

双混沌光注入 VCSEL 获取宽带偏振混沌信号

丁珠玉¹, 樊利², 陈建军^{3*}

¹西南大学工程技术学院, 重庆 400715;

²西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715;

³新疆医科大学医学工程技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 基于自旋反转模型(SFM), 理论研究了双混沌光注入时偏振混沌信号的带宽特性。研究表明, 与单混沌光注入方式相比, 双混沌光注入方式可减弱注入锁定效应, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)可在注入强度和频率失谐参数空间的更大范围内获得偏振宽带混沌信号。对于给定的注入强度, 当双混沌光的两个频率失谐绝对值同为较大值时, 系统更易产生宽带的偏振混沌; 对于给定的频率失谐, 系统可在两个注入强度参数空间的特定区域内实现宽带混沌输出, 且正的频率失谐条件更有利于该区域的扩展。

关键词 激光器; 偏振混沌; 混沌光注入; 带宽; 垂直腔面发射激光器(VCSEL)

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0214002

Generation of Wide-Bandwidth Polarized Chaotic Signals Based on VCSEL Subject to Dual Chaotic Optical Injection

Ding Zhuyu¹, Fan Li², Chen Jianjun^{3*}

¹College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

³School of Medical Engineering and Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract Based on the spin flip model (SFM), the bandwidth characteristics of the polarized chaotic signals generated subject to dual chaotic optical injection are studied theoretically. The research results show that, in contrast with the case of single chaotic optical injection, the dual chaotic optical injection weakens the injection locking effect, and the vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) can achieve wideband polarized chaotic signals in a wider range of the parameter space of injection intensity and frequency detuning. Under the given injection intensity, when two frequency detunings associated with the dual chaotic optical injection possess large absolute values, the system is more inclined to produce wide-bandwidth polarized chaos. Under the given frequency detuning, the specific region in the parameter space of two injection intensities required for generating wideband chaos can be determined and expanded if a positive frequency detuning is chosen.

Key words lasers; polarized chaos; chaotic optical injection; bandwidth; vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL)

OCIS codes 140.5960; 140.7260; 190.3100; 190.4360

1 引 言

作为一类特殊的非线性动力学态, 激光混沌具有类似噪声的不规则振荡、对初值极为敏感、相干时间短等特点, 在光混沌保密通信、高速物理随机数获取、光混沌雷达等领域有着良好的应用前景^[1-6]。

通常情况下, 研究者采用光反馈、光注入或光电反馈等外部扰动半导体激光器(SL)来获得混沌光的信号输出。已有的研究表明, 采用连续光注入 SL 可获得宽带的混沌信号, 但该架构产生混沌所对应的注入强度和频率失谐条件仅局限于较小的参数区域^[7-8]; 相比较而言, 具有无限维度扰动特点的光

收稿日期: 2018-08-16; 修回日期: 2018-09-11; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(31760269, 61640004)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01C162)、重庆市自然科学基金(CSTC2016jcyjA0575)

* E-mail: cjjliyan@163.com

反馈或光电反馈 SL 可在较大参数范围实现混沌输出,但受限于 SL 自身的弛豫振荡频率,混沌信号带宽通常仅为几个吉赫兹^[9-10]。近年来,社会信息化进程不断加快,光通信技术正朝着安全、超高速、超大容量的方向快速发展。除了利用光注入方式提高 SL 输出混沌信号的带宽外,研究人员还对多扰动或复合扰动条件下 SL 输出宽带混沌信号进行了大量研究^[8-9,11-16]。例如,Yan^[12]提出了利用双外腔光反馈 SL 来提高 SL 的弛豫振荡频率,选择合理的反馈参数可以在一定程度上提高 SL 输出混沌信号的带宽;Wang 等^[9]采用连续光注入一个光反馈 SL 的办法来增加其输出带宽,得到了 3 倍于单一光反馈 SL 输出的混沌带宽;Zhang 等^[14]在此架构的基础上利用双波长连续光注入法布里-珀罗(F-P)外腔激光器的方式获得了带宽高达 32.3 GHz 的混沌输出,远高于无光注入 F-P 外腔输出混沌的带宽。相关的研究还发现,在选择合理参数的情况下,一个基于单混沌光注入(SCOI)的主副 SLs 系统可在合适参数范围内输出宽带混沌信号,其功率谱平坦且具有较小的时延特征峰。相比较而言,此类混沌信号更适用于光混沌保密通信以及高速随机数的获取^[15]。此外,如果采用双混沌光注入(DCOI)的方式,还可进一步增强该系统输出混沌信号的带宽,与 SCOI 情形相比,DCOI 可在更大参数范围内实现宽带混沌信号的输出^[16]。

虽然研究人员在基于外部扰动 SL 获取宽带混沌信号方面取得了很大进展,但其混沌光源大多采用常规边发射型 SL,系统通常仅输出一组混沌信号,其传输速率在硬件方面受到传输信道数目的限制。因此,不论从成本还是从应用层面来考虑,探索双路甚至多路宽带混沌信号输出装置将更有利于

突破器件的物理性能瓶颈。近年来,研究人员开始关注垂直腔面发射激光器(VCSEL),此类激光器具有低阈值、低损耗、高效率、单一纵模工作、易于集成高密度二维阵列等独特优点^[17-19],正逐渐成为重要的激光光源之一。特别地,VCSEL 可在特定偏置电流和外部扰动作用下呈现基横模的双偏振特性^[20-23],其每一偏振分量可作为混沌信号的输出信道,这为获取双路甚至多路混沌信号开辟了新的途径^[24-26]。基于以上考虑,本文通过将两个带有光反馈的主 VCSELs(M-VCSEL1, M-VCSEL2)产生的混沌光注入另一个副 VCSEL(S-VCSEL)来产生宽带混沌信号,数值研究了系统输出双路偏振混沌信号的带宽随系统参数的变化规律,并确定获取宽带偏振混沌信号的参数空间范围。

