

外光注入半导体环形激光器同时产生两路 宽带混沌信号

阎娟 潘炜 李念强 张力月 刘庆喜

Two broadband chaotic signals generated simultaneously by semiconductor ring laser with parallel chaotic injection

Yan Juan Pan Wei Li Nian-Qiang Zhang Li-Yue Liu Qing-Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1550 nm-VCSELS 在偏振保持光反馈和正交光注入下的偏振转换特性

Polarization switching characteristics of polarization maintaining optical feedback and orthogonal optical injection of 1550 nm-VCSEL

物理学报.2016, 65(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214206>

基于偏振旋转耦合 1550 nm 垂直腔面发射激光器环形系统产生多路高质量混沌信号

Generations of multi-channel high-quality chaotic signals based on a ring system composed of polarization rotated coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报.2016, 65(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194207>

高功率、高效率 808nm 半导体激光器阵列

High-power, high-efficiency 808 nm laser diode array

物理学报.2016, 65(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164203>

可变偏振光注入下 1550nm 垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性

Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection

物理学报.2016, 65(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164204>

894nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用

894 nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system

物理学报.2016, 65(13): 134204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134204>

# 外光注入半导体环形激光器同时产生两路 宽带混沌信号\*

阎娟<sup>†</sup> 潘炜 李念强 张力月 刘庆喜

(西南交通大学信息科学与技术学院, 信息光子与通信研究中心, 成都 611756)

(2016年5月6日收到; 2016年8月2日收到修改稿)

本文将交叉反馈半导体环形激光器(SRL)产生的两路混沌信号平行单向注入到从激光器对应的模式中, 构成了宽带混沌激光生成方案. 通过建立速率方程, 数值分析了失谐频率和注入强度对系统带宽及安全性影响. 利用强度时间序列的频域变化规律揭示了带宽增强的物理原因, 并且对增强区域不对称进行了解释. 仿真结果表明: 两路混沌信号的带宽增强路径相似. 在非注入锁定区域, 选择较高失谐频率以及适当的注入强度可以实现两路信号的带宽以及不可预测度同时增强. 通过分析混沌信号的光谱可知注入混沌光与从激光器激光之间的拍频作用产生的高频振荡是导致带宽增强的物理原因. 主激光器发生红移现象导致带宽增强区域呈现不对称, 并且负失谐频率下容易实现带宽增强. 非对称注入强度使得注入锁定区域缩小, 拓宽了高注入强度下带宽增强范围.

**关键词:** 半导体环形激光器, 带宽增强, 混沌, 非对称注入

**PACS:** 42.55.Px, 42.55.Sa, 05.45.Jn

**DOI:** 10.7498/aps.65.204203

## 1 引言

半导体激光器(semiconductor lasers, SLs)通过增加外部扰动可以呈现丰富的非线性动态特性, 在一定条件下实现混沌输出. 混沌信号不仅具备一般光信号的带宽特性, 而且具有普通混沌信号的保密性, 因此SLs广泛应用于混沌保密通信<sup>[1-3]</sup>、随机数生成领域<sup>[4,5]</sup>. 由于受到半导体激光器弛豫振荡频率的限制, 混沌信号带宽仅维持在10 GHz以下, 较低的混沌带宽不仅限制了混沌通信中信息的传输速率, 并且影响了数据加密速率、随机序列的生成速率. 因此, 为了满足高速率信息传输的迫切需求, 进一步提高SLs输出混沌信号带宽成为研究热点<sup>[6,7]</sup>. 目前, 已有研究表明通过光注入方式SLs可以实现混沌信号带宽增强, 注入式SLs机理主要分为两类, 第一类: 孤立稳态SLs产生的连续

光注入到外腔反馈SLs中, 学者首先证明了强光注入锁定可以增强SLs的调制带宽<sup>[8]</sup>, 随后通过实验相继证明分布反馈型激光器(distributed feedback laser, DFB)、垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)在非注入锁定下也可获得宽带混沌信号<sup>[9-12]</sup>; 第二类: SLs输出的混沌光注入到孤立稳态SLs中, 实验及理论证明了单链路注入可以获得宽带平坦混沌信号<sup>[13]</sup>, 扩展一条注入链路后混沌信号带宽及不可预测度增强显著<sup>[14]</sup>.

以上研究主要基于传统DFB, VCSEL激光器, 近年来随着对新型激光光源的不断探索, 半导体环形激光器(semiconductor ring laser, SRL)逐渐成为研究的热点. 通过电流调制<sup>[15]</sup>、光注入<sup>[16-18]</sup>及光反馈<sup>[19]</sup>三种外部扰动方式, SRL可以输出混沌激光信号, 因此SRL在混沌保密通信<sup>[1-3,18]</sup>及随机数生成领域<sup>[4,7]</sup>具有潜在应用. 在工作模式上,

\* 国家自然科学基金(批准号: 61274042)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [juan126jay@sina.com](mailto:juan126jay@sina.com)

与传统 SLs 不同, SRL 同时存在顺时针 (clockwise, CW) 和逆时针 (counterclockwise, CCW) 两种工作模式, 可以用以实现全光转换、光存储器等光逻辑器件 [20,21] 的应用; 随着单一信道的扩展, 双工作模式实现了双向双信道混沌通信 [22], 对双信道以及多信道混沌通信而言, SRL 作为光源对提高信道容量、高效利用光纤带宽资源具有重要意义. 在结构上, SRL 具有环形谐振腔, 这种闭合波导谐振腔不需要任何光栅结构和外腔反馈解理面提供光反馈就能形成激射, 因此具备体积小、易于集成的独特优势, 在光子集成电路 [23] (photonic integrated circuits, PICs) 应用中成为首选光源, 减少了光器件的使用, 大大降低工艺制造成本.

