CRT 分别为 58 ps 和 44 ps,如图 2(c) image 2 和 image 3 所示。初步结果表明,X-PC 的 CRT 随着偏置电流的增加而降低。考虑到 X-PC 占主导地位且 CRT 大于 Y-PC,为了简便起见,下面分析系统参数对 X-PC 的 CRT 的影响。

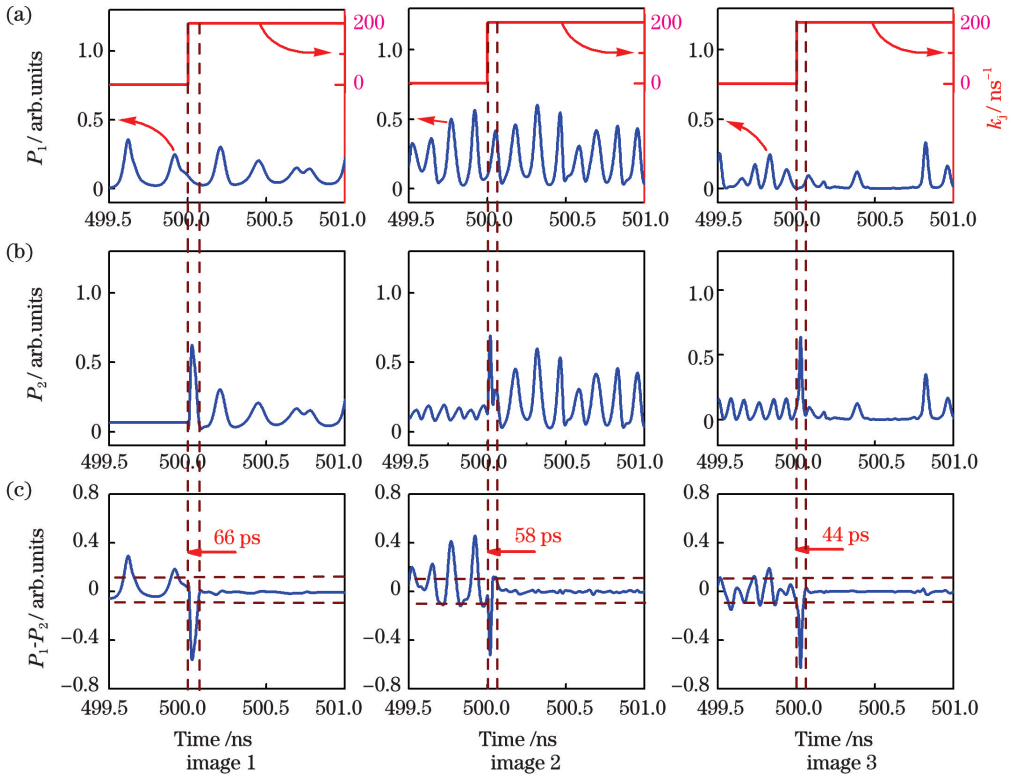


图 2 同步恢复瞬态过程及 CRT 计算方法。(a)注入速率的阶跃变化和 M-VCSEL 的归一化强度;
(b)S-VCSEL 的归一化强度;(c)同步误差

Fig. 2 Resynchronization transient process and CRT calculation method. (a) Step change of injection rate and normalized intensity of M-VCSEL; (b) normalized intensity of s-vcsel; (c) synchronization error

3.2 激光器参数影响

混沌同步恢复是激光器的暂态过程,其持续时间应与激光器弛豫振荡频率有关联。由于 VCSEL 的弛豫振荡频率 f_{RO} 可以表示为^[26,30]

$$f_{RO} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2k\gamma_N(\mu - 1)} =$$

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{0.8k\gamma_N \frac{I/I_{th} - 1}{1 - N_0/(N_0 + 2k/\Gamma_g)}} \quad (5)$$

由(5)可知,首先研究 I/I_{th} 、载流子衰减速率 γ_N 、光子衰减速率 k 和增益系数 g 等参数对 X-PC 的 CRT 的影响。设定 $k_j = 200 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta\nu = -15 \text{ GHz}$ 、 $I = 3.76I_{th}$ 、 $\gamma_N = 1 \text{ ns}^{-1}$ 、 $k = 300 \text{ ns}^{-1}$

和 $g = 2 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 选择其中一个作为变量并固定其他参数来分析 CRT 的变化, 结果如图 3 所示。由于受到自发辐射噪声的影响, 每个参数均重复测试 20 次, 图中使用点表示 CRT 的均值, 误差棒表示 CRT 的标准偏差。由于光注入会增加激光器的弛豫振荡频率, 为了研究在光注入锁定系统中弛豫振荡和 CRT 之间的关系, 模拟计算相同参数在连续光注入锁定下激光器的弛豫振荡周期 (ROT)^[31], 如图 3 所示。

