

## 自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

庞爽 冯玉玲 于萍 姚治海

## Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback

Pang Shuang Feng Yu-Ling Yu Ping Yao Zhi-Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 150502 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220204

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

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

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser

物理学报. 2018, 67(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180035>

#### 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

#### 一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制

Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating

物理学报. 2019, 68(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190744>

#### 利用光反馈多模激光器结合滤波器产生平坦混沌

Flat chaos generated by optical feedback multi-mode laser with filter

物理学报. 2019, 68(11): 110501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190171>

#### 外场调控下的纳米激光时延隐藏及不可预测性提升

Time delay concealment and unpredictability enhancement of nanolasers under external cavity regulation

物理学报. 2021, 70(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210049>

#### 半导体激光器储备池计算系统的工作点选取方法

Method of selecting operating point of reservoir computing system based on semiconductor lasers

物理学报. 2019, 68(22): 224205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191039>

# 自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性\*

庞爽 冯玉玲<sup>†</sup> 于萍 姚治海

(长春理工大学物理系, 长春 130022)

(2022 年 1 月 28 日收到; 2022 年 4 月 8 日收到修改稿)

混沌光的延时特征 (time delay signature, TDS) 和带宽是影响混沌激光应用的两个重要参量, 常用来表征混沌光的混沌特性. 将具有外腔光反馈的半导体激光器 (semiconductor laser, SL) 作为主激光器, 以具有自混沌光相位调制光反馈的 SL 作为从激光器, 并将主激光器输出的混沌光双路注入到从激光器中, 构成具有外光双路注入的自混沌光相位调制光反馈的半导体激光器系统. 数值研究了外光注入系数和反馈系数等参数对系统输出光 TDS 的影响, 然后将此系统对 TDS 的抑制效果和具有外光双路注入的光反馈半导体激光器以及具有外光单路注入的自混沌光相位调制光反馈半导体激光器进行对比和分析, 从而阐明了本文所提出的方案对 TDS 的抑制效果较好. 在 TDS 被有效抑制的参数条件下, 研究了混沌光的带宽, 结果表明: 本文提出的方案可以有效提高系统输出混沌光的带宽, 获得混沌光的 3 dB 带宽的最大值约为 16 GHz.

**关键词:** 分布反馈半导体激光器, 自混沌光相位调制光反馈, 延时特征, 带宽

**PACS:** 05.45.-a, 05.45.Pq, 42.55.Px, 42.65.Sf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220204

## 1 引言

分布反馈半导体激光器 (distributed feedback semiconductor lasers, DFB-SL) 在外腔反馈等作用下能输出混沌光, 被广泛应用于光纤传感<sup>[1,2]</sup>、混沌激光保密通信<sup>[3-7]</sup>和高速随机数产生<sup>[8,9]</sup>等领域. 目前, 外腔反馈半导体激光器输出混沌光被认为是优质混沌熵源之一<sup>[10-15]</sup>. 由于激光在外腔中的反馈使其输出的混沌光具有弱周期性, 表现为自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 曲线<sup>[16]</sup>中具有明显的延时特征 (time delay signature, TDS) 峰, 这将影响混沌激光的应用效果, 例如, 在混沌保密通信中, TDS 的存在会泄漏重要参量, 窃密者可以据此对信息进行重构<sup>[17,18]</sup>; 在高速随机数发生器中, TDS 将导致随机码具有弱周期性, 制约了随

机码的统计性能<sup>[8,9]</sup>; 对于混沌激光雷达, TDS 峰会导致测量精度下降, 对目标预判造成影响<sup>[19]</sup>. 另外, 混沌载波信号的带宽, 对信息信号传输速率起决定作用<sup>[20,21]</sup>, 所以为了增强基于混沌保密通信的安全性和传输能力, 在有效抑制 TDS 的基础上提高带宽成为混沌激光领域的研究热点. Wang 等<sup>[22]</sup>的研究证明了利用半导体激光器混沌光非相干延迟自干涉方案产生宽带混沌信号, 在提升功率谱平坦度的同时抑制了混沌光的延时特征, 改善了信号概率分布的对称性, 有利于作为产生高质量随机数的物理熵源. Zhao 等<sup>[23]</sup>研究了自相位调制光反馈半导体激光器产生的混沌光, 给出了获得具有低延时特征和较高带宽混沌光的参数条件. Sun 等<sup>[24]</sup>仿真研究了具有双路互注入的两个半导体激光器之间的混沌同步, 并且对时延特征的抑制效果、同步性能以及输出混沌光的带宽进行了研究, 其带宽

\* 吉林省科技发展计划 (批准号: 20190201135JC) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: FYLCUST@163.com

可达 3.319 GHz. Cui 和 Zhang [25] 数值研究了基于单路相位调制光反馈的混沌保密通信系统, 通过混沌同步使原始消息在接收端被成功解调. Zhang 等 [26] 研究了混沌激光注入的半导体激光器, 发现在非注入锁定条件下的参数不匹配有助于时延特征的抑制. 冯玉玲团队 [27] 数值研究了具有双路相位调制光反馈的半导体激光器输出的混沌光, 在时延特征被有效抑制的条件下获得混沌光的最大带宽约为 7.2 GHz, 他们 [28] 也采用数值研究了具有外光注入的双路滤波光反馈半导体激光器系统, 通过恰当选取参数值的区间, 在延时特征被有效抑制的同时, 获得了 3 dB 带宽约为 8.8 GHz 的混沌光. 本文提出了一种具有外光双路注入自混沌光相位调制光反馈的半导体激光器系统, 用于抑制半导体激光器输出混沌激光的 TDS 并提高其带宽, 数值研究表明了该系统的有效性, 并对结果进行了物理分析.

## 2 理论模型

将具有延时光反馈的 DFB-SL 作为主激光器 (master laser), 将具有自混沌光相位调制光反馈的 DFB-SL 作为从激光器 (slave laser), 并将主激光器输出的混沌光双路注入到从激光器中, 构成具有外光双路注入自混沌光相位调制光反馈的主从

激光器系统, 其结构示意图见图 1, 其中 M-DFB-SL 是主激光器, S-DFB-SL 是从激光器; FC (optical fiber coupler) 是光纤耦合器; VA (variable attenuator) 是可调光衰减器; PM (phase modulation) 是相位调制器; Amplifier 是信号放大器, 用于放大电信号; ISO (optical isolator) 是光隔离器; OC (optical circulator) 是光环型器; Delay line 是光纤延时线, 使通过它的光信号产生时延; PD (photo-detector) 是光电探测器; OSC 是示波器. 图 1 中 M-DFB-SL 输出的激光经过 OC1, FC1 和 VA1 再通过 OC1 反馈回 M-DFB-SL, 即形成主激光器的外腔光反馈. M-DFB-SL 输出的激光经过 OC1 和 FC1 后的另一路光先通过 ISO1, 然后经过由 FC2, VA2, VA3 和 FC3 等器件组成的双路径, 之后再通过 ISO2, FC4 和 OC2 注入到 S-DFB-SL 中, 即形成了主激光器对从激光器的双路外光注入. S-DFB-SL 输出的光经过 OC2 和 FC5 后被分为两束, 其中一束光经过 VA4, PM, FC4 和 OC2 反馈回到 S-DFB-SL; 另一束光经 FC6 又被分为两束, 其中一束光经 PD1 转换成电信号, 再经过 Amplifier 放大后作为 PM 的驱动信号, 即形成从激光器的自混沌光相位调制光反馈, 另一束光经过 PD2 转换为电信号, 再输入到 OSC 中, 用于对信号和波形的观测.