然而由于响应带宽的限制, 基于 SRL 混沌通信系统的传输速率也受到限制. 2009 年 Memon 等 [15] 实验证明了注入锁定 SRL 的调制带宽可以达到自由运行带宽的 3 倍; 2013 年 Yuan 等 [16] 理论分析了单链路混沌光注入到孤立稳态 SRL 中, 从 SRL 而带宽增强为连续光注入时的 2 倍; 同年 Li 等 [18] 提出了外腔反馈 DFB 产生的混沌光注入到 SRL 中 CW 模式, 可以获得不可预测度增强的宽带混沌信号. 目前增强载波带宽的混沌保密通信方案主要基于注入光为一条链路, 注入到 CW 或 CCW 模式之一, 对于双链路同时注入两种模式的研究相对缺乏, 关于 SRL 带宽增强的物理原因没有进一步阐明. 基于以上研究, 本文以交叉反馈 SRL 产生的混沌信号作为驱动信号平行注入孤立稳态 SRL 中, 分别从频域和时域两方面分析了注入强度和失谐频率对输出信号带宽以及排列熵的影响, 讨论了带宽增强的物理原因以及形成增强区域不对称的物理机理. 通过选取适当控制参量, 在兼顾通信系统安全性的同时, 增强两路混沌载波信号带宽.

## 2 基本原理分析

主从式平行注入 SRL 结构示意图, 如图 1 所示. 由于 SRL 激光器存在两种工作模式, 因此存在自反馈与交叉反馈两种光反馈形式 [2]. 主激光器通过交叉反馈方式产生混沌光, 其中 CCW 模式的激光沿时延线 1 反馈至相反 CW 模式, 时延线 2 同理. M-SRL 产生的混沌激光, 平行且单向注入到 S-SRL 对应的两个模式中, 在注入光驱动下 S-SRL 输出高维混沌载波信号. 为防止从激光器的光信号反射

进入主激光器系统中, 需要放置光隔离器 (optical isolator, ISO).

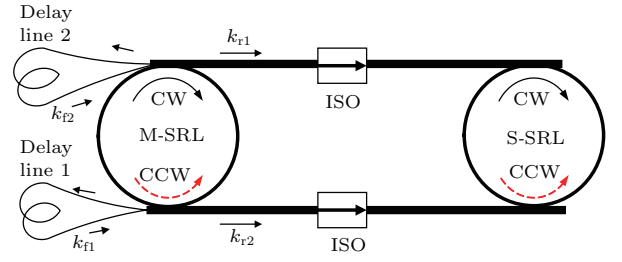


图 1 主从式平行注入半导体环形激光器混沌系统结构示意图, ISO 光隔离器, M-SRL 主激光器, S-SRL 从激光器  
Fig. 1. Schematic diagram of the S-SRL subject to parallel injection from the M-SRL with cross feedback. M-SRL, master semiconductor ring laser; S-SRL, slave semiconductor ring laser; ISO, optical isolator.

根据 Lang-Kobayashi 速率方程模型, 增加光反馈项和光注入项, 速率方程式如下 [17,19,24]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{E}_{m1}}{dt} = & k(1+i\alpha)(G_{m1}N_m-1)\mathbf{E}_{m1} \\ & - (k_d + ik_c)\mathbf{E}_{m2} + k_{r2}\mathbf{E}_{m2}(t-\tau_{r2}) \\ & \times \exp(-i\omega\tau_{r2}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{E}_{m2}}{dt} = & k(1+i\alpha)(G_{m2}N_m-1)\mathbf{E}_{m2} \\ & - (k_d + ik_c)\mathbf{E}_{m1} + k_{r1}\mathbf{E}_{m1}(t-\tau_{r1}) \\ & \times \exp(-i\omega\tau_{r1}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{E}_{s1}}{dt} = & k(1+i\alpha)(G_{s1}N_s-1)\mathbf{E}_{s1} \\ & - (k_d + ik_c)\mathbf{E}_{s2} + k_{r1}\mathbf{E}_{m1}(t-\tau_{r1}) \\ & \times \exp(-i(\omega\tau_{r1} - \Delta\omega t)), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{E}_{s2}}{dt} = & k(1+i\alpha)(G_{s2}N_s-1)\mathbf{E}_{s2} \\ & - (k_d + ik_c)\mathbf{E}_{s1} + k_{r2}\mathbf{E}_{m2}(t-\tau_{r2}) \\ & \times \exp(-i(\omega\tau_{r2} - \Delta\omega t)), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_j}{dt} = & \gamma \left[ \mu - N_j G_{j1} |\mathbf{E}_{j1}|^2 - N_j G_{j2} |\mathbf{E}_{j2}|^2 \right] \\ & (j = m, s), \end{aligned} \quad (5)$$

$$G_{j1} = 1 - s |\mathbf{E}_{j1}|^2 - c |\mathbf{E}_{j2}|^2 \quad (j = m, s), \quad (6)$$

$$G_{j2} = 1 - s |\mathbf{E}_{j2}|^2 - c |\mathbf{E}_{j1}|^2 \quad (j = m, s), \quad (7)$$

下标 m, s 分别表示主、从激光器; 1, 2 分别表示 CW, CCW 模式;  $\mathbf{E}_{j1}, \mathbf{E}_{j2}$  ( $j = m, s$ ) 表示两种模式的复振幅,  $G_{j1}, G_{j2}$  ( $j = m, s$ ) 表示两种模式增益;  $N_j$  ( $j = m, s$ ) 表示激光器腔内的载流子数. (1)–(4) 式中等号右侧第二项表示环形腔的内部

两种模式之间的线性耦合;  $k_c, k_d$  分别表示保守耦合系数和耗散耦合系数,  $k_d + ik_c$  的值表示环形腔与条形波导耦合时产生的背向散射效应, 两耦合系数与归一化偏置电流  $\mu$  共同决定了 SRL 的工作区域<sup>[24]</sup>. (1) 式和 (2) 式中最后一项表示光交叉反馈项,  $k_{f1}, k_{f2}, \tau_{f1}, \tau_{f2}$  分别表示反馈强度及对应的时延; (3) 式和 (4) 式中最后一项表示光注入项,  $k_{r1}, k_{r2}, \tau_{r1}, \tau_{r2}$  分别表示注入光的注入强度及对应

的时延;  $\omega$  表示激光器的中心角频率,  $\Delta f$  表示孤立稳态 M-SRL 与 S-SRL 之间的失谐频率,  $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$ . 其他符号含义及取值参考表 1, 主从激光器的内部参数取值相同.

### 3 仿真与结果分析

#### 3.1 输出载波信号的时域特性

首先, 根据复电场表达式  $E(t) = A_c \exp[i\omega t + i\phi_c]$  对 (1) 式—(4) 式进行幅值、相位分离, 并在 Simulink 可视化工具平台上搭建模型, 采用四阶龙格库塔法计算出主从激光器的幅值  $A_c$  及相位  $\phi_c$ .

