

半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

李增 冯玉玲 王晓茜 姚治海

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser

Li Zeng Feng Yu-Ling Wang Xiao-Qian Yao Zhi-Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 140501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180035

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180035>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[分段 Filippov 系统的簇发振荡及擦边运动机理](#)

Bursting oscillations and mechanism of sliding movement in piecewise Filippov system

物理学报.2018, 67(11): 110501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172421>

[具有早期后除极化现象的可激发系统中螺旋波破碎方式研究](#)

Spiral wave breakup manner in the excitable system with early afterdepolarizations

物理学报.2018, 67(9): 090501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172505>

[基于 Lorenz 模型的集合预报与单一预报的比较研究](#)

Comparative study of Lorenz model based ensemble forecasting and single forecasting

物理学报.2018, 67(7): 070501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172144>

[反应扩散模型在图灵斑图中的应用及数值模拟](#)

Application of reaction diffusion model in Turing pattern and numerical simulation

物理学报.2018, 67(5): 050503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171791>

[一种具有隐藏吸引子的分数阶混沌系统的动力学分析及有限时间同步](#)

Dynamic analysis and finite time synchronization of a fractional-order chaotic system with hidden attractors

物理学报.2018, 67(5): 050502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172354>

# 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽\*

李增 冯玉玲<sup>†</sup> 王晓茜 姚治海

(长春理工大学物理系, 长春 130022)

(2018年1月5日收到; 2018年3月23日收到修改稿)

提出一个新的方案用于抑制半导体激光器输出混沌光的延时特性并研究其带宽. 在该方案中, 将由伪随机信号驱动的相位调制器加到具有双路光反馈的半导体激光器的两个反馈腔中, 从而构成具有双路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器系统. 数值研究了延迟时间和反馈系数等参数对该系统输出混沌光的延时特性的影响, 用自相关函数曲线中的延时特征峰的最大值表示延时特性. 然后将该系统对延时特性的抑制效果和具有双路光反馈的分布反馈半导体激光器系统以及具有单路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器系统进行比较, 结果表明本文所提出方案的抑制效果最好. 进而基于能有效抑制延时特性的参数条件研究了具有双路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器输出混沌光的带宽, 结果表明, 抽运因子的增大和反馈系数的增加都能使系统输出混沌光的带宽变大.

**关键词:** 分布反馈半导体激光器, 双路相位调制光反馈, 延时特征, 带宽

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180035

## 1 引言

分布反馈半导体激光器 (distributed feedback semiconductor lasers, DFB-SL) 在有光反馈或外光注入等扰动下能够输出混沌激光, 可以广泛应用在高速保密通信<sup>[1]</sup>、高速真随机数的产生<sup>[2,3]</sup>、混沌激光雷达<sup>[4]</sup>和光时域反射仪<sup>[5]</sup>等方面. 目前外腔反馈半导体激光器能输出高维度的混沌激光, 因此被认为是最好的混沌熵源之一<sup>[6-9]</sup>. 但是激光在外腔的往返过程, 在输出混沌光的自相关函数曲线中产生明显的外腔延时特征 (time delay signature, TDS) 峰, 这对混沌激光的应用产生负面影响. 例如基于混沌激光作为物理熵源的高速真随机数发生器, TDS 的出现表示混沌激光中出现了弱周期性, 从而降低了混沌激光的无序性, 使生成的高速真随机数的统计性能变差<sup>[2]</sup>. DFB-SL 的中心波长是 1550 nm, 正处于光纤通信的最低损耗窗口, 其

输出混沌光的高带宽和低自相关特性 (即低的延时特性) 使其被广泛应用于保密通信和真随机数发生器等领域, 因此抑制其输出混沌光的延时特性并提高其带宽成为研究热点. Rontani 等<sup>[10]</sup>通过调节偏置电流数值研究了半导体激光器输出混沌光的 TDS. Wu 等<sup>[11,12]</sup>实验研究了相干和非相干单光反馈半导体激光器的 TDS. Lee 等<sup>[13]</sup>用两个反馈腔来增加系统的复杂度, 从而抑制了 TDS. Wang 等<sup>[14]</sup>通过延时自干涉的方法提高半导体激光器输出混沌光带宽的同时抑制其 TDS. Lu 等<sup>[15]</sup>对于具有滤波光反馈的半导体激光器, 数值研究了其输出混沌光的 TDS. Xiang 等<sup>[16]</sup>数值研究了相位调制光反馈对半导体激光器输出混沌光的 TDS 的抑制. Wu 等<sup>[17]</sup>数值研究了双路光反馈对半导体激光器输出混沌光的 TDS 的抑制. Wang 等<sup>[18]</sup>利用外光注入的方法提高光反馈半导体激光器输出混沌光的带宽. 本文提出在具有双路光反馈的半导体激光器 (semiconductor laser with double op-

\* 吉林省重点科技攻关项目 (批准号: 20160204020GX) 资助的课题.

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

tical feedback, SL-DOF) 的两个反馈腔中分别加入一个用伪随机信号驱动的相位调制器进而构成具有双路相位调制光反馈的半导体激光器 (semiconductor laser with double phase modulated optical feedback, SL-DPMOF), 研究其输出混沌光的 TDS 和带宽, 进而证明该方案能有效地抑制半导体激光器输出混沌光的 TDS, 并在有效地抑制 TDS 的参数条件下给出了系统输出混沌光的带宽随其参数的变化规律.

## 2 理论模型

本文提出的具有双路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器的结构示意图如图 1 所示.