图 1 所示系统的动力学速率方程为 [29,30]

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ \frac{g[N_m(t) - N_0]}{1 + \varepsilon|E_m(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} E_m(t) + \frac{K_m}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_m) \exp(-i\omega_m \tau_m), \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = P_m J_{th} - \frac{N_m(t)}{\tau_N} - \frac{g[N_m(t) - N_0]}{1 + \varepsilon|E_m(t)|^2} |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_s(t)}{dt} = & \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ \frac{g[N_s(t) - N_0]}{1 + \varepsilon|E_s(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} E_s(t) + \frac{K_s}{\tau_{in}} E_s(t - \tau_s) \exp(-i\omega_s \tau_s) \exp[i\phi_{PM}(t)] \\ & + \frac{K_1}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_1) \exp(-i\omega_m \tau_1 + i2\pi\Delta f t) + \frac{K_2}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_2) \exp(-i\omega_m \tau_2 + i2\pi\Delta f t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dN_s(t)}{dt} = P_s J_{th} - \frac{N_s(t)}{\tau_N} - \frac{g[N_s(t) - N_0]}{1 + \varepsilon|E_s(t)|^2} |E_s(t)|^2, \quad (4)$$

$$\phi_{PM}(t) = \Omega \cdot P \left( |E_s(t - \tau_{PM})|^2 \right) \cdot \pi, \quad (5)$$

方程 (1)—(5) 中, 角标 m 与 s 分别代表主激光器和从激光器, 而角标 1 与角标 2 分别代表主激光器到从激光器的两个注入路径.  $E_m(t)$  和  $E_s(t)$  分别表

示主、从激光器激光的慢变电场复振幅;  $N_m(t)$  和  $N_s(t)$  分别表示主、从激光器工作物质的载流子密度;  $\omega_m$  和  $\omega_s$  分别表示主、从激光器输出激光的中心场角频率;  $K_1$  和  $K_2$  分别表示主激光器到从激光器的双路注入系数;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别表示主激光器到从激光器双路注入光的延迟时间;  $K_m$  和  $K_s$  分别表示主、从激光器中反馈腔的反馈系数;  $\tau_m$  和  $\tau_s$  分别表

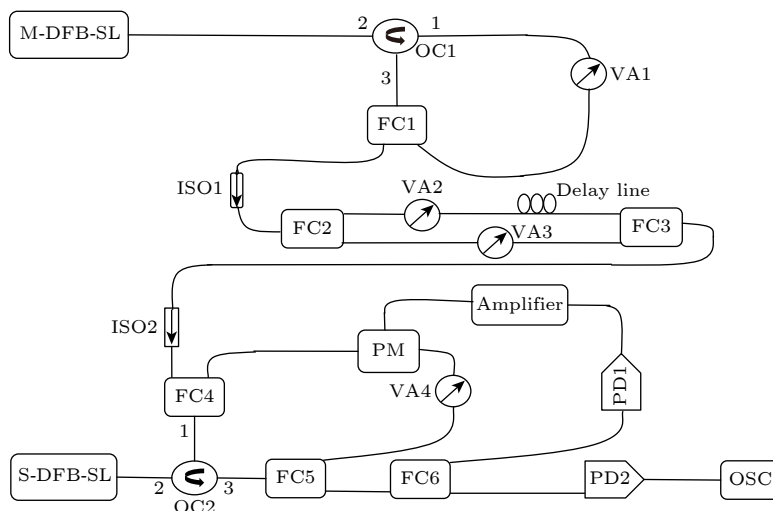


图 1 具有外光双路注入的自混沌光相位调制的光反馈半导体激光器系统的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of semiconductor laser system with external double optical injection and phase modulation optical feedback by self chaos light.

示主、从激光器外腔延迟时间;  $\alpha$  是线宽增强因子;  $g$  是激光器微分增益系数;  $N_0$  是透明载流子密度;  $\varepsilon$  是饱和增益系数;  $\tau_p$  是激光器中光子的寿命;  $\tau_N$  是激光器中载流子寿命;  $P_m$  和  $P_s$  分别表示主、从激光器抽运因子;  $J_{th}$  是阈值电流密度,  $J_{th} = N_{th}/\tau_N$ , 其中  $N_{th} = N_0 + 1/(g\tau_p)$ ;  $\tau_{in}$  表示光子在激光腔中的往返时间, 本文对主从激光器的取值相同.  $\phi_{PM}(t)$  是相位调制器对反馈光信号所产生的相移,  $P$  为光强归一化系数, 取  $P = 1.5 \times 10^{-5}$ ,  $\Omega$  是相位调制系数,  $\tau_{PM}$  是相位调制器驱动信号的延时, 其由光伏转换以及信号在光纤和电缆中的传输产生.

自相关函数是 TDS 的主要表征方法, 本文所用自相关函数 (ACF) 定义<sup>[16]</sup>为

$$\begin{aligned} & \text{ACF} \\ &= \frac{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle] [I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $I(t) = |E(t)|^2$  表示激光器输出光的强度;  $\langle \cdot \rangle$  表示对时间求平均;  $\Delta t$  表示时间延迟; 用自相关函数表征信号  $I(t)$  与经过时延  $\Delta t$  之后的信号  $I(t + \Delta t)$  之间的相关性, 相关程度越高, 自相关函数值越大. 将系统输出光的自相关函数曲线中的最大峰值即延时特征峰的最大值定义为  $\beta$ , 用它来定量描述混沌光的 TDS,  $\beta$  被称为延时特征值, 一般认为当  $\beta < 0.2$  时, 延时特征峰较难辨别, 即认为 TDS 被较好抑制 [23].