计算  $I_c = |A_c|^2$  得到强度时间序列, 时域特性如图 2 所示, 混沌光注入使得 S-SRL 产生混沌输出, 其时间序列的波形更为复杂. 载波信号波动的复杂程度表明信号的不可预测度. 对于通信系统而言, 不可预测度越高意味着传输的载波信号的安全性越强, 窃听者准确获得有效信息越困难. 因此通过增强混沌载波信号的不可预测度, 可以确保信息的安全传输.

表 1 SRL 典型参数值<sup>[17,19]</sup>  
Table 1. Parameter values of SRL<sup>[17,19]</sup>.

参数名称	符号表示	参数取值
场衰减速率/ $\text{ns}^{-1}$	$k$	100
线宽增益因子	$\alpha$	3.5
保守耦合系数/ $\text{ns}^{-1}$	$k_c$	0.44
耗散耦合系数/ $\text{ns}^{-1}$	$k_d$	0.033
归一化自饱和系数	$s$	0.005
归一化交叉饱和系数	$c$	0.01
归一化偏置电流	$\mu$	2.5
载流子反转衰减速率/ $\text{ns}^{-1}$	$\gamma$	0.2
SRL 的工作波长/nm	$\lambda$	850

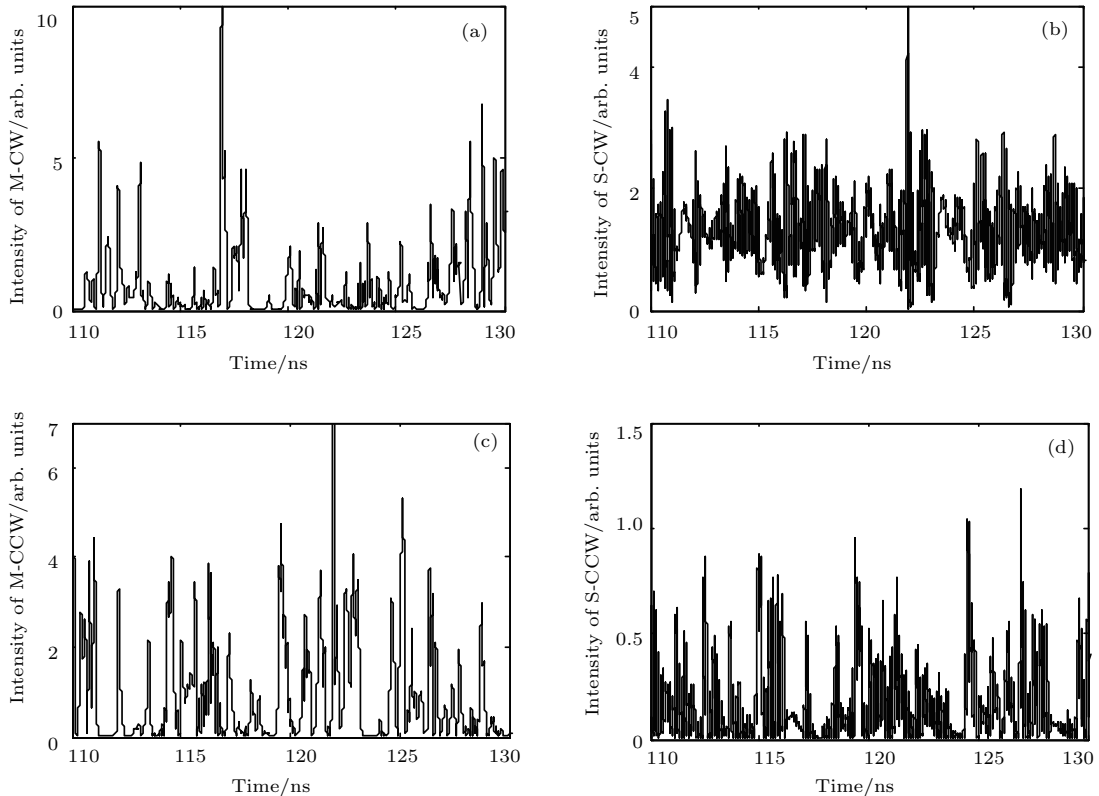


图 2 当  $k_{r1} = k_{r2} = 70 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\Delta f = 30 \text{ GHz}$  时, M-SRL(第 1 列)与 S-SRL(第 2 列)输出的强度波形 (a), (b) CW 模式; (c), (d) CCW 模式

Fig. 2. Intensity time series of M-SRL (left column) and S-SRL (right column) with  $k_{r1} = k_{r2} = 70 \text{ ns}^{-1}$  and  $\Delta f = 30 \text{ GHz}$ , when  $k_{f1} = 20 \text{ ns}^{-1}$ ,  $k_{f2} = 25 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\tau_{f1} = 5 \text{ ns}$ ,  $\tau_{f2} = 7 \text{ ns}$ ,  $\tau_{r1} = \tau_{r2} = 5 \text{ ns}$ : (a), (b) CW mode; (c), (d) CCW mode.

为了进一步表示S-SRL混沌信号的不可预测度, 本文采用排列熵对混沌载波信号进行量化处理<sup>[25,26]</sup>. 自Bandt和Pompe提出基于Shannon信息熵的排列熵算法, 已有学者项水英<sup>[25]</sup>进行了详细讨论. 排列熵算法具体如下<sup>[27,28]</sup>.