随着 I 值的增加, X-PC 的 CRT 均值逐渐降低, 当 $I > 2.4I_{\text{th}}$ 时, CRT 均值稳定在 50 ps, 标准偏差逐渐降低在 30 ps 以内; 激光器的 ROT 呈现相似的趋势, 当 $I < 2.4I_{\text{th}}$ 时, CRT 均值迅速衰减, 当 $I > 2.4I_{\text{th}}$ 时, CRT 均值缓慢下降至约为 80 ps, 如图 3(a) 所示。随着 γ_N 值的增加, CRT 逐渐减小并在 $\gamma_N > 1 \text{ ns}^{-1}$ 后趋于稳定, 说明 CRT 的标准偏差相对稳定且不受 γ_N 的影响, 如图 3(b) 所示。随着 k 值的增加, CRT 呈现近似线性且缓慢减小的趋势, 但变化幅度相对更小, 如图 3(c) 所示。随着 g 值的增加, CRT 逐渐降低且标准偏差趋于稳定, 如图 3(d) 所示。比较图 3(b)~(d), 可以看到 CRT 和 ROT 具有相似的演变趋势。模拟结果表明, 当 ROT 小于 150 ps 时, 可以实现 CRT 在 50 ps 以下。

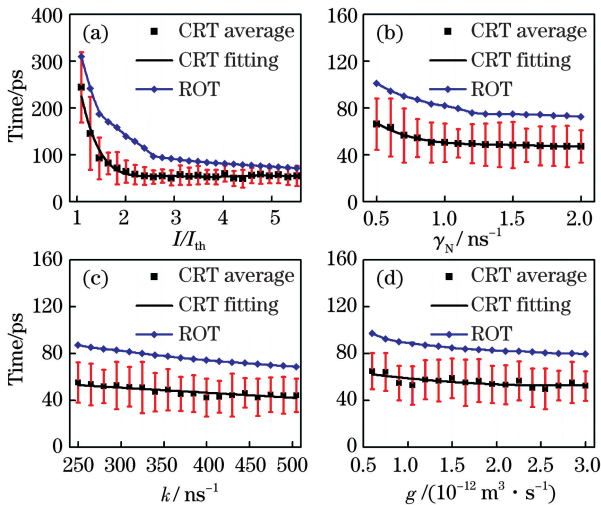


图 3 不同激光器参数对 X-PC 的 CRT 的影响。

(a) I/I_{th} ; (b) γ_N ; (c) k ; (d) g

Fig. 3 Influence of different laser parameters on CRT in X-PC. (a) I/I_{th} ; (b) γ_N ; (c) k ; (d) g

图 4 为图 3 的 CRT 均值与 ROT 之间的关系, 其中直线为线性拟合曲线。由图 3 可知, 当 $I > 2.4I_{\text{th}}$ 时, 两者随着电流的增大而变化缓慢, 且恢复时间趋于平稳, 故仅对 $I < 2.4I_{\text{th}}$ 的数据进行

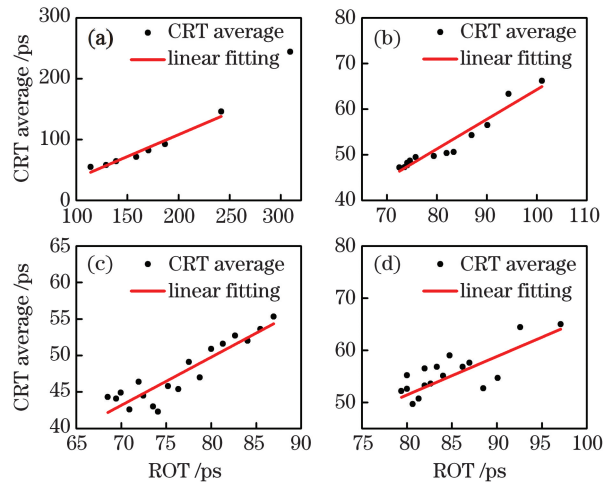


图 4 不同激光器参数下 X-PC 中 CRT 和 ROT 的关系。

(a) I/I_{th} ; (b) γ_N ; (c) k ; (d) g

Fig. 4 Relationship between CRT and ROT in X-PC under different laser parameters. (a) I/I_{th} ; (b) γ_N ; (c) k ; (d) g 拟合以表征两者之间的关系。从图 4 可以看到, 在 I/I_{th} 、 γ_N 、 k 和 g 4 种参数的独立影响下, 激光器的 CRT 均值与 ROT 的线性拟合斜率 s 约为 0.65~0.73, 拟合优度 R^2 为 0.80~0.95, 表明 CRT 均值小于且近似正比于 ROT。根据模拟结果, 可以通过增加偏置电流与有源区增益系数, 或者降低载流子寿命与光子寿命等途径, 降低 ROT, 缩短 CRT。