### 3 TDS 的数值研究和结果分析

对于具有外光双路注入的自混沌光相位调制光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external double optical injection and phase modulation optical feedback by self chaos light, SL-EDOI-PMOFBSCL), 首先研究从激光器的外腔延迟时间  $\tau_s$  对输出光的 TDS 的影响, 然后研究反馈系数  $K_m$  和  $K_s$  以及注入系数  $K_1$  和  $K_2$  对 TDS 的影响, 最后在相同的参数条件下将 SL-EDOI-PMOFBSCL 对 TDS 的抑制效果和具有外光双路注入的光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external double optical injection and optical feedback, SL-EDOI-OF) 以及具有外光单路注入的自混沌光相位调制光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external single optical injection and phase modulation optical feedback by self chaos light, SL-ESOI-PMOFBSCL) 系统进行对比和分析。

### 3.1 外腔延时对 TDS 的影响

参数取值如下:  $a=5.0$ ,  $g=8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $N_0=1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $\tau_P=1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$ ,  $\tau_N=2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$ ,  $\varepsilon=2.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ ,  $P_m=1.3$ ,  $P_s=1.6$ ,  $K_m=K_s=0.1$ ,  $\Delta f=3 \text{ GHz}$ ,  $\Omega=3$ ,  $K_1=K_2=0.2$ ,  $\tau_m=2 \text{ ns}$ ,  $\tau_1=2.6 \text{ ns}$ ,  $\tau_2=7 \text{ ns}$ ,  $\tau_{PM}=6 \text{ ns}$ <sup>[23,31]</sup>. 使用以上参数通过四阶龙格库塔法对方程 (1)–(6) 进行数值求解, 得到了  $\tau_s$  分别为 2.6, 3, 3.4 ns 时从



激光器输出混沌光的时间序列和对应的自相关函数曲线, 通过比较发现  $\tau_s = 3$  ns 时自相关函数曲线中延时特征峰的最大值即  $\beta$  值最小, 如图 2 所示. 由图 2(a) 可见, 信号幅值随时间呈无规则的起伏变化, 这表明此状态下半导体激光器输出的是混沌光. 图 2(b) 中延时特征峰最大值在图中已标注, 由此标注可见: 在延时  $\Delta t = 2.33$  ns 处出现的最高延时特征峰的纵轴值 (即延时特征值  $\beta$ ) 约为 0.0748, 远小于 0.2, 并在延时  $\Delta t = n\tau_1, n\tau_2, n\tau_m, n\tau_s, n\tau_{PM}$  ( $n$  为正整数) 处均无明显特征峰, 所以输出混沌光的 TDS 得到了有效的抑制.

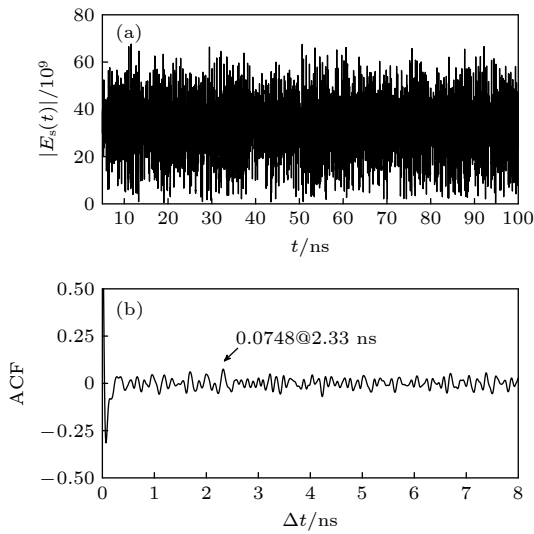


图 2 SL-EDOI-PMOFBSCL 在延迟时间  $\tau_s = 3$  ns 下输出混沌激光的 (a) 时间序列和 (b) 对应的自相关函数曲线  
Fig. 2. Time series (a) and the corresponding ACF curves (b) of chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL at times delay  $\tau_s = 3$  ns.

### 3.2 反馈系数和注入系数对 TDS 的影响

首先研究反馈系数  $K_m$  和  $K_s$  对 TDS 的影响, 之后研究注入系数  $K_1$  和  $K_2$  对 TDS 的影响, 进而研究反馈系数  $K_s$  和注入系数  $K_2$  对 TDS 的影响.

#### 3.2.1 主从激光器反馈系数 $K_m$ 和 $K_s$ 的影响

以反馈系数  $K_m$  和  $K_s$  作为控制参数, 其余参数取值与图 2 相同, 数值求解方程 (1)–(6), 得到延时特征值  $\beta$  随  $K_s$  和  $K_m$  变化的二维图, 如图 3 所示.

从图 3 可以看出,  $\beta$  随  $K_s$  和  $K_m$  变化的趋势及原因如下: 当  $K_m$  和  $K_s$  趋近于 0 时, 相当于主激光器对从激光器注入周期性信号, 同时从 SL 无反馈腔, 所以此时图 3 的左下角显示的  $\beta$  值较大, 即具有较大的延时特征值. 保持  $K_s$  不变时, 当  $K_m$  在

(0.01, 0.1) 区间内逐渐增大时, 主激光器注入到从激光器光的复杂程度随之增大, 因此从激光器输出光的  $\beta$  呈现减小的趋势, 在此区间内,  $\beta$  值都小于 0.2, 即 TDS 被有效抑制; 当  $K_m$  在 (0.1, 0.2) 内逐渐增大时,  $\beta$  值随之增大, 这是由于较大的  $K_m$  使主激光器输出光具有弱周期性, 即注入到从激光器中的激光具有弱周期性. 另一方面, 当  $K_m$  保持不变, 随着  $K_s$  增大, 整体上看,  $\beta$  随之减小. 这是由于从激光器中存在自混沌光相位调制光反馈, 抑制了外光注入和从半导体激光器的外腔反馈引起的 TDS, 综上, 在下文研究中取延时特征被较好抑制的参数区间, 如取  $K_s = 0.1$ ,  $K_m = 0.06$ .