2 理论模型

图 1 为双混沌光注入 VCSEL 系统的结构示意图。M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 输出的光信号分别经由准直透镜(AL1、AL2)后各自被分束器(BS1、BS2)分成两部分。M-VCSEL1 输出的一部分光经中性密度衰减片(NDF1)和平面镜(M1)反馈回激光器;另一部分则经 NDF3、光隔离器(ISO1)和 BS3 后注入进 S-VCSEL。同样地,M-VCSEL2 输出的光信号经由类似的光路后注入进 S-VCSEL,由此构成 DCOI 系统。NDF1、NDF2 分别用于调节 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 反馈腔的反馈强度;NDF3、NDF4 则用于调节 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 输出光注入到 S-VCSEL 的强度;ISO1 和 ISO2 用来确保光单向传输。如果将图 1 虚线框以内 M-VCSEL2 对应的光路移除,则系统变为 SCOI 结构。

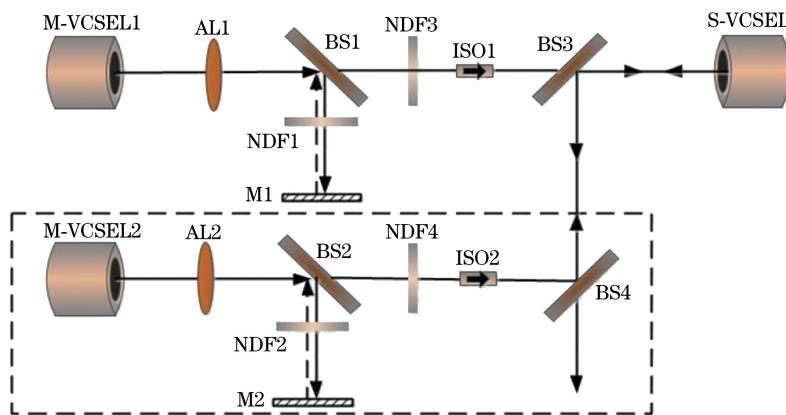


图 1 双混沌光注入 VCSEL 系统的光路示意图

Fig. 1 Schematic of VCSEL system subject to dual chaotic optical injection

基于自旋反转模型(SFM)^[27],考虑光反馈作用下的 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2、以及光注入下的

S-VCSEL,双混沌光注入 VCSEL 系统的速率方程组可描述为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^{M1,M2}}{dt} = & k^{M1,M2} (1 + i\alpha^{M1,M2}) [(N^{M1,M2} - 1)E_{x,y}^{M1,M2} \pm in^{M1,M2}E_{y,x}^{M1,M2}] + \sqrt{\beta_{sp}} \xi_{x,y}^{M1,M2} \mp \\ & (\gamma_a^{M1,M2} + i\gamma_p^{M1,M2})E_{x,y}^{M1,M2} + k_{f1}E_{x,y}^{M1}(t - \tau_{f1})\exp(-i2\pi\nu^{M1}\tau_{f1}) + \\ & k_{f2}E_{x,y}^{M2}(t - \tau_{f2})\exp(-i2\pi\nu^{M2}\tau_{f2}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^S}{dt} = & k^S (1 + i\alpha^S) [(N^S - 1)E_{x,y}^S \pm in^SE_{y,x}^S] \mp (\gamma_a^S + i\gamma_p^S)E_{x,y}^S + \sqrt{\beta_{sp}} \xi_{x,y}^S + \\ & \eta_{SCOI}E_{x,y}^{M1}(t - \tau_\eta)\exp(-i2\pi\nu^{M1}\tau_\eta + i2\pi\Delta\nu t) + \\ & \eta_1E_{x,y}^{M1}(t - \tau_{\eta1})\exp(-i2\pi\nu^{M1}\tau_{\eta1} + i2\pi\Delta\nu_1 t) + \\ & \eta_2E_{x,y}^{M2}(t - \tau_{\eta2})\exp(-i2\pi\nu^{M2}\tau_{\eta2} + i2\pi\Delta\nu_2 t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^{M1,M2,S}}{dt} = & -\gamma_e^{M1,M2,S} [N^{M1,M2,S} (1 + |E_x^{M1,M2,S}|^2 + |E_y^{M1,M2,S}|^2) - \\ & u^{M1,M2,S} + in^{M1,M2,S} (E_y^{M1,M2,S}E_x^{M1,M2,S*} - E_x^{M1,M2,S}E_y^{M1,M2,S*})], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{M1,M2,S}}{dt} = & -\gamma_s^{M1,M2,S} n^{M1,M2,S} - \gamma_e^{M1,M2,S} [n^{M1,M2,S} (|E_x^{M1,M2,S}|^2 + |E_y^{M1,M2,S}|^2) + \\ & iN^{M1,M2,S} (E_y^{M1,M2,S}E_x^{M1,M2,S*} - E_x^{M1,M2,S}E_y^{M1,M2,S*})], \end{aligned} \quad (4)$$