对于一组长度为 $T$ 的时间序列 $\{x_t, t = 1, 2, \dots, T\}$ , 首先进行相空间重构, 其中嵌入维数为 $d > 1$ , 嵌入延迟为 $\tau_e$ , 重构之后的矩阵中第 $t$ 列( $t = 1, 2, \dots, T$ )元素为 $X_t = [x_c, x(t + \tau_e), \dots, x(t + (d - 1)\tau_e)]$ , 随后对每列元素按照大小进行重新排列. 若两个元素相同, 即 $x[t + (r_{t1} - 1)\tau_e] = x[t + (r_{t2} - 1)\tau_e]$ , 按照其下标大小区分顺序, 若下标为 $r_{t1} \leq r_{t2}$ , 令 $x[t + (r_{t1} - 1)\tau_e] \leq x[t + (r_{t2} - 1)\tau_e]$ , 因此可以认为对于任意的 $X_t = (t = 1, 2, \dots, T)$ 都可以映射成一种惟一的“有序图案”, 排列方式 $\pi = (r_0, r_1, \dots, r_{d-1})$ , 对于具有 $d$ 个符号 $(1, 2, \dots, d)$ , 其进行排序共有 $d!$ 种排列方式, 而 $\pi$ 则是这 $d!$ 种排列方式之一. 对于 $d!$ 种排列, 其概率分布为 $P = \{p(\pi)\}$ ,

$$p(\pi) = \frac{\#\{t\}}{T - d + 1} \quad (t \leq T - d + 1), \quad (8)$$

式中 $\#$ 代表总数,  $X_t$ 的排列方式为 $\pi$ . 因此,

排列熵定义为 $H[p] = -\sum p(\pi) \log p(\pi)$ , 通常定义 $H_s[p]$ 为归一化排列熵 $H_s[p] = H[p]/H_{\max}$  ( $0 \leq H_s \leq 1$ ), 其中 $H_{\max} = H[P_s] = \log(d!)$ 为可能出现的排列方式的总和. 而 $P_e = \{1/d!, \dots, 1/d!\}$ 表示均匀分布, 表示 $d!$ 种排列等概率出现. 一个时间序列的 $H_s$ 越大, 表示序列的随机性越强, 相应地不可预测程度就越高, 相反当 $H_s$ 越小说明时间序列越规律, 同时也更容易预测.

本文排列熵参数设置如下: 嵌入维 $d = 6$ , 嵌入延迟 $\tau_e = 1$ , 采样周期为 $\Omega_s = 10$  ps. 为了确保数据的可靠性, 应满足时间序列长度 $T \gg d!$ , 选取长度为 $T = 80000$ 的时间序列 [50 ns, 450 ns] 进行分段处理, 令每段时间序列长度为 $T_0 = 5000$ , 计算每段时间序列的排列熵, 然后求排列熵的平均值<sup>[25,28]</sup>.

反馈强度及时延取值与图2相同, 得到M-SRL排列熵值分别为 $H_{m1} = 0.33, H_{m2} = 0.32$ . 当反馈强度 $k_{f1}, k_{f2}$ 在 $1-40 \text{ ns}^{-1}$ 范围取值, 数值仿真的结果(本文未给出)  $H_{mj} < 0.41$  ( $j = 1, 2$ ), M-SRL排列熵值较小. 可知通过光反馈模式无法获得较高的排列熵, 提高载波信号的不可预测度较为困难. 不同失谐频率下, S-SRL输出信号的排列熵值变化如图3所示, 两种模式分别用 $H_{s1}, H_{s2}$ 表示.

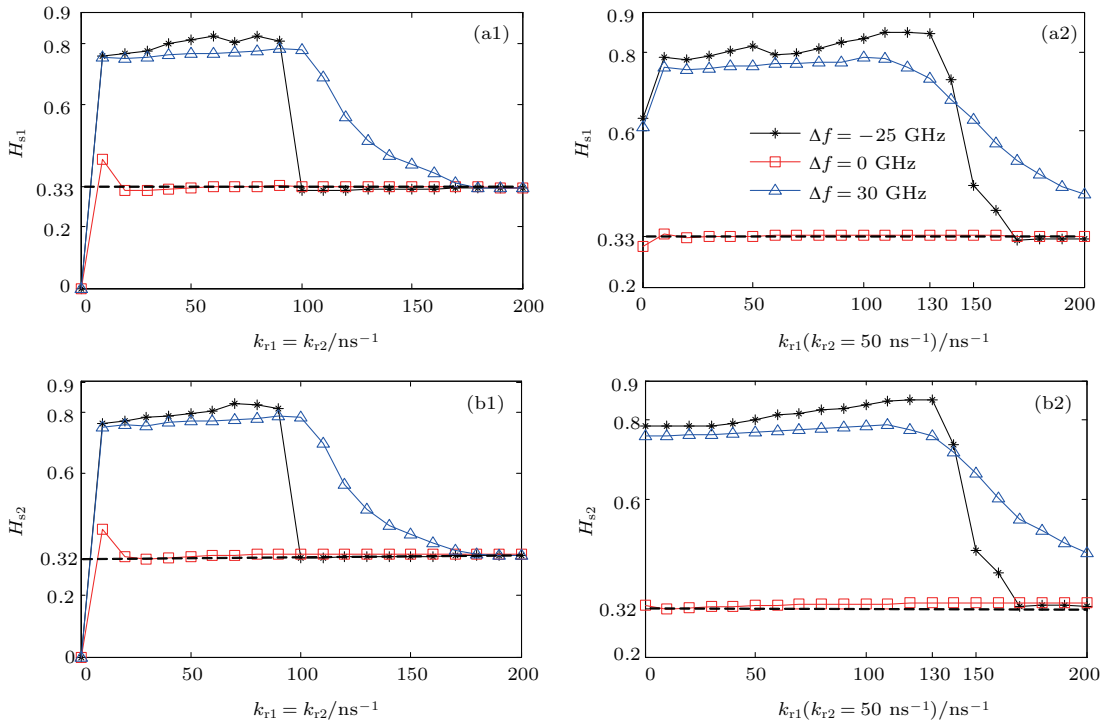


图3 (网刊彩色) S-SRL中 $H_{s1}, H_{s2}$ 在 $\Delta f$ 分别为 $-25, 0, 30 \text{ GHz}$ 时随注入强度的变化关系 (a1), (b1)  $k_{r1} = k_{r2}$ , (a2), (b2)  $k_{r1} \neq k_{r2}$ 且 $k_{r2} = 50 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 3. (color online) The value of  $H_{s1}, H_{s2}$  as functions of injection strength  $k_{r1}, k_{r2}$  for different frequency detuning  $\Delta f = -25 \text{ GHz}$  (black),  $0 \text{ GHz}$  (red),  $30 \text{ GHz}$  (blue), (a1), (b1)  $k_{r1} = k_{r2}$ ; (a2), (b2)  $k_{r1} \neq k_{r2}$  and  $k_{r2} = 50 \text{ ns}^{-1}$ .