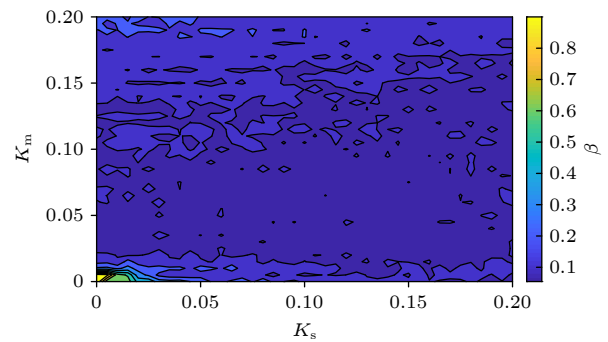


图 3 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌光延时特征值  $\beta$  随参数  $K_s$  和  $K_m$  变化的二维图

Fig. 3. Two-dimensional maps of the time-delay characteristic value  $\beta$  in the parameter space of  $K_s$  and  $K_m$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

#### 3.2.2 注入系数 $K_1$ 和 $K_2$ 的影响

以注入系数  $K_1$  和  $K_2$  作为控制参数, 根据图 3, 取  $K_s = 0.1$ ,  $K_m = 0.06$ , 其余参数的取值与图 3 相同, 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 得到延时特征值  $\beta$  随  $K_1$  和  $K_2$  变化的二维图, 如图 4 所示,  $\beta$  值都小于 0.2, 即 TDS 被有效抑制. 在图 4 右上角区域, 如  $K_1 \geq 0.2$  且  $K_2 \geq 0.2$  内, 对应的  $\beta$  较小, 这是因为此时  $K_1$  和  $K_2$  都较大, 则双路注入光的干涉效应对从激光器状态的扰动较强, 从而  $\beta$  值较小.

#### 3.2.3 反馈系数 $K_s$ 和注入系数 $K_2$ 的影响

根据图 4, 取 TDS 被较好抑制的参数值  $K_1 = 0.2$ , 以反馈系数  $K_s$  和注入系数  $K_2$  作为控制参数, 其他参数的取值与图 4 相同, 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 给出延时特征值  $\beta$  随  $K_s$  和  $K_2$  变化的二维图, 如图 5 所示, 在所选参数范围内, 此图整体

上 $\beta$ 值都小于0.2, 即延时特征被有效抑制. 相对来说, 图5右上角区域 $\beta$ 值较小, 这是因为注入混沌光和反馈混沌光共同扰动作用的结果.

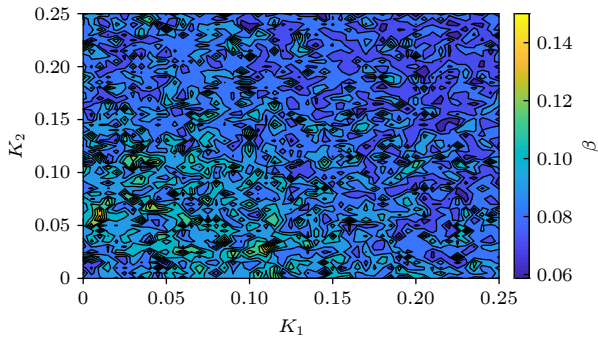


图4 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激的延时特征值 $\beta$ 随参数 $K_1$ 和 $K_2$ 变化的二维图

Fig. 4. Two-dimensional maps of the time-delay characteristic value  $\beta$  in the parameter space of  $K_1$  and  $K_2$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

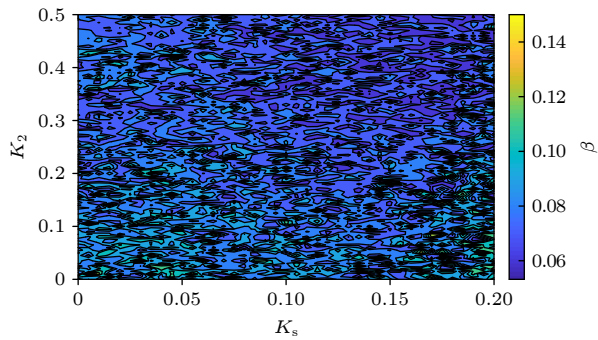


图5 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌光的延时特征值 $\beta$ 随参数 $K_s$ 和 $K_2$ 变化的二维图

Fig. 5. Two-dimensional maps of the time-delay characteristic value  $\beta$  in the parameter space of  $K_s$  and  $K_2$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

### 3.3 抽运因子 $P_m$ 对TDS的影响

根据图5, 取对应较小的延时特征值的 $K_2 = 0.2$ ,  $K_s = 0.14$ , 以抽运因子 $P_m$ 作为控制参数, 其他参数的取值同图5, 利用方程(1)–(6)的数值结果, 得到延时特征值 $\beta$ 随 $P_m$ 变化的曲线, 如图6所示. 当 $P_m$ 在区间(1.1, 1.4)内逐渐增大时, 由于主激光器输出光对从激光器的扰动作用随之增强, 使系统输出的混沌光无序性增强, 延时特征值 $\beta$ 随之下降, 当 $P_m \in (1.4, 1.7)$ 并逐渐增大时, 增益饱和现象使主激光器输出光的光强逐渐平稳, 并且其混沌程度随之减弱, 所以随着注入光状态的变化则从激光器输出的光具有弱周期性, 使得 $\beta$ 值随之呈现

逐渐增大的趋势. 该结果与文献[28]中延时特征值 $\beta$ 随 $P_m$ 变化曲线的整体趋势基本相符, 但这里曲线的 $\beta$ 值远小于文献[28]中对应曲线的 $\beta$ 值, 这阐明了本文所用方案对TDS抑制的效性更好. 下文研究中取TDS被较好抑制的 $P_m = 1.4$ .

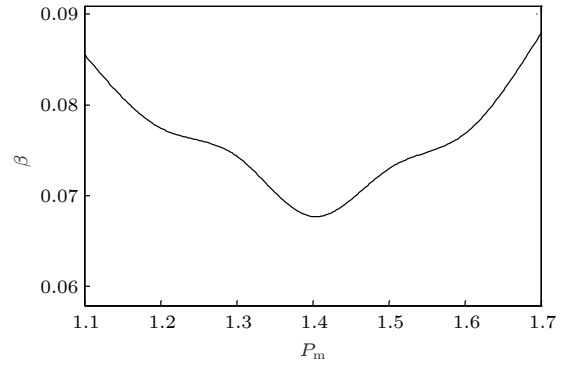


图6 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌光的延时特征值 $\beta$ 随 $P_m$ 的变化曲线

Fig. 6. Curve of the time delay characteristic values  $\beta$  with  $P_m$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

### 3.4 主从激光器频率失谐 $\Delta f$ 对TDS的影响

以主从激光器的失谐 $\Delta f$ 作为控制参数, 根据图6取TDS被较好抑制的 $P_m = 1.4$ , 其他参数的取值同图6, 利用方程(1)–(6)的数值解得到延时特征值 $\beta$ 随 $\Delta f$ 变化曲线, 如图7所示, 此图内的 $\beta$ 都小于0.1, 即TDS被有效抑制; 但由于从激光器含有自混沌光相位调制光反馈, 使此图的纵轴 $\beta$ 值随横轴 $\Delta f$ 的变化呈起伏状态, 比较而言在正的频率失谐条件下 $\beta$ 值较小, 即TDS被较好抑制.