式中:上标 M1、M2 和 S 分别表示 M-VCSEL1、M-VCSEL2 和 S-VCSEL;下标 x 和 y 分别表示 VCSELs 的 x 偏振分量(x -PC)和 y 偏振分量(y -PC), x -PC 和 y -PC 分别对应源区两个正交的晶轴方向; E 为光场的慢变振幅; N 为导带和价带的总反转载流子数密度; n 为自旋向上和自旋向下能级对应的载流子密度之差; k 为光场衰减速率; α 为线宽增强因子; γ_e 为总的载流子衰减率; γ_s 为自旋反转速率; γ_a 和 γ_p 分别为二向色性系数和有源介质双折射系数; k_{f1} 和 k_{f2} 分别为 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 的外腔反馈强度; τ_{f1} 和 τ_{f2} 为对应的光反馈延迟时间; η_{SCOI} 为 SCOI 的注入强度; τ_η 为对应的注入延迟时间; $\Delta\nu = \nu^{M1} - \nu^S$,为注入频率失谐(ν^{M1} 和 ν^S 分别对应于 M-VCSEL1 和 S-VCSEL 的中心频率); η_1 和 η_2 分别为 DCOI 从 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 注入到 S-VCSEL 的注入强度,本研究使用 $\eta_{DCOI}(\eta_{DCOI} = \eta_1 + \eta_2)$ 表示等效总注入强度; $\tau_{\eta1}$ 和 $\tau_{\eta2}$ 为各自的注入延迟时间; $\Delta\nu_1(\Delta\nu_1 = \nu^{M1} - \nu^S)$ 和 $\Delta\nu_2(\Delta\nu_2 = \nu^{M2} - \nu^S, \nu^{M2}$ 对应于 M-VCSEL2 的中心频率)为对应的注入频率失谐; u 为归一化偏置电流; ξ 为高斯白噪声,其平均值为 0,方差为 1; β_{sp} 为自发辐射速率。此外,(2)式等号右边的第四项对应于 SCOI 的注入项,第五和第六项对应于 DCOI 的注入项。

通常,混沌信号的频带宽度定义为功率谱内直

流到总功率的 80% 的频率范围^[9,16,25],但接近直流的功率谱低频区域通常具有相对较小的幅度,因此有时会过高地估计该定义的带宽。为了确保所计算的混沌信号带宽的有效性,本研究将整个功率谱中峰值频率成分取出,通过计算其峰值以下 80% 能量的方式来定义所对应的带宽^[28]。

3 结果与讨论

利用四阶龙格库塔方法对速率方程组进行数值求解,假定所涉及的 VCSELs 具有相同的内部参数,具体取值如下^[29]: $\alpha = 3, k = 300 \text{ ns}^{-1}, \gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}, \gamma_s = 50 \text{ ns}^{-1}, \gamma_a = 0.1 \text{ ns}^{-1}, \gamma_p = 30 \text{ ns}^{-1}, \beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}, \nu^S = 3.529 \times 10^{14} \text{ GHz}$ (对应的中心波长为 850 nm)。为方便研究,设定光反馈下强度 $k_{f1} = k_{f2} = 15 \text{ ns}^{-1}$,反馈延时 $\tau_{f1} = \tau_{f2} = 3 \text{ ns}$,注入光延时 $\tau_{\eta1} = \tau_{\eta2} = 0 \text{ ns}$ 。

在上述参数条件下,自由运行时 VCSEL 的正交偏振分量和总输出平均功率随归一化电流变化的 P - u 曲线如图 2(a)所示。当 u 为 2.7 时,自由运行 VCSEL 输出的 x -PC 和 y -PC 的平均强度相等,此归一化电流情况有利于激光器同时输出两路混沌信号,因此在下面的讨论中, u 的取值为 2.7,此时激光器的弛豫振荡频率 f_R 为 5.08 GHz ($f_R = \sqrt{2k\gamma_e(u-1)}/2\pi$)。此外,VCSEL 有源区对称的结构和增益介质弱的各向异性,将导致 x -PC 和 y -PC 的激射频率存

在差异。图 2(b)和图 2(c)所示分别为 $u=2.7$ 时,自由运行 VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 的输出光谱,可

以看到,VCSEL 输出的两正交偏振分量的基频及次谐波频率并不相等,且对应一定量的频率偏移。

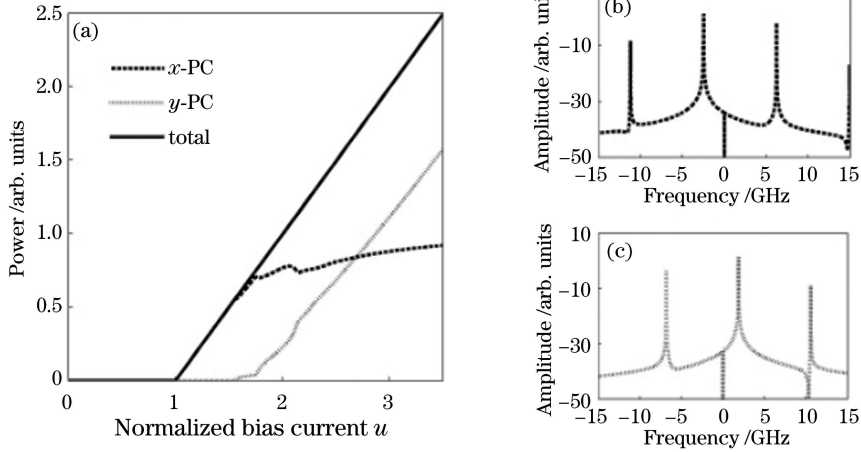


图 2 自由运行时 VCSEL 的偏振输出。(a) P - u 曲线;(b) x -PC 光谱;(c) y -PC 光谱
Fig. 2 Polarized output from free-running VCSEL. (a) P - u curves; (b) optical spectrum of x -PC;
(c) optical spectrum of y -PC