当  $\Delta f = 0$  GHz,  $H_{s1}$ ,  $H_{s2}$  不随注入强度的改变而变化, 其大小与 M-SRL 的两种对应模式的排列熵值相同, 这是由于发生注入锁定, S-SRL 输出频率与 M-SRL 相同, 由图 4(aa-I) 与图 4(dd-I) 光谱图对比可知. 当  $\Delta f \neq 0$  GHz, 在低注入强度范围  $H_{s1}$ ,  $H_{s2}$  维持在较大值 0.8; 随着注入强度进一步增大, 在注入强度到达一定临界值后两种模式的排列熵值逐渐减小. 这是由于低注入强度 S-SRL 处于非注入锁定状态, 排列熵增大. 随着在注入强

度升高 S-SRL 逐渐进入锁定状态, 排列熵值减小, 不可预测度降低. 比较图 3(a1) 与图 3(a2), 当  $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$  取值不同, 即非对称注入, 影响了进入锁定区域临界点位置, 进入注入锁定区域需要更高的注入强度. 由图 3 可知, 无论两条链路的注入强度是否相同, 低注入强度以及较高失谐频率, 可获得排列熵为  $H_{sj} > 0.8$  ( $j = 1, 2$ ) 的载波信号; 高注入强度下, 两条链路为非对称情况, S-SRL 易处于非注入锁定区域, 仍可维持较大排列熵.

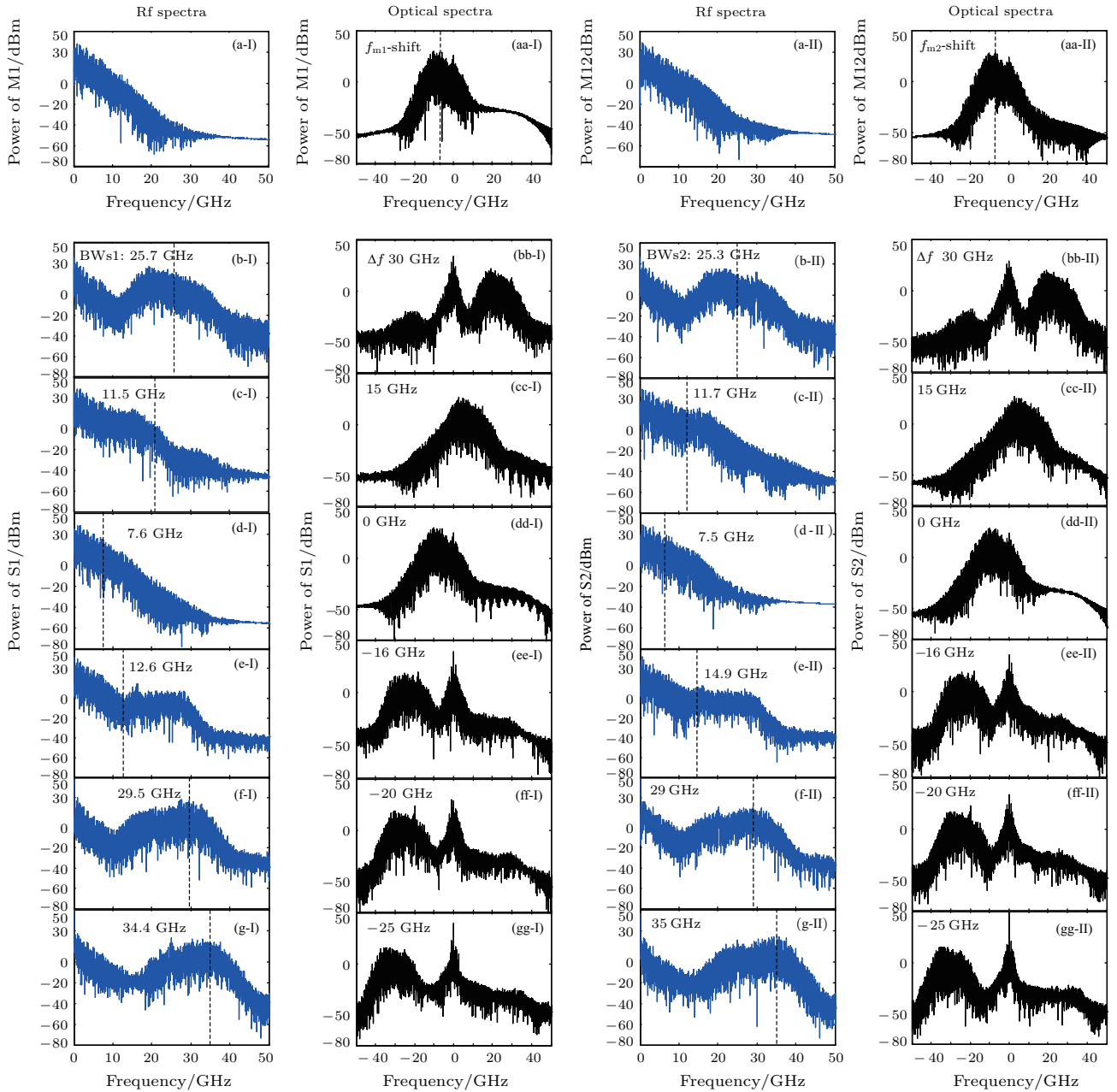


图 4 (网刊彩色) 当  $k_{r1} = k_{r2} = 70 \text{ ns}^{-1}$  时 M-SRL 与 S-SRL 的频谱 (第 1, 3 列) 和光谱 (第 2, 4 列)

Fig. 4. (color online) Numerically obtained evolution of the rf spectra (the first and third columns) and optical spectra (the second and fourth columns) of M-SRL and S-SRL with  $k_{r1} = k_{r2} = 70 \text{ ns}^{-1}$ .

### 3.2 输出载波信号的频域特性

对于半导体激光器的频域特征主要通过光谱和频谱进行分析. 计算电场  $E(t) = A_c \exp[i\omega t + i\phi(t)]$  和强度  $I = |A_c|^2$  的功率谱密度分别得到光谱、频谱. 图4中从左至右分别表示CW, CCW模式的频谱及光谱, 其中第一行表示M-SRL两种模式的频域特性, 由图4(aa-I)可知CW模式的光谱中心波长并非在0 GHz附近. 根据文献[4, 8]分析可知, M-SRL受到交叉反馈光影响, 中心频率  $f_m$  发生红移, 光谱频率减小, 此时的中心频率为  $f_{m\text{-shift}}$ , 即  $f_{m\text{-shift}} < f_m$ , 形成红移的主要原因是交叉反馈光的引入降低了激光器内载流子阈值, 从而导致腔内振荡条件发生改变. 因此M-SRL红移后产生的激光才是实际的注入光, 前文提到失谐频率  $\Delta f$  表示孤立稳态M-SRL与S-SRL之间的失谐频率,  $\Delta f = f_m - f_s$ , 而实际的失谐频率量应为  $\Delta f' = f_{m\text{-shift}} - f_s$ .