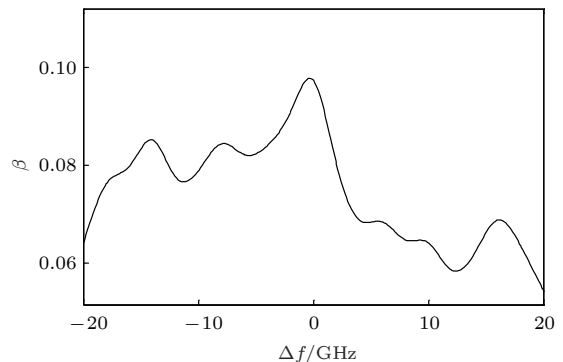


图7 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激光的延时特征值 $\beta$ 随 $\Delta f$ 的变化曲线

Fig. 7. Curve of the time delay characteristic values  $\beta$  versus  $\Delta f$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

### 3.5 结果的对比和分析

为了表明本文所提出的方案 (SL-EDOI-PMOFBSCL) 对 TDS 具有较好的抑制效果, 将 (SL-ED-OIPMOFBSCL) 对 TDS 的抑制效果和具有外光双路注入的光反馈半导体激光器 (SL-EDOI-OF) 以及具有外光单路注入的自混沌光相位调制光反馈半导体激光器 (SL-ESOI-PMOFBSCL) 进行对比和分析. 对于 SL-EDOI-OF 系统, 相当于图 1 所示方案中不存在 PM, PD1, VA4 和 Amplifier, 即 (5) 式中的  $\phi_{PM} = 0$ ; 对于 SL-ESOI-PMOFBSCL 系统, 相当于将 (3) 式中的  $K_1 = 0$ , 即具有外光单路注入.

分别以  $K_2$  和  $K_s$  作为控制参数, 根据图 7 取正的频率失谐  $\Delta f = 3$  GHz, 其他参数的取值与图 7, 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 得到 3 个系统输出混沌光的延时特征值  $\beta$  的变化曲线, 如图 8 所示, 其中图 8(a) 中  $K_s = 0.14$ , 图 8(b) 中  $K_2 = 0.2$ .

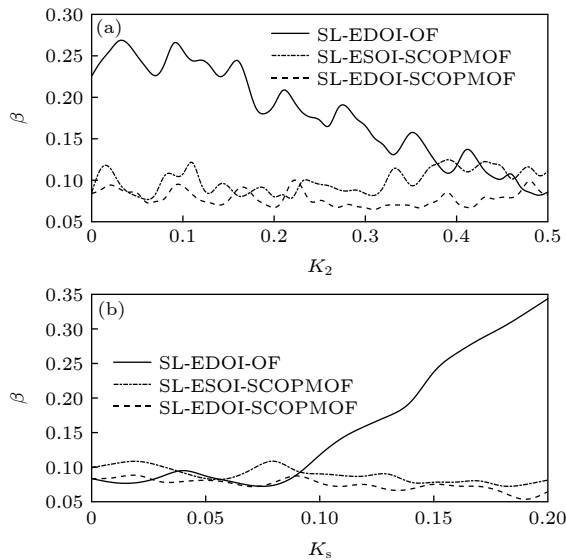


图 8 对于 SL-EDOI-OF 和 SL-ESOI-PMOFBSCL 以及 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出的混沌光 (a) 延时特征值  $\beta$  随  $K_2$  和 (b)  $K_s$  的变化曲线

Fig. 8. Curves of the time delay characteristic value  $\beta$  versus (a)  $K_2$  and (b)  $K_s$  for chaotic laser from the SL-EDOI-OF, SL-ESOI-PMOFBSCL and SL-EDOI-PMOFBSCL.

通过比较图 8(a) 和图 8(b) 可见, 在所选控制参数取值范围的大部分区间内, SL-EDOI-PMOFBSCL 和 SL-ESOI-PMOFBSCL 两个系统对 TDS 抑制的效果明显优于 SL-EDOI-OF 系统, 其物理原因是: 前两个系统的从激光器反馈腔中的自混沌光相位调制器产生的相移能消除由于从激光器光

反馈腔产生的 TDS, 此作用随着主激光器的反馈系数  $K_2$  的增大而变小, 但随着从激光器反馈系数  $K_s$  的增大而变大, 所以在图 8(a) 的左边区域, 即当  $K_2$  取值在 (0, 0.36) 内时, 前两个系统 (即 SL-EDOI-PMOFBSCL 和 SL-ESOI-PMOFBSCL) 的  $\beta$  值小于第三系统 (即 SL-EDOI-OF) 的  $\beta$  值; 在图 8(b) 的右边区域, 即当  $K_s$  取值在 (0.1, 0.2) 内时, 前两个系统的  $\beta$  值小于第三系统的  $\beta$  值. 再比较前两个系统 (即 SL-EDOI-PMOFBSCL 和 SL-ESOI-PMOFBSCL) 在图 8(a) 和图 8(b) 中对应的曲线, 从曲线整体来看, 前者对于 TDS 的抑制效果较好, 由图 8(a) 可见前者对应曲线的  $\beta$  最小值约为 0.06463, 后者  $\beta$  最小值约为 0.07831; 由图 8(b) 可见前者对应曲线的  $\beta$  最小值约为 0.05363, 后者  $\beta$  最小值约为 0.07704. 其物理原因是: 在 SL-EDOI-PMOFBSCL 系统中, 主激光器到从激光器的双路注入光场之间的干涉效应对 TDS 有抑制作用. 综上, 比较而言 SL-EDOI-PMOFBSCL 系统对其输出混沌光的 TDS 的抑制效果最好, 即证明了本文提出的方案 (SL-EDOI-PMOFBSCL) 对 TDS 抑制的有效性.

## 4 带宽的数值研究和结果分析

在 SL-EDOI-PMOFBSCL 系统中 TDS 被有效抑制的基础上, 对输出混沌激光的带宽进行研究.

### 4.1 反馈系数 $K_m$ 和 $K_s$ 对带宽的影响

#### 4.1.1 反馈系数 $K_m$ 的影响

研究主激光器的反馈系数  $K_m$  对带宽的影响, 取  $\Delta f = 3$  GHz, 反馈系数  $K_m = 0.06$ , 其他参数的取值与图 7 对应相同, 用方程 (1)–(6) 的数值结果, 得到系统输出光的时间序列和对应的功率谱如图 9 所示. 由图 9(a) 的时间序列可见: 信号幅值无规律起伏, 表明系统输出的是混沌光. 图 9(b) 为对应的混沌光的功率谱, 其中的白色曲线是对功率谱进行平滑后得到的, 经过分析得到此功率谱对应的 3 dB 带宽 (bandwidth, BW) 约为 10.42 GHz; 当取  $K_m = 0.1$ , 其他参数的取值和图 9, 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 并采用与图 9(b) 相同的处理和分析方法, 得到混沌光的 3 dB 带宽约为 7.84 GHz, 即系统输出混沌光的带宽随  $K_m$  值的变化而变化.