VCSEL 在 SCOI 条件下可实现有效带宽 (EBW)增强的混沌输出^[25]。为保证 SCOI 和 DCOI 的可比性,设定 $\Delta v = \Delta v_1 = \Delta v_2$ 、 $\eta_{\text{SCOI}} = \eta_{\text{DCOI}}$ ($\eta_{\text{DCOI}} = \eta_1 + \eta_2$ 且 $\eta_1 = \eta_2$),如无特别说明,均采用此类参数设置方式,由此来保证 SCOI 和 DCOI 两种架构下的等效总注入条件相同。图 3 所示为 M-VCSEL1 在光反馈作用、S-VCSEL 在 SCOI 作用以及 S-VCSEL 在 DCOI 作用时各自偏振分量输出的时间序列(第一行)及其对应的功率谱(第二行)。其中 SCOI 作用时的参数为: $\Delta v = -20$ GHz, $\eta_{\text{SCOI}} = 80$ ns⁻¹;DCOI 作用时的参数为: $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, $\eta_{\text{DCOI}} = 80$ ns⁻¹ ($\eta_1 = \eta_2 = 40$ ns⁻¹),功率谱中阴影区域为混沌信号的 EBW 提取部分。可以看出,在光反馈作用的 M-VCSEL1、SCOI 作用的 S-VCSEL 以及 DCOI 作用的 S-VCSEL 各自的 x -PC 和 y -PC 输出均处于混沌状态。如图 3(a1)~(a4)所示,M-VCSEL1 在光反馈作用下输出的两个偏振混沌带宽分别为 10.32 GHz 和 10.17 GHz。当系统采用 SCOI 时,如图 3(b1)~(b4)所示,S-VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 输出混沌有效 EBW 分别为 11.70 GHz 和 11.32 GHz,时间序列变化趋势与 M-VCSEL1 的两个偏振分量输出基本相同,此时 S-VCSEL 被锁定,带宽趋近于 M-VCSEL1 的混沌带宽;当采用 DCOI 时,由图 3(c1)~(c4)可知,S-VCSEL 的两个正交偏振分量对应输出混沌的功率谱明显展宽、其能量分布更为平坦,EBW 可分别达

到 20.47 GHz 和 20.42 GHz。以上表征主要是因为 S-VCSEL 在 DCOI 作用下所产生的振荡能量不仅分布于弛豫振荡区域,还由于两次拍频效应产生更为有效的高频振荡,使频域内能量分布更为均匀,注入锁定效应减弱,最终导致 S-VCSEL 输出 EBW 更宽的混沌信号。

图 4 所示为 SCOI 和 DCOI 两种情况下,频率失谐分别取 -20 、 0 、 20 GHz 时,S-VCSEL 输出的两个正交偏振分量的 EBW 随注入强度的变化情况。由图 4(a)和图 4(b)可以看出,对于 SCOI 的情况,当 $\Delta v = -20$ GHz 时,S-VCSEL 输出 x -PC 和 y -PC 的混沌 EBW 在相对较小的 η_{SCOI} 条件下即可进入注入锁定状态,此时对应输出的混沌信号 EBW 将趋近于 M-VCSEL1 输出时的情形;当 $\Delta v = 0$ GHz 和 20 GHz 时,S-VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 在 η_{SCOI} 较大时实现注入锁定,且正频率失谐条件更有利于输出宽带宽混沌信号。在等效注入条件下,DCOI 作用下 S-VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 输出混沌的 EBW 在 η_{DCOI} 相对较小时与 SCOI 情形相似,如图 4(c)和图 4(d)所示,但同时也可以看出,不论频率失谐为负值还是正值,DCOI 条件下两个偏振分量输出混沌的 EBW 在注入强度较大时都明显高于 SCOI 情形,且相应的注入强度范围更宽,其原因主要是双注入结构破坏了系统的注入锁定效应,使得 DCOI 作用下 S-VCSEL 输出的混沌信号时序变化更频繁,频谱被展宽。