根据文献[9], 适当改变注入强度及失谐频率可以增强从S-SRL混沌信号带宽. 将SRL的混沌信号带宽BW定义为从直流量算起, 包含频谱总能量的80%的频带宽度[8,20,24]. 通过计算可知M-SRL

中CW, CCW模式带宽分别为  $BW_{m1} = 5.3$  GHz,  $BW_{m2} = 5.1$  GHz. 图4给出注入强度固定, 失谐频率不同时  $BW_{sj}$  ( $j = 1, 2$ ) 的频域特性. 当  $\Delta f = 30$  GHz, 带宽  $BW_{s1} = 25.7$  GHz, 此时带宽显著增强, 从频谱图4(b-I)可以看出在25 GHz出现高频振荡. 这是由于注入光与S-SRL激光之间发生拍频作用, 在注入光的驱动下S-SRL产生高频振荡, 振荡频率即为拍频频率  $f_{\text{拍}}$ , 对应频谱图中高频振荡位置. 实际的  $f_{\text{拍}}$  不是对应  $\Delta f$ , 而是对应  $\Delta f'$ , 当正失谐时,  $f_{\text{拍}}$  小于失谐频率  $\Delta f$ , 反之亦然. 因此失谐频率数值相同时, 正负失谐频率对应的高频分量位置非对称, 带宽增强区域呈现非对称, 如图5所示. 从光谱图中可以看出, 随着失谐频率数值的增加带宽随之增强. 值得注意的是当  $\Delta f = 0$  GHz, 图4(dd-I)与图4(aa-I)光谱图相同, 这是因为从激光器处于注入锁定状态, 此时从激光器输出频率应为注入光频率  $f_{m\text{-shift}}$ , 输出带宽为  $BW_{s1} = 7.6$  GHz, 略高于主激光器  $BW_{m1} = 5.3$  GHz. 与非注入锁定带宽增强的原因不同, 此时带宽的略有增加是由于混沌注入光增加了S-SRL中弛豫振荡分量, 从而提高了带宽.

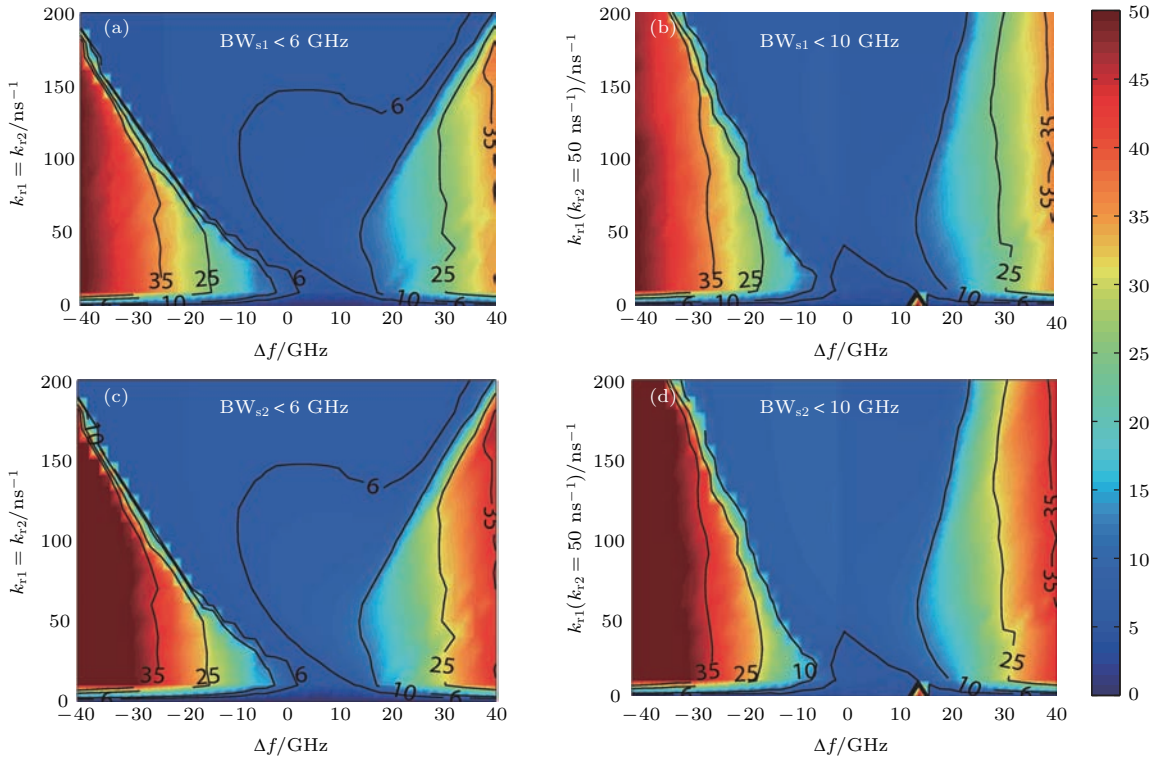


图5 (网刊彩色) S-SRL输出信号带宽  $BW_{s1}$ ,  $BW_{s2}$  在控制参量空间的二维图 (a), (c)  $k_{r1} = k_{r2}$ ; (b), (d)  $k_{r1} \neq k_{r2}$ ,  $k_{r2} = 50 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 5. (color online) 2-D maps of  $BW_{s1}$  and  $BW_{s2}$  in parameter space of injection strength and frequency detuning for S-SRL: (a), (c)  $k_{r1} = k_{r2}$ ; (b), (d)  $k_{r1} \neq k_{r2}$ ,  $k_{r2} = 50 \text{ ns}^{-1}$ .