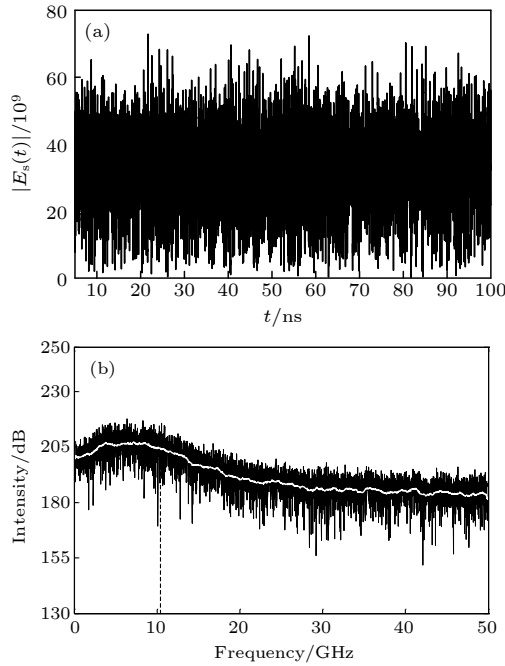


图 9 SL-EDOI-PMOFBSCL 在反馈系数  $K_m = 0.06$  下输出混沌激光的 (a) 时间序列和 (b) 对应的功率谱. 其中 (b) 中的虚线标示了混沌光的 3 dB 带宽值

Fig. 9. Time series (a) and the corresponding power spectra (b) for chaotic laser from SL-EDOI-PMOFBSCL at feedback factor  $K_m = 0.06$ , the dashed lines in (b) indicate the value of the 3 dB bandwidth of the chaotic laser.

为了展示带宽随反馈系数  $K_m$  的变化规律, 以  $K_m$  作为控制参数, 取  $K_s = 0.2$ , 其他参数取值与图 9 相同, 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 采用与图 9(b) 相同的处理和分析方法, 得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽值随  $K_m$  的变化曲线, 如图 10 所示.

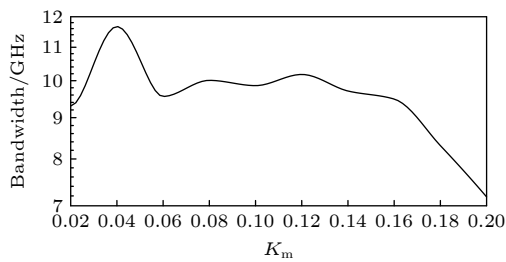


图 10 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激光带宽随反馈系数  $K_m$  的变化曲线

Fig. 10. Curve of bandwidth versus feedback coefficient  $K_m$  for chaotic laser from SL-EDOI-PMOFBSCL.

由图 10 可见, 在所用参数范围内, 随着  $K_m$  取值的逐渐增大, 带宽值先上升, 之后整体呈下降的趋势. 这是因为:  $K_m$  的取值在 (0.02, 0.04) 内增大时, 主激光器的外腔反馈使其输出光的混沌程度增大, 其注入到从激光器, 对从激光器状态的扰动作

用随之增大, 从而增大了从激光器中的弛豫振荡分量, 使其输出光带宽随之增大; 当  $K_m$  的取值在 (0.04, 0.2) 内增大时, 主激光器的外腔反馈使其输出光呈现弱周期性, 其注入到从激光器, 对从激光器的扰动作用变弱, 使从激光器输出光的带宽随之下降, 在这个下降的整体趋势中, 带宽值有小幅的起伏变化, 这是由于从激光器中的自混沌光相位调制光反馈的作用引起的.

#### 4.1.2 反馈系数 $K_s$ 的影响

研究从激光器的反馈系数  $K_s$  对带宽的影响, 分别取  $K_m = 0.12$  和  $K_m = 0.18$ , 以  $K_s$  作为控制参数, 其他参数的取值是与图 10 相同 [32,33], 利用方程 (1)–(6) 的数值结果, 采用与图 9(b) 相同的处理方法和分析方法, 得到系统输出混沌光的带宽随  $K_s$  的变化曲线, 如图 11 所示.

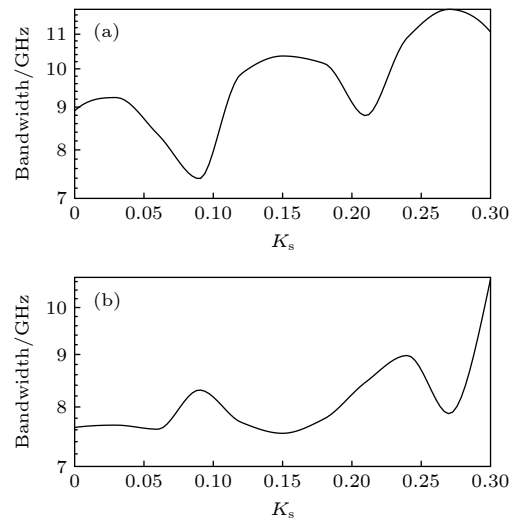


图 11 在不同  $K_m$  值下 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌光带宽随反馈系数  $K_s$  变化曲线 (a)  $K_m = 0.12$ ; (b)  $K_m = 0.18$

Fig. 11. Curves of bandwidth versus feedback coefficient  $K_s$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL at different  $K_m$ : (a)  $K_m = 0.12$ ; (b)  $K_m = 0.18$ .

由图 11(a) 和图 11(b) 可见, 在所用的参数值范围内, 随着  $K_s$  取值的增大, 两条曲线对应的带宽值都是起伏变化的, 但整体趋势带宽都是增大的, 这是由于自混沌光相位调制光反馈引起的. 比较图 11(a) 和图 11(b) 中的两条曲线, 整体上看前者曲线对应的带宽值高于后者, 这是由于前者对应的主激光器的反馈系数  $K_m$  的值小于后者, 该结果与图 10 相符.



## 4.2 注入系数 $K_2$ 的影响

取  $K_1 = 0.2$ , 其他参数取值与图 11 对应相同, 以  $K_2$  作为控制参数 [32,33], 利用方程 (1)—(6) 的数值结果, 采用与图 9(b) 相同的处理和分析方法, 得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽随  $K_2$  的变化曲线如图 12 所示. 由图 12 可见: 在所用的参数值范围内, 随着注入系数  $K_2$  取值的增大, 曲线整体呈上升的趋势, 这是因为随着  $K_2$  的增大, 主激光器对从激光器的双路注入光之间的干涉效应使注入光强增大, 进而使注入光与从激光器内光场之间的拍频效应增强, 所以系统输出混沌光的带宽随之增大 [32,33].