图 5 为在 $I = 3.76I_{\text{th}}$, $k_j = 200 \text{ ns}^{-1}$ 和 $\Delta\nu = -15 \text{ GHz}$ 的情况下, 激光器中的线宽增强因子 α 、二色性系数 γ_a 、双折射性系数 γ_p 和自旋反转速率 γ_s 对 X-PC 中 CRT 的影响。从图 5 可以看到, CRT

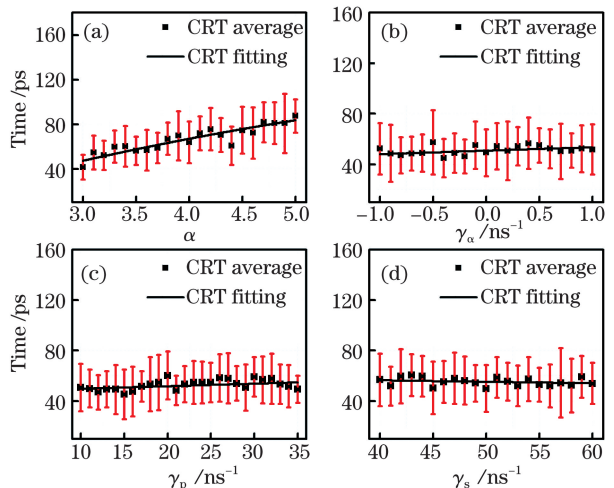


图 5 不同激光器参数对 X-PC 的 CRT 影响。

(a) α ; (b) γ_a ; (c) γ_p ; (d) γ_s

Fig. 5 Influence of different laser parameters on CRT in X-PC. (a) α ; (b) γ_a ; (c) γ_p ; (d) γ_s

仅随着 α 值的增加而缓慢增加,而不受 γ_a 、 γ_p 和 γ_s 参数的影响。其中 γ_a 表征晶体各向不等的增益损耗比,使得 X-PC 与 Y-PC 具有不同的阈值电流; γ_p 表征两个偏振模式具有不同的折射率,使得 X-PC 与 Y-PC 存在一定的模式频率差; γ_s 表征自旋翻转的弛豫过程,决定 X-PC 与 Y-PC 跳变过程的快慢。由此可推断偏振模式之间的偏振特性对单个模式的 CRT 没有影响。从图 5 可以看到,当 $\alpha \leq 4.0$ 时, CRT 能够降至 50 ps 以下。然而, CRT 随着 α 值的增加而增大,原因在于当 α 因子较大时,激光混沌的复杂度更高,导致键控过程同步恢复的时间变慢。因此,可以设计小线宽增强因子的半导体激光器以获得更短的 CRT。

3.3 注入参数影响

注入锁定型混沌同步的 CRT 不受主激光器的反馈速率和反馈时延的影响,因此主要研究注入参数 k_j 和 $\Delta\nu$ 对 X-PC 中 CRT 的影响,如图 6 所示。主、从激光器的注入参数初始设置为 $k_j = 200 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta\nu = -15 \text{ GHz}$ 和 $I = 3.76I_{th}$,其他参数如表 1 所示。

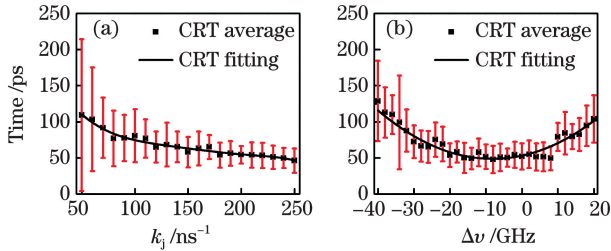


图 6 不同注入参数对 X-PC 中的 CRT 影响。

(a) k_j ; (b) $\Delta\nu$

Fig. 6 Influence of different injection parameters on CRT in X-PC. (a) k_j ; (b) $\Delta\nu$