为进一步确定混沌带宽增强范围, 找出对应的控制参量区域, 图5给出了S-SRL两种模式的带宽在 $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$ 和 $\Delta f$ 下的变化规律. 其他参数取值参照图2. 比较图5(a)与图5(c), 图5(b)与图5(d), 无论 $k_{r1}$ 与 $k_{r2}$ 大小是否相同, 两种模式带宽在参数相同情况下变化规律几乎相同, 带宽增强区域均呈现非对称特点, 与DFB激光器相同[8,9]. 随着 $\Delta f$ 数值从零不断增大, S-SRL由注入锁定区域进入非注入锁定区域, 带宽逐渐增强, 形成带宽增强的物理原因也随之改变. 在注入锁定区域, 弛豫振荡占主导地位, 带宽增强的原因是注入光引起了弛豫振荡分量增加, 但此时带宽增强并不显著. 进入非注入锁定区域, 带宽显著增强, 注入混沌光与S-SRL激光之间发生拍频现象, 产生的高频振荡是带宽增强的物理原因.

由图5(a)和图5(c)可知, 高失谐频率对应带宽显著增强区域, 持续增加注入强度( $k_{r1} > 150 \text{ ns}^{-1}$ ), 带宽反而减小, 这是由于S-SRL进入注入锁定状态导致. 控制两条注入链路强度不同, 即非对称注入, 可以缩小注入锁定区域范围, 同时意味着带宽增强区域进一步拓宽. 根据图4可知, M-SRL中心频率发生红移, 影响了实际失谐频率的大小, 导致了带宽关于失谐频率不对称. 该结论具有普适性, 当系统结构为主从交叉注入时, 也可以获得与平行注入相似的结果.

图6给出的是当失谐频率为 $\Delta f = -25 \text{ GHz}$ 时, 两条链路的注入强度 $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$ 对CW模式带宽及排列熵的影响. 由图可知当 $k_{r1} < 140 \text{ ns}^{-1}$ ,  $k_{r2} < 160 \text{ ns}^{-1}$ 时, 带宽增大区域与排列熵高值区域大致相同, 两条链路 $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$ 的取值不同更容易实现带宽增强, 实现带宽 $30 \text{ GHz} < \text{BW}_{s1} < 35 \text{ GHz}$ 且排列熵 $H_{s1} > 0.8$ ; 增大注入强度, S-SRL容易进入注入锁定状态, 带宽及排列熵值均显著降低. 同样的, CCW模式可以得到相同的结论. 高负失谐频率下, 非对称注入可以使S-SRL同时获得两路高不可预测度宽带混沌信号. 在异或随机数生成方案中, 需要两路不相关的混沌信号作为物理熵源, 通常利用两个激光器或一个激光器经过耦合器获得两路信号. 采用SRL作为物理熵源, 不仅可以有效节省激光器、耦合器等光学器件, 而且满足了光子电路集成化的发展需求. 通过计算SRL两路混沌信号的互相关函数分析两者之间的相关性. 当两路混沌信号之间的延迟时间与系统的反馈时延

不同时, 两路混沌信号不相关. 对其中一路混沌信号进行时延处理, 确保两路混沌信号不相关, 再进行逻辑异或处理后可得到最终的高速随机序列.

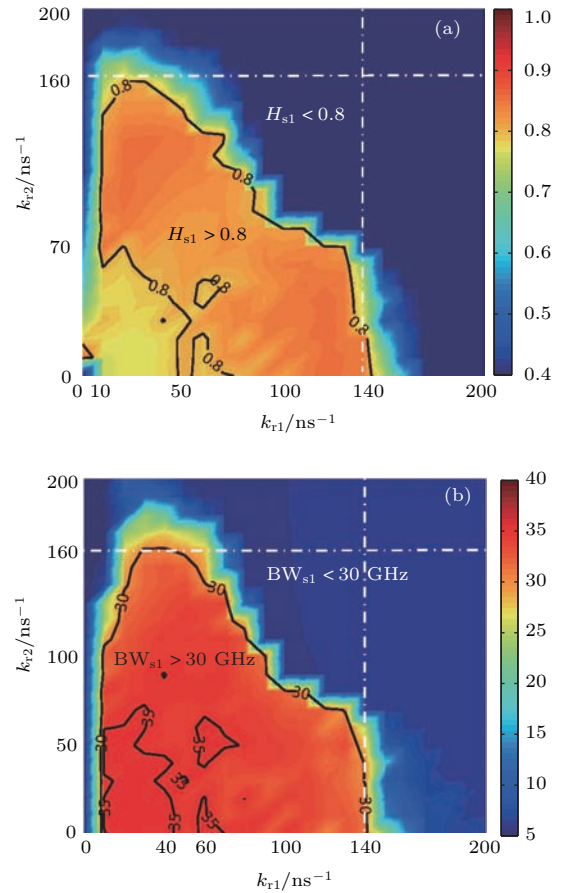


图6 (网刊彩色) S-SRL中CW的 $H_{s1}$ 及 $\text{BW}_{s1}$ 在注入强度参数空间的二维图,  $\Delta f = -25 \text{ GHz}$

Fig. 6. (color online) 2-D maps of  $H_{s1}$  and  $\text{BW}_{s1}$  in the parameter space of injection strength  $k_{r1}$  and  $k_{r2}$  for S-SRL with  $\Delta f = -25 \text{ GHz}$ .

#### 4 结 论

本文利用交叉反馈M-SRL产生的混沌光作为驱动信号, 平行单向注入到稳态S-SRL两个模式中, 基于速率方程对混沌信号的时域及频域进行了数值分析, 仿真结果表明: 非注入锁定状态下带宽增强显著, 混沌注入光与从激光器激光之间的拍频作用产生的高频振荡是带宽增强的物理原因; 与DFB激光器相同, SRL在控制参量(失谐频率与注入强度)空间带宽增强区域呈现不对称, M-SRL发生的红移现象是导致增强区域不对称的主要原因; 高负失谐频率和非对称注入下可以获得两路 $H_{sj} > 0.8$ ,  $30 \text{ GHz} < \text{BW}_{sj} < 35 \text{ GHz}$  ( $j = 1, 2$ )的混沌载波信号; 交叉注入情况也可以得到相同结



论. 该结构输出载波信号, 在兼顾通信系统安全性的同时, 满足了高速信息传输的需求. 从根源上增强了基于混沌激光器的真随机数产生器的随机性能及比特率. 随着光子电路集成化发展, SRL可以同时生成两路高不可预测度宽带混沌信号, 扩展了其在多信道通信系统的潜在应用.