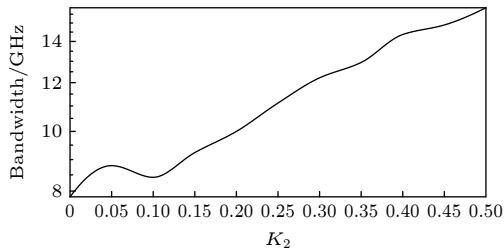


图 12 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激光的带宽随  $K_2$  的变化曲线

Fig. 12. Bandwidth versus  $K_2$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

## 4.3 抽运因子 $P_m$ 的影响

研究主激光器的抽运因子  $P_m$  对带宽的影响, 取参数  $K_2 = 0.2$ , 其他参数的取值与图 12 相同, 以  $P_m$  作为控制参数, 利用方程 (1)—(6) 的数值结果, 采用与图 9(b) 相同的处理和分析方法, 得到系统输出混沌激光带宽随  $P_m$  的变化曲线如图 13 所示. 当  $P_m \in (1.1, 1.6)$  时, 随着  $P_m$  取值逐渐增大, 主激光器输出光的复杂度增大, 则对从激光器的扰动作用随之增强, 这就拓宽了从激光器输出混沌光的带宽 [34]; 当  $P_m$  的取值在区间  $(1.6, 1.7)$  内增大时, 由

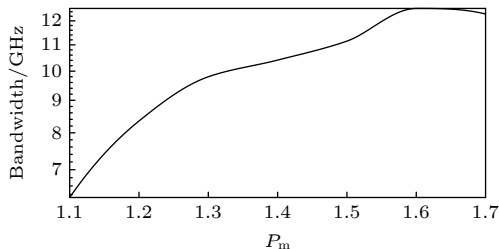


图 13 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激光的带宽随  $P_m$  的变化

Fig. 13. Bandwidth versus  $P_m$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

于主激光器的增益饱和现象, 注入到从激光器的光复杂度降低, 则使从激光器输出混沌光的带宽趋于平缓进而稍有下降. 该结果与文献 [28] 中带宽随  $P_m$  变化曲线的整体趋势基本相符, 但此处获得的混沌光带宽的最大值大于文献 [28] 中的结果, 这阐明了本文所用方案对提高混沌光带宽的有效性.

## 4.4 频率失谐 $\Delta f$ 的影响

取  $P_m = 1.4$ , 其他参数的取值与图 13 相同, 以频率失谐  $\Delta f$  作为控制参数, 利用方程 (1)—(6) 的数值结果, 得到系统输出混沌光带宽随  $\Delta f$  的变化曲线如图 14 所示. 由图 14 可见, 在所用的参数范围内, 随着  $\Delta f$  值的逐渐增大, 带宽值先减小, 然后逐渐增大, 而后再逐渐减小, 即不同的  $\Delta f$  值使主激光器对从激光器的扰动作用不同, 则使从激光器输出的混沌光所包含的频率成分发生变化, 当  $\Delta f$  取值在区间  $(0, 13)$  内时对应应有较大的带宽值, 是因为注入光与从激光器的光场之间发生拍频效应 [33], 使从激光器产生高频振荡, 所以表现为较大的带宽. 由图 14 还可见, 横轴的正负频率失谐对应的纵轴带宽值不对称, 这是因为外光注入和光反馈降低了从激光器内载流子的阈值, 使腔内振荡条件发生改变, 从而中心频率发生红移而引起的 [33].

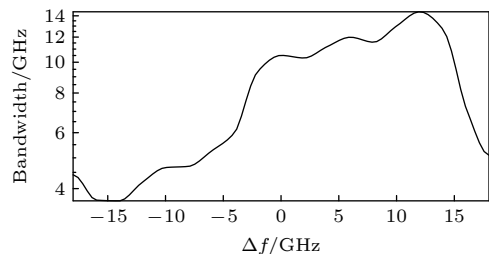


图 14 SL-EDOI-PMOFBSCL 输出混沌激光带宽随  $\Delta f$  的变化

Fig. 14. Bandwidth versus  $\Delta f$  for chaotic laser from the SL-EDOI-PMOFBSCL.

## 5 结 论

本文提出 SL-EDOI-PMOFBSCL 系统用来抑制混沌光的 TDS 并研究其带宽, 首先数值研究了反馈系数  $K_m$  和  $K_s$ 、注入系数  $K_1$  和  $K_2$  以及抽运因子  $P_m$  对 TDS 的影响, 并对结果进行了物理分析, 本文用延时特征值  $\beta$  定量描述混沌光的 TDS. 结果表明: 在所用的参数区间内, 本文提出的系统其输出混沌光的延时特征值  $\beta$  随反馈系数  $K_m$  值的增大

是随之先减小而后再增大,  $\beta$  随反馈系数  $K_s$  取值的增大而减小,  $\beta$  随注入系数  $K_1$  和  $K_2$  取值的增大而减小,  $\beta$  随抽运因子  $P_m$  取值的增大是随之先减小而后再增大, 从而得到了可以有地效抑制延时特征值  $\beta$  的最佳参数区间, 在所选用参数范围内的大部分区间内延时特征值  $\beta$  均远小于 0.2, 即说明 TDS 得到了有效的抑制. 将本文所提出的 SL-EDOI-PMOFBSCL 对 TDS 的抑制效果和 SL-EDOI-OF 以及 SL-ESOI-PMOFBSCL 进行对比和分析, 结果表明本文提出的系统能更好抑制 TDS. 然后在 TDS 被较好抑制的参数条件下, 数值研究了本文所提出的系统其输出混沌光的带宽随反馈系数等参数的变化规律并进行了物理分析. 结果表明: 在所用参数范围内带宽随反馈系数  $K_m$  的增大而先增大后减小; 带宽随反馈系数  $K_s$  的增大而增大, 带宽随注入系数  $K_2$  的增大而增大, 带宽随抽运因子  $P_m$  的增大是先增大再趋于平缓进而稍有下降. 综上对于本文所提出的方案, 在所选用的参数区间内通过优化参数的取值, 能有效地抑制系统输出混沌光的 TDS 并使其带宽有所提高, 本文获得的混沌光的 3 dB 带宽的最大值约为 16 GHz. 本文研究内容对于混沌激光的应用是有意义的.