随着注入速率的增加, CRT 呈近似线性且下降的趋势, CRT 的标准偏差逐渐减小,如图 6(a) 所示。当主、从激光器的光频失谐的取值范围为 $-20 \sim 10 \text{ GHz}$ 时,混沌同步恢复时间的均值稳定于最小值,如图 6(b) 所示。在此范围之外, CRT 随着频率失谐的增大而快速增加。在 $k_j \geq 50 \text{ ns}^{-1}$ 、 $-30 \text{ GHz} < \Delta\nu < 10 \text{ GHz}$ 的情况下,可以实现 CRT 在 50 ps 以下。实验结果表明,强注入锁定(高注入速率和低频率失谐)可以缩短 CRT,原因在于强注入锁定会增加弛豫振荡频率及其阻尼强度,从而加快激光器的弛豫过程,缩短 CRT。

4 讨 论

第 3 节的结果仅分析占主导地位的 X-PC 中的 CRT 受激光器参数和系统注入参数的影响。接下来,讨论 Y-PC 中的 CRT 随着参数 I/I_{th} 、 k_j 和 $\Delta\nu$ 的变化。本节主要探讨不同偏振模式对 CRT 的影响是否相同,因此不再一一列举每个参数对 Y-PC 恢复时间的影响,结果如图 7 所示。图 7(a) 为 Y-PC 的 CRT 随着偏置电流的增加而减小,且在 1.7 倍阈值电流后趋于稳定。需要注意的是,当 Y-PC 在 I 的取值范围为 $1.19I_{th} \sim 2.56I_{th}$ 时,起振的幅值极小可以忽略不计,因此在此区间内不存在 CRT。图 7(b) 为 CRT 随着注入速率的增加呈近似线性且下降的趋势。图 7(c) 为在大的失谐频率下, CRT 值逐渐增加。针对 Y-PC 与图 3(a)、图 6(a) 和图 6(b) X-PC 的结果,表明两个偏振模式在各参数影响下的 CRT 具有相似的趋势,进一步证明 VCSEL 的偏振模式对 CRT 没有影响。

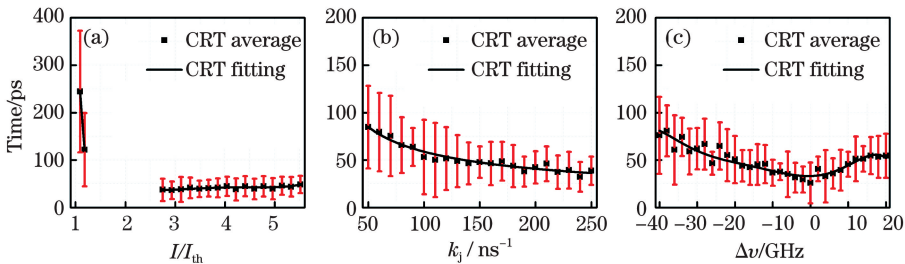


图 7 不同激光器参数对 Y-PC 的 CRT 影响。(a) I/I_{th} ; (b) k_j ; (c) $\Delta\nu$

Fig. 7 Influence of different laser parameters on CRT in Y-PC. (a) I/I_{th} ; (b) k_j ; (c) $\Delta\nu$

5 结 论

对 VCSEL 在开环注入锁定同步类型下的 CRT 进行数值研究,详细研究激光器参数和注入参数对

CRT 的影响,并讨论不同偏振模式对 CRT 的影响。结果表明, CRT 主要受到弛豫振荡周期、线宽增强因子、注入锁定强度和频率失谐的影响,而偏振特性和偏振模式对 CRT 没有影响。若要缩短 CRT,可

以优化激光器参数,如增大偏置电流、有源区的增益系数、减小载流子寿命和光子寿命来缩短半导体激光器的弛豫振荡周期;选取较小的线宽增强因子可以保持激光器具有低的复杂度;也可以通过优化注入参数,如增加注入强度和减小频率失谐使激光器快速进入注入锁定状态。当 ROT 小于 150 ps、 $\alpha \leq 4$ 、 $k_j \geq 50 \text{ ns}^{-1}$ 和 $-30 \text{ GHz} < \Delta\nu < 10 \text{ GHz}$ 时, VCSEL 的 CRT 在 50 ps 以下,说明有望通过 VCSEL 来实现 Gbit/s 的混沌密钥分发。