## 参考文献

- [1] Ermakov I V, Kingni S T, Tronciu V Z, Danckaert J 2013 *Opt. Commun.* **286** 265
- [2] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **19** 1874
- [3] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Luo B, Yan L S, Zou X H 2013 *Appl. Opt.* **52** 1523
- [4] Sunada S, Harayama T, Arai K, Yoshimura K, Tsuzuki K, Uchida A, Davis P 2011 *Opt. Express* **19** 7439
- [5] Hirano K, Yamazaki T, Morikatsu S, Okumura H, Aida H, Uchida A, Yoshimori S, Yoshimura K, Harayama T, Davis P 2010 *Opt. Express* **18** 5512
- [6] Wang A B, Wang B J, Li L, Wang Y C, Shore K A 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 1800710
- [7] Sakuraba R, Iwakawa K, Kanno K, Uchida A 2015 *Opt. Express* **23** 1470
- [8] Murakami A, Kawashima K, Atsuki K 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1196
- [9] Wang A B, Wang Y C, He H 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 1633
- [10] Wang A B, Wang Y C, Wang J F 2009 *Opt. Lett.* **34** 1144
- [11] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2012 *Opt. Soc. Am.* **29** 415
- [12] Chen J J, Wu Z M, Tang X, Deng T, Fan L, Zhong Z Q, Xia G Q 2015 *Opt. Express* **23** 7173
- [13] Uchida A, Heil T, Liu Y, Davis P, Aida T 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1462
- [14] Xiang S Y, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Li N Q, Zhu H N 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 1069
- [15] Memon M I, Li B, Mezosi G, Wang Z R, Sorel M, Yu S Y 2009 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **21** 1792
- [16] Yuan G H, Zhang X, Wang Z R 2013 *Optik* **124** 5715
- [17] Xiang S Y, Wen A J, Shang L, Zhang H X, Lin L 2013 *International Conference on Optical Communications & Networks* Bhopal, India July 26–28, 2013 p1
- [18] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Yan L S, Luo B, Zou X H, Zhang L Y 2013 *Optics & Laser Technology* **53** 45
- [19] Nguimdo R M, Verschaffelt G, Danckaert J, van der Sande G 2012 *Opt. Lett.* **37** 2541
- [20] Wang Z R, Yuan G H, Verschaffelt G, Danckaert J, Yu S Y 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 1228
- [21] Trita A, Mezosi G, Sorel M, Giuliani G 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 96
- [22] Wang S T, Wu Z M, Wu J G, Zhou L, Xia G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154205 (in Chinese) [王顺天, 吴正茂, 吴加贵, 周立, 夏光琼 2015 物理学报 **64** 154205]
- [23] Chrostowski L, Shi W 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 3355
- [24] Sorel M, Giuliani G, Scire A, Miglierina R, Donati S, Laybourn P J R 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1187
- [25] Xiang S Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Southwest jiaotong university) (in Chinese) [项水英 2012 博士学位论文 (成都: 西南交通大学)]
- [26] Liu Q X, Pan W, Zhang L Y, Li N Q, Yan J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 242091 (in Chinese) [刘庆喜, 潘炜, 张力月, 李念强, 阎娟 2015 物理学报 **64** 242091]
- [27] Bandt C, Pompe B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 174102
- [28] Zunino L, Rosso O A, Soriano M C 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1250

# Two broadband chaotic signals generated simultaneously by semiconductor ring laser with parallel chaotic injection\*

Yan Juan<sup>†</sup> Pan Wei Li Nian-Qiang Zhang Li-Yue Liu Qing-Xi

(Information Photonics and Communication Research Center, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

( Received 6 May 2016; revised manuscript received 2 August 2016 )

## Abstract

Recently semiconductor ring laser (SRL) as a novel device has received much attention, for its special cavity allows the output light to propagate in two opposite directions, namely the clockwise mode and counterclockwise mode. SRL does not require gratings or cleaved facets for optical feedback and can be a candidate for small sized photonic integrated circuits which have been developed for secure data transmission, with chaotic carriers and high rate random bit generated. In this paper, we propose a method to obtain two broadband chaotic signals with high unpredictability degree by utilizing injected slave SRL and further explore the physical mechanism and injection conditions. Based on a conventional master-slave configuration, the proposed method obtains two modes of chaotic signals by master SRL with external cross feedback, which are injected in parallel to a slave SRL correspondingly. According to the well-known Lang-Kobayashi rate equations, we establish rate equations and numerically investigate the influences of frequency detuning and injection strength on bandwidth and unpredictability degree. We adapt the given definition of bandwidth and the normalized permutation entropy to respectively evaluate bandwidth and unpredictability degree of chaotic signals. Furthermore, we reveal the underlying physical mechanism of bandwidth enhancement and asymmetric bandwidth-enhancing region by analyzing the radiofrequency and optical spectra of intensity time series.

The results show that two chaotic signals have similar routes to enhancing the bandwidth in frequency domain. In the unlocking injection area, two broadband and unpredictability-enhancing chaotic signals generated by slave SRL are simultaneously achieved by choosing appropriate control parameters. Analyses of optical spectra reveal that high-frequency periodic oscillation generated between injection chaotic signals and slave light via beating is the physical mechanism of bandwidth enhancement. The bandwidth-enhancing domains of two chaotic signals are asymmetrical due to redshift of master SRL frequency, with external chaotic signals injected. Bandwidth-enhanced chaotic signals are easier to obtain in the domain of negative frequency detuning. The asymmetrical injections contribute to reducing the locking region and extending the bandwidth-enhancing region under high injection strength. This conventional master-slave configuration composed of two SRLs can be easily implemented on chip and save other optical devices. The slave SRL subjected to parallel injection signals from master SRL can be used as a wideband unpredictability-enhancing chaotic source, which is extremely useful for the high capacity security-enhancing multiple chaotic communications, as well as for the potential applications of high speed random number generators.

**Keywords:** semiconductor ring laser, bandwidth-enhanced, chaos, asymmetrical injection

**PACS:** 42.55.Px, 42.55.Sa, 05.45.Jn

**DOI:** 10.7498/aps.65.204203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274042).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [juan126jay@sina.com](mailto:juan126jay@sina.com)