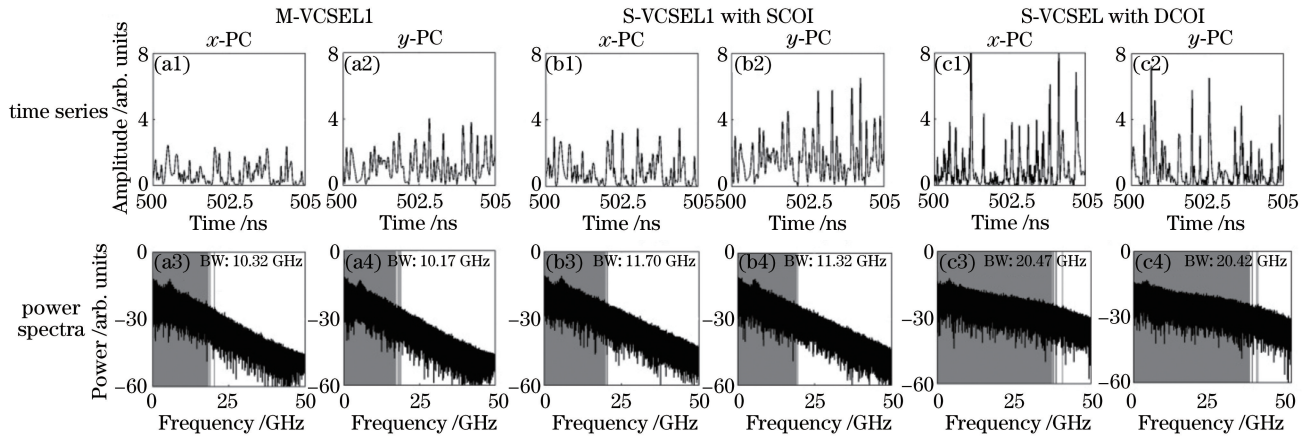


图 3 x -PC 和 y -PC 的时间序列和功率谱。(a1)~(a4) 光反馈作用时的 M-VCSEL1; (b1)~(b4) $\Delta v = -20$ GHz, $\eta_{\text{SCOI}} = 80 \text{ ns}^{-1}$ 时, SCOI 作用下的 S-VCSEL; (c1)~(c4) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, $\eta_{\text{DCOI}} = 80 \text{ ns}^{-1}$ 且 $\eta_1 = \eta_2 = 40 \text{ ns}^{-1}$ 时, DCOI 作用下的 S-VCSEL

Fig. 3 Time series and power spectra of X-PC and Y-PC. (a1)-(a4) M-VCSEL1 with optical feedback; (b1)-(b4) S-VCSEL with SCOI under $\Delta v = -20$ GHz and $\eta_{\text{SCOI}} = 80 \text{ ns}^{-1}$; (c1)-(c4) S-VCSEL with DCOI under $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, $\eta_{\text{DCOI}} = 80 \text{ ns}^{-1}$, and $\eta_1 = \eta_2 = 40 \text{ ns}^{-1}$

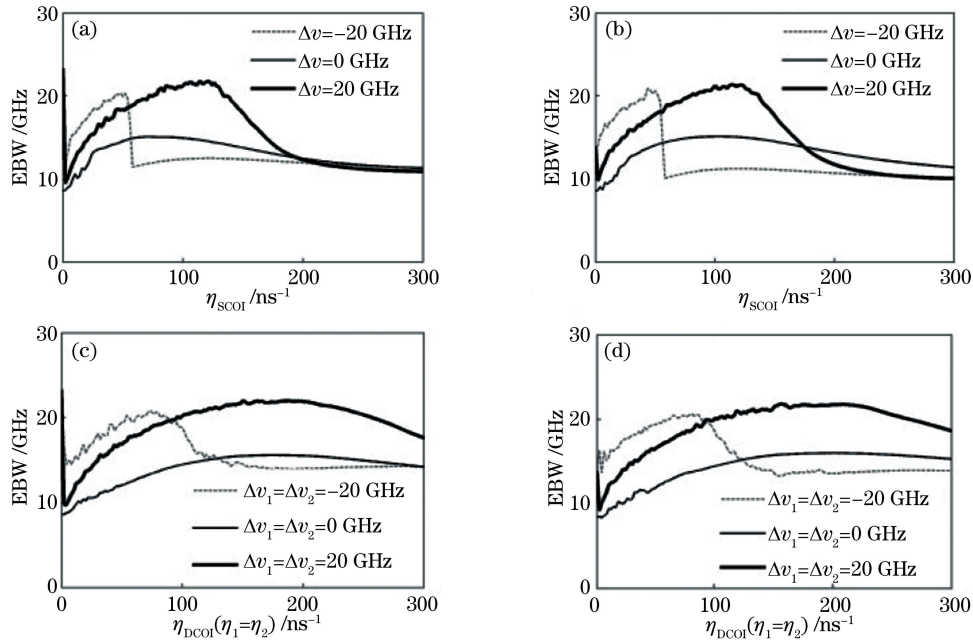


图 4 频率失谐不同时, S-VCSEL 偏振输出的 EBW 随注入强度的变化曲线。(a) SCOI, x -PC (b) SCOI, y -PC; (c) DCOI, x -PC; (d) DCOI, y -PC

Fig. 4 EBW of polarized output from S-VCSEL versus incident intensity under different frequency detunings. (a) SCOI, x -PC; (b) SCOI, y -PC; (c) DCOI, x -PC; (d) DCOI, y -PC

上述结果显示,注入强度和频率失谐对 S-VCSEL 两个偏振分量的 EBW 有着显著的影响。为不失一般性,图 5 分别给出了 SCOI 和 DCOI 作用时, S-VCSEL 输出两个偏振分量的 EBW 在注入强度和频率失谐所构成参数空间内的分布情况,不同的颜色对应于不同的混沌 EBW,黑色虚线表示带宽为 20 GHz 的参数位置,这些虚线把带宽分布图

分成 A、B、C 三个区域。A 区域的混沌信号 EBW 低于 20 GHz,其中深蓝色位置的 EBW 普遍低于 15 GHz; B、C 区域均为带宽高于 20 GHz 的参数区域。从图 5(a)、(b)可以看出,在等效注入的情况下, SCOI 所在的 A 区域大部分处于注入锁定状态,且主要出现在负失谐位置, B 和 C 区域覆盖的参数范围相对较小。对于 DCOI 情况,如图 5(c)、(d)所

示,两个正交偏振分量的带宽在参数空间的变化趋势与 SCOI 相似,但 A 区域范围明显减小,双注入方式导致副激光器难以被主激光器锁定而呈现出较大的带宽;同时 B 和 C 区域覆盖的参数范围明显增大,尤其在频率失谐较大时,随着 η_{DCOI} 的增大, x -PC