参 考 文 献

- [1] Van Wiggeren G D. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, 279(5354): 1198-1200.
- [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] Lavrov R, Jacquot M, Larger L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10 Gb/s chaos communications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(10): 1430-1435.
- [4] Argyris A, Bourmpos M, Syvridis D. Experimental synchrony of semiconductor lasers in coupled networks[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5600-5614.
- [5] Li Q, Deng T, Wu Z M, et al. Security-enhanced bidirectional long-distance chaos secure communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0106001.
李琼, 邓涛, 吴正茂, 等. 安全性增强的双向长距离混沌保密通信[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0106001.
- [6] Li Z, Feng Y L, Yao Z H. Auto correlation and bandwidth research of chaotic laser from semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021405.
李增, 冯玉玲, 姚治海. 半导体激光器输出混沌光的自相关性及其带宽研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021405.
- [7] 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.
- [8] Lü T S, Yang Q, Yu X Y, et al. 50 GHz broadband chaotic signal generator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 131403.
吕天爽, 杨强, 于小雨, 等. 50 GHz 宽带混沌信号发生器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 131403.
- [9] Wang D M, Wang L S, Guo Y Y, et al. Key space enhancement of optical chaos secure communication: chirped FBG feedback semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3065-3073.
- [10] Yoshimura K, Muramatsu J, Davis P, et al. Secure key distribution using correlated randomness in lasers driven by common random light[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(7): 070602.
- [11] Koizumi H, Morikatsu S, Aida H, et al. Information-theoretic secure key distribution based on common random-signal induced synchronization in unidirectionally-coupled cascades of semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17869-17893.
- [12] 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.
- [13] Xue C P, Jiang N, Lv Y, et al. Secure key distribution based on dynamic chaos synchronization of cascaded semiconductor laser systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 65(1): 312-319.
- [14] Xue C P, Jiang N, Qiu K, et al. Key distribution based on synchronization in bandwidth-enhanced random bit generators with dynamic post-processing [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14510-14519.
- [15] Jiang N, Xue C P, Liu D, et al. Secure key distribution based on chaos synchronization of VCSELs subject to symmetric random-polarization optical injection [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1055-1058.
- [16] Zhao Z X, Cheng M F, Luo C K, et al. Semiconductor-laser-based hybrid chaos source and its application in secure key distribution [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2605-2608.
- [17] Xu M F, Pan W, Zhang L Y. Secure remote synchronization and secure key distribution in electro-optic networks revealed by symmetries [J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 41-45.
- [18] Vicente R, Pérez T, Mirasso C R. Open-versus closed-loop performance of synchronized chaotic external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(9): 1197-

- 1204.
- [19] Uchida A, Shibasaki N, Nogawa S, et al. Transient characteristics of chaos synchronization in a semiconductor laser subject to optical feedback [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(5): 056201.
- [20] Hong Y H, Lee M W, Paul J, et al. GHz bandwidth message transmission using chaotic vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(22): 5099-5105.
- [21] Deng T, Xia G Q, Wu Z M. Broadband chaos synchronization and communication based on mutually coupled VCSELs subject to a bandwidth-enhanced chaotic signal injection [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 76(1): 399-407.
- [22] Li N Q, Susanto H, Cemlyn B, et al. Secure communication systems based on chaos in optically pumped spin-VCSELs [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3494-3497.
- [23] Zhang H, Guo X X, Xiang S Y. Key distribution based on unidirectional injection of vertical cavity surface emitting laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(20): 204202.
张浩, 郭星星, 项水英. 基于单向注入垂直腔面发射激光器系统的密钥分发 [J]. *物理学报*, 2018, 67(20): 204202.
- [24] Ding Z Y, Fan L, Chen J J. Generation of wide-bandwidth polarized chaotic signals based on VCSEL subject to dual chaotic optical injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0214002.
丁珠玉, 樊利, 陈建军. 双混沌光注入 VCSEL 获取宽带宽偏振混沌信号 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0214002.
- [25] Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(5): 765-783.
- [26] Quirce A, de Dios C, Valle A, et al. Polarization dynamics in VCSEL-based gain switching optical frequency combs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(10): 1798-1806.
- [27] Pérez P, Valle A, Pesquera L. Polarization-resolved characterization of long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser parameters [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(11): 2574-2480.
- [28] Xiang S Y, Pan W, Yan L S, et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers subject to feedback with variably rotated polarization angle [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5176-5183.
- [29] Xiang S Y, Pan W, Yan L S, et al. Impact of unpredictability on chaos synchronization of vertical-cavity surface-emitting lasers with variable-polarization optical feedback [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3497-3499.
- [30] Xiao P, Wu Z M, Wu J G, et al. Time-delay signature concealment of chaotic output in a vertical-cavity surface-emitting laser with double variable-polarization optical feedback [J]. *Optics Communications*, 2013, 286: 339-343.
- [31] Murakami A, Kawashima K, Atsuki K. Cavity resonance shift and bandwidth enhancement in semiconductor lasers with strong light injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(10): 1196-1204.