## 参考文献

- [1] Wang Y, Wang B, Wang A 2008 *IEEE Photonics. Technol. Lett.* **20** 1636
- [2] Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, Wang D, Zhang M J, Wang A B, Wang Y C 2018 *Acta Opt. Sin.* **38** 0328016 (in Chinese) [王宇, 靳宝全, 张建国, 王东, 张明江, 王安帮, 王云才 2018 *光学学报* **38** 0328016]
- [3] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1995 *Phys. Rev. A* **51** 4181
- [4] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173
- [5] Senlin Y 2009 *J. Opt. Commun.* **30** 20
- [6] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [7] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi V 2005 *Nature* **438** 343
- [8] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Yoshimura K 2008 *Nat. Photonics.* **2** 728
- [9] Metropolis N, Ulam S 1949 *J. Am. Stat. Assoc.* **44** 335
- [10] Zhang J B, Zhang J Z, Yang Y B, Liang J S, Wang Y C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7679 (in Chinese) [张继兵, 张建忠, 杨毅彪, 梁君生, 王云才 2010 *物理学报* **59** 7679]
- [11] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Wu Z M 2010 *Opt. Express.* **18** 6661
- [12] Jafari A, Sedghi H, Mabhouti K, Behnia S 2011 *Opt. Commun.* **284** 3018
- [13] Udaltsov V S, Goedgebuer J P, Larger L, Vladimir S, Cuenot J, William T, Rhodes 2003 *Phys. Lett. E* **308** 54
- [14] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [15] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [16] Xiang S, Pan W, Zhang L 2014 *Opt. Commun.* **324** 38
- [17] Jia G T, Chen Y L, Yu J T, Ke J X, Yi L L 2018 *Study Opt. Commun.* **2** 11 (in Chinese) [贾耕涛, 陈毅龙, 余江涛, 柯俊翔, 义理林 2018 *光通信研究* **2** 11]
- [18] Zhang X X, Wu T A, Chang K G, Zhang S H 2017 *Chin. J. Lasers.* **44** 0501010 (in Chinese) [张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 张胜海 2017 *中国激光* **44** 0501010]
- [19] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 815
- [20] Wang Y, Zhang G, Wang A 2007 *Opt. Commun.* **277** 156
- [21] Yan S L 2019 *Chin. J. Lasers.* **46** 0808003 (in Chinese) [颜森林 2019 *中国激光* **46** 0808003]
- [22] Wang A, Yang Y, Wang B, Zhang B, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 8701
- [23] Zhao A, Jiang N, Liu S, Xue C P, Tang J M, Qiu K 2019 *Opt. Express* **27** 12336
- [24] Sun W Y, Hu B J, Wang H 2019 *Las. Optoelect. Prog.* **56** 211404 (in Chinese) [孙巍阳, 胡宝洁, 王航 2019 *激光与光电子学进展* **56** 211404]
- [25] Cui S, Zhang J Z 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 7905208
- [26] Zhang R, Zhou P, Yang Y G, Fang Q, Mu P H 2020 *Opt. Express.* **28** 7197
- [27] Li Z, Feng Y L, Wang X Q, Yao Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 140501 (in Chinese) [李增, 冯玉玲, 王晓茜, 姚治海 2018 *物理学报* **67** 140501]
- [28] Zhang Y N, Feng Y L, Wang X Q, Zhao Z M, Gao C, Yao Z H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 090501 (in Chinese) [张依宁, 冯玉玲, 王晓茜, 赵振明, 高超, 姚治海 2020 *物理学报* **69** 090501]
- [29] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [30] Lu D, Zhong Z Q, Xia G Q, Wu Z M 2016 *Acta Photon. Sin.* **45** 1014003 (in Chinese) [卢东, 钟祝强, 夏光琼, 吴正茂 2016 *光子学报* **45** 1014003]
- [31] Mikami T, Kanno K, Aoyama K 2012 *Phys. Rev. E* **85** 016211
- [32] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才, 张耕玮, 王安帮, 王冰洁, 李艳丽, 郭萍 2007 *物理学报* **56** 4372]
- [33] Yan J, Pan W, Li N Q, Zhang L Y, Liu Q X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 204203 (in Chinese) [阎娟, 潘炜, 李念强, 张力月, 刘庆喜 2016 *物理学报* **65** 204203]
- [34] Wang Y S, Zhao T, Wang A B, Zhang M J, Wang Y C 2017 *Las. Optoelect. Prog.* **54** 111401 (in Chinese) [王永胜, 赵彤, 王安帮, 张明江, 王云才 2017 *激光与光电子学进展* **54** 111401]

# Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback\*

Pang Shuang    Feng Yu-Ling<sup>†</sup>    Yu Ping    Yao Zhi-Hai

(*Department of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

( Received 28 January 2022; revised manuscript received 8 April 2022 )

## Abstract

Distributed feedback semiconductor lasers (DFB-SLs) are the class B lasers, and would output chaotic laser under the external disturbances, such as external optical feedback and optical injection. Chaotic laser are widely used in many fields, including optical fiber sensing, chaotic laser secure communication, and better entropy sources for generating high-speed random number. However, the chaotic laser outputted from the semiconductor lasers with external cavity optical feedback produces a time delay signature (TDS) , which limits the applications of chaotic laser. On the other hand, the bandwidth (BW) of chaotic carrier signal plays the important role in determining the transmission rate of information signal. Therefore, the TDS and BW are two important parameters that will affect chaotic laser's applications, and they are usually used to describe the chaos characteristics of chaotic laser.

In this paper, we present a new scheme used to describe the TDS and investigate the BW of chaotic laser from semiconductor laser. For this scheme, the output laser from a DFB-SL with external single optical feedback is injected in double ways into another DFB-SL with phase modulation optical feedback by self chaos light. Thus they form a semiconductor laser system with external double optical injection and phase modulation optical feedback by self chaos light (SL-EDOI-PMOFBSCL). We investigate numerically the influences of the system parameters on TDS, such as the injection coefficient and feedback coefficient. Then the suppression effects on TDS are contrasted and analyzed with two other systems, that is to say, the semiconductor laser with external double optical injection and optical feedback (SL-EDOI-OF) and the semiconductor laser with external single optical injection and phase modulation optical feedback by self chaos light (SL-ESOI-PMOFBSCL). The results indicate that the proposed scheme in this work has the better suppression effect on TDS. Then the BW of the chaotic laser is investigated under the parameters conditions of effectively suppressing TDS. The simulation results show that the scheme proposed in this work can enhance the BW of chaotic laser by appropriately selecting the parametric values, and the maximum BW value of the obtained chaotic laser reaches about 16 GHz.

**Keywords:** distributed feedback semiconductor laser, phase modulation optical feedback by self chaos light, time delay signature, bandwidth

**PACS:** 05.45.-a, 05.45.Pq, 42.55.Px, 42.65.Sf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220204

\* Project supported by the Science and Technology Development Project of Jilin Province, China (Grant No. 20190201135JC).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: FYLCUST@163.com