和 y -PC 输出混沌的带宽均会显著增大,红色位置处的带宽可达 30 GHz 以上,并且正失谐处宽带宽区域参数范围要大于负失谐情形。以上结果表明,在合适的注入条件下,DCOI 不仅有利于增强混沌信号带宽,还可拓展相应带宽增强的参数区域。

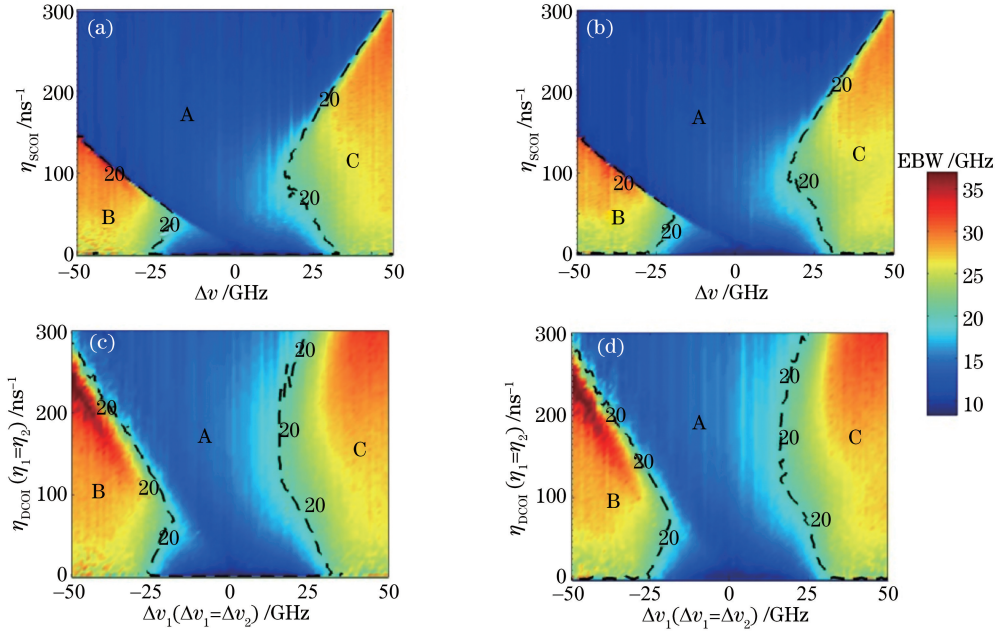


图 5 S-VCSEL 偏振输出的 EBW 在由注入强度和频率失谐构成的参数空间内的分布情况。(a) SCOI, x -PC; (b) SCOI, y -PC; (c) DCOI, x -PC; (d) DCOI, y -PC

Fig. 5 Distribution of polarized output from S-VCSEL in parameter space composed of incident intensity and frequency detuning. (a) SCOI, x -PC; (b) SCOI, y -PC; (c) DCOI, x -PC; (d) DCOI, y -PC

考虑到 DCOI 作用 S-VCSEL 时,频率失谐 Δv_1 和 Δv_2 的变化可能会影响 S-VCSEL 输出的混沌信号,因此有必要进一步考察 Δv_1 和 Δv_2 不同时 EBW 的变化情况。图 6 所示为 $\eta_{\text{DCOI}} = 40 \text{ ns}^{-1}$ ($\eta_1 = \eta_2 = 20 \text{ ns}^{-1}$),DCOI 作用下 S-VCSEL 输出的两个正交偏振分量的混沌信号 EBW 在 Δv_1 和 Δv_2 参数空间的分布情况。可以看出,黑色虚线与边界所围成的 A1~A4 区域的 EBW 均高于 20 GHz。在参数坐标的第一和第三象限,当 Δv_1 和 Δv_2 同为正失谐或负失谐且绝对值相近时,S-VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 可输出高 EBW 的混沌信号;在第二和第四象限,当 Δv_1 和 Δv_2 分别为正失谐和负失谐且绝对值相近时,两偏振方向同样可输出较大 EBW 的混沌信号。这表明在 DCOI 作用时,不论 Δv_1 和 Δv_2 取值的正负,仅当两个频率失谐绝对值同为较大值时,S-VCSEL 更易于产生宽带宽的混沌信号;而当 Δv_1 和 Δv_2 相对较小时,系统输出混沌信号的 EBW 出现显著的下陷。这主要是因为注入强度一定时,较大频率失谐会导致 S-VCSEL 更难以被注入

激光器 M-VCSEL1 或 M-VCSEL2 锁定,此时拍频效应使得能量向频域内的高频部分传递,从而趋使能量分布更为均匀,最终导致 S-VCSEL 输出宽带宽混沌信号。此外,对于注入系数 η_{DCOI} 取其他数值时,S-VCSEL 两个正交偏振分量输出混沌信号的带宽在 Δv_1 和 Δv_2 参数空间内也呈现出类似的变化规律。

同样地,本研究也考察了 DCOI 条件下, η_1 和 η_2 不同时对 S-VCSEL 输出混沌信号带宽的影响。图 7 所示为 $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20 \text{ GHz}$ 和 $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20 \text{ GHz}$ 时,S-VCSEL 输出两个正交偏振分量的混沌信号带宽在 η_1 和 η_2 参数空间的变化规律,黑色虚线表示带宽为 20 GHz 的参数位置。当 $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20 \text{ GHz}$ 时,如图 7(a)、(b) 所示, x -PC 和 y -PC 中黑色虚线所围成的 A 区域对应的带宽大于 20 GHz,其主要集中于 η_1 和 η_2 取值相对较小的参数范围;对于 η_1 与 η_2 取值较大的情况,S-VCSEL 输出混沌的带宽会逐渐减小,尤其是当其中一方注入强度较弱而另一方注入强度较大时,两个偏振分

量输出混沌信号的 EBW 在此负失谐条件下会显著降低,这是因为注入强度较大的一方占据主导地位,从而使 S-VCSEL 存在一定的注入锁定效应,这个结果类似于 SCOI 的情形。当 $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20$ GHz 时,如图 7(c)、(d) 所示,可以看出带宽高于 20 GHz 的 A 区域参数范围明显扩大,这主要是因为注入锁

定效应的非对称性,正频率失谐更有利于拓展宽带混沌信号所对应的注入强度范围,这与图 4 所描述的情况一致。可以预见的是,对于正频率失谐取值更大的情况,S-VCSEL 的两个正交偏振分量输出混沌的 EBW 会进一步增强,且满足宽 EBW 混沌输出的两注入强度参数范围也会随之扩大。

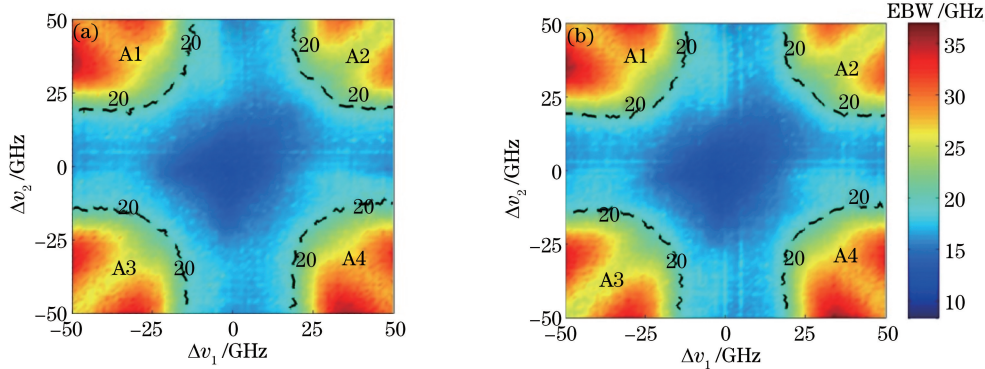


图 6 DCOI 作用下,S-VCSEL 偏振输出的 EBW 在由频率失谐 Δv_1 和 Δv_2 构成的参数空间内的分布情况。

(a) $\eta_{\text{DCOI}} = 40 \text{ ns}^{-1}$, x-PC; (b) $\eta_{\text{DCOI}} = 40 \text{ ns}^{-1}$, y-PC

Fig. 6 Distribution of EBW of polarized output from S-VCSEL in parameter space composed of frequency detunings Δv_1 and Δv_2 . (a) $\eta_{\text{DCOI}} = 40 \text{ ns}^{-1}$, x-PC; (b) $\eta_{\text{DCOI}} = 40 \text{ ns}^{-1}$, y-PC

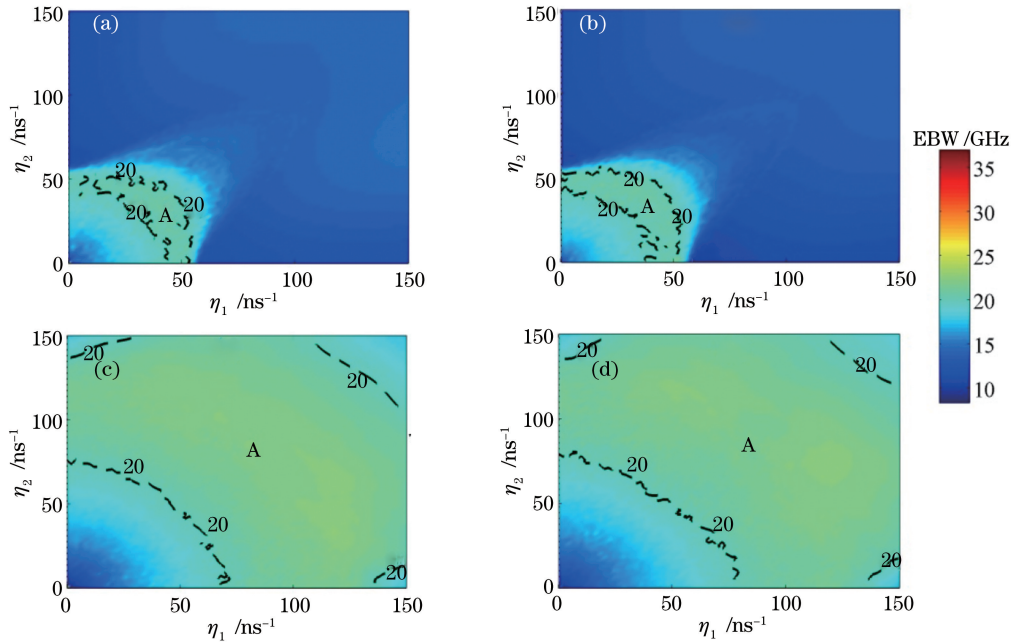


图 7 DCOI 作用下,S-VCSEL 偏振输出的 EBW 在由注入强度 η_1 和 η_2 构成的参数空间内的分布情况。(a) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, x-PC; (b) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, y-PC (c) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20$ GHz, x-PC; (d) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20$ GHz, y-PC

Fig. 7 Distribution of EBW of polarized output from S-VCSEL in parameter space composed of incident intensities η_1 and η_2 . (a) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, x-PC; (b) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = -20$ GHz, y-PC; (c) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20$ GHz, x-PC; (d) $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 20$ GHz, y-PC

4 结 论

基于 VCSEL 的 SFM,结合混沌信号 EBW 的

量化方法,数值研究了两个带有光反馈的 M-VCSEL1 和 M-VCSEL2 输出混沌光注入到 S-VCSEL 输出偏振混沌信号带宽的变化规律。数值

研究表明,在等效注入强度相同的条件下,与SCOI作用的情况相比,系统在DCOI作用下难以出现注入锁定效应,DCOI扰动的方式使得系统可在注入强度和频率失谐参数空间的较大范围内获得宽带的双路偏振混沌信号,且正失谐区域产生宽带的混沌的参数范围大于负失谐区域。进一步研究表明,DCOI作用时, Δv_1 和 Δv_2 的变化对 x -PC和 y -PC的EBW有着显著的影响,两个频率失谐绝对值同为较大值时更易于产生宽带偏振混沌信号;而系统输出 x -PC和 y -PC在 η_1 和 η_2 参量空间内输出宽带的混沌信号则主要取决于注入光强度和频率失谐量。因此,通过合理控制DCOI作用时的注入参数,可实现双路宽带混沌信号的输出。

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] 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.
- [3] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [4] Yang H B, Wu Z M, Tang X, *et al.* Influence of feedback strength on the characteristics of the random number sequence extracted from an external-cavity feedback semiconductor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 084204.
杨海波, 吴正茂, 唐曦, 等. 反馈强度对外腔反馈半导体激光器混沌熵源生成的随机数序列性能的影响[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 084204.
- [5] Yang H H, Yang L Z, Zhang J, *et al.* Chaos complexity of erbium-doped chaotic fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0714002.
杨欢欢, 杨玲珍, 张俊, 等. 掺铒光纤环形激光器混沌复杂度分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0714002.
- [6] Li Q L, Lu S S, Bao Q, *et al.* Bidirectional signal transmission based on two coupled chaotic semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0506001.
李齐良, 卢珊珊, 包琪, 等. 基于耦合混沌半导体激光器之间双向信号传输的研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0506001.
- [7] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, *et al.* Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers[J]. *Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B*, 1997, 9(5): 765-784.
- [8] Wang A B, Wang Y C, Wang J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1144-1146.
- [9] 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.
- [10] Lenstra D. Relaxation oscillation dynamics in semiconductor diode lasers with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 591-593.
- [11] 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.
- [12] Yan S L. Enhancing the relaxation oscillation frequency of a chaotic semiconductor laser transmitter using optical dual-feedback light [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(17): 3305-3309.
- [13] Zhang Y Y, Zhang J Z, Zhang M J, *et al.* 2.87-Gb/s random bit generation based on bandwidth-enhanced chaotic laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(3): 031404.
- [14] Zhang M J, Liu T G, Li P, *et al.* Generation of broadband chaotic laser using dual-wavelength optically injected Fabry-Perot laser diode with optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(24): 1872-1874.
- [15] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, *et al.* Photonic generation of wideband time-delay-signature-eliminated chaotic signals utilizing an optically injected semiconductor laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(10): 1339-1345.
- [16] Xiang S Y, Pan W, Luo B, *et al.* Wideband unpredictability-enhanced chaotic semiconductor lasers with dual-chaotic optical injections [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 1069-1076.
- [17] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and progress of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050006.
李玉娇, 宗楠, 彭钦军. 垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050006.
- [18] Lü Z C, Wang Q, Yao S, *et al.* 4×15 Gbit/s 850 nm vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Acta*

- Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514001.
- 吕朝晨, 王青, 尧舜, 等. 4×15 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514001.
- [19] Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4502-4513.
- [20] Li X J, Wu Z M, Deng T, *et al.* Investigation on the bistability performances of vertical-cavity surface-emitting lasers with time-varying orthogonal optical injection subject to weak optical feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1214001.
李小坚, 吴正茂, 邓涛, 等. 弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1214001.
- [21] Chen J J, Xia G Q, Wu Z M. Power-induced polarization switching and bistability characteristics in 1550-nm VCSELs subjected to orthogonal optical injection [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(2): 024210.
- [22] Chen J J, Duan Y N, Zhong Z Q. Complex-enhanced chaotic signals with time-delay signature suppression based on vertical-cavity surface-emitting lasers subject to chaotic optical injection [J]. Optical Review, 2018, 25(3): 356-364.
- [23] Xu P, Xia G Q, Wu Z M, *et al.* Circular polarization switching and polarization bistability of optically pumped 1300 nm spin vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401002.
- 徐攀, 夏光琼, 吴正茂, 等. 光抽运下 1300 nm 自旋垂直腔面发射激光器输出激光的圆偏振转换及偏振双稳特性[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401002.
- [24] Liao J F, Sun J Q. Polarization dynamics and chaotic synchronization in unidirectionally coupled VCSELs subjected to optoelectronic feedback [J]. Optics Communications, 2013, 295(10): 188-196.
- [25] Chen J J, Wu Z M, Tang X, *et al.* Generation of polarization-resolved wideband unpredictability-enhanced chaotic signals based on vertical-cavity surface-emitting lasers subject to chaotic optical injection[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7173-7183.
- [26] Quirce A, Valle A, Thienpont H, *et al.* Enhancement of chaos bandwidth in VCSELs induced by simultaneous orthogonal optical injection and optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(10): 2400609.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Zhong Z Q, Wu Z M, Wu J G, *et al.* Time-delay signature suppression of polarization-resolved chaos outputs from two mutually coupled VCSELs [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 1500409.