在图 1 中, DFB-SL 发出的激光首先经过光纤耦合器 FC<sub>1</sub> 分成两束, 之后一束通过光纤耦合器 FC<sub>2</sub> 又分成两束, 分别通过可调光衰减器 VOA<sub>1</sub> 和 VOA<sub>2</sub>、相位调制器 PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>2</sub> 以及光纤反射镜 FR<sub>1</sub> 和 FR<sub>2</sub> 再反馈回 DFB-SL 中. 这里分别利用两个任意波发生器 AWG<sub>1</sub> 和 AWG<sub>2</sub> 产生的伪随机信号驱动两个相位调制器, 从而改变反馈光的相位并消除外腔延时特性; 从耦合器 FC<sub>1</sub> 输出的另一束光经过光隔离器 ISO 后, 利用光电探测器 PD 转换成电信号, 输入到示波器 OSC 中. 图 1 所示的半导体激光器系统的动力学方程如下<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned} & \frac{dE(t)}{dt} \\ &= \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[ \frac{g(N(t) - N_0)}{1 + \varepsilon|E(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right] E(t) \\ & \quad + \frac{k_{f1}}{\tau_{in}} E(t - \tau_1) \exp(-i\omega_0\tau_1) \exp[i\varphi_{PM_1}(t)] \\ & \quad + \frac{k_{f2}}{\tau_{in}} E(t - \tau_2) \exp(-i\omega_0\tau_2) \exp[i\varphi_{PM_2}(t)], \quad (1) \\ & \frac{dN(t)}{dt} \\ &= PJ_{th} - \frac{N(t)}{\tau_N} - \frac{g(N(t) - N_0)}{1 + \varepsilon|E(t)|^2} |E(t)|^2, \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $E(t)$  是激光器的慢变电场复振幅;  $N(t)$  是载流子数密度;  $\alpha$  是线宽增强因子;  $\omega_0$  是激光器的中心场频率;  $g$  是微分增益系数;  $N_0$  是透明载流子数密度;  $\varepsilon$  是饱和增益系数;  $\tau_p$  是光子寿命;  $\tau_N$  是载流子寿命;  $P$  是抽运因子;  $J_{th}$  为阈值电流密度, 且  $J_{th} = N_{th}/\tau_N$ ,  $N_{th} = N_0 + 1/(g\tau_p)$ ;  $\tau_{in}$  是激光在腔内的往返时间; 脚标 1 和 2 分别代表反馈腔 1 和反馈腔 2,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别是两个反馈腔的延迟时间,  $k_{f1}$  和  $k_{f2}$  分别是两个反馈腔的反馈系数;  $\varphi_{PM_i}$  ( $i = 1, 2$ ) 分别是两个相位调制器 (PM<sub>*i*</sub>) 产生的相移, 并且  $\varphi_{PM_i} = \pi V_{RF_i} f_{mi}(t)/V_{\pi i}$  ( $i = 1, 2$ ),  $V_{RF_i} f_{mi}(t)$  是任意波信号发生器 (AWG<sub>*i*</sub>) 加在相位调制器 (PM<sub>*i*</sub>) 上的调制电压,  $V_{\pi i}$  是相位调制器 (PM<sub>*i*</sub>) 的半波电压.

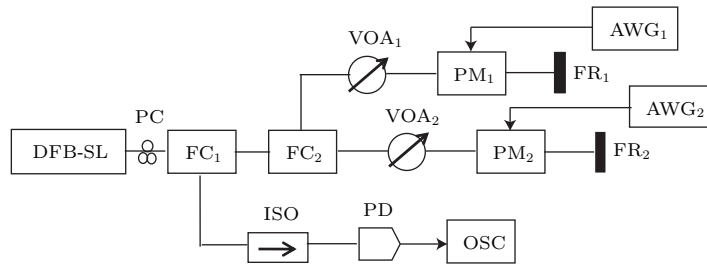


图 1 具有双路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器系统的结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the distributed feedback semiconductor lasers with double phase modulated optical feedback.

本文利用的自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 定义为<sup>[20]</sup>:

$$C(\Delta t) = \frac{\langle (I(t) - \langle I(t) \rangle)(I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (I(t) - \langle I(t) \rangle)^2 \rangle \langle (I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle)^2 \rangle}}, \quad (3)$$

(3) 式中  $I(t)$  为激光器输出光的强度,  $\Delta t$  为移动时间,  $\langle \rangle$  表示对时间求平均. 利用系统输出光的自相关函数曲线中延时特征峰的最大峰值  $\beta$  来定量

描述输出混沌光的延时特性. 一般认为  $\beta < 0.2$  时, 混沌激光就无弱周期性, 即 TDS 被较好地抑制了<sup>[20]</sup>.

### 3 TDS的数值研究和分析

图1中相位调制器产生相移  $\varphi_{PM_i} = \frac{\pi V_{RF_i} f_{mi}(t)}{V_{\pi i}}$  ( $i = 1, 2$ ), 在数值研究中  $V_{RF_i} f_{mi}(t)/V_{\pi i}$  用 MATLAB 语句给出的伪随机序列代替, 其中  $f_{mi}(t)$  为二进制伪随机序列<sup>[16]</sup>, 则  $V_{RF_i}$  是加在相位调制器 ( $PM_i$ ) 上的调制电压的最大值, 定义  $B_i = V_{RF_i}/V_{\pi i}$  并取  $B_1 = B_2 = B$  用来描述对相位调制器的调制深度<sup>[16]</sup>, 这里首先对于具有双路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器 (DFB-SL-DPMOF), 数值研究外腔延迟时间对 TDS 的影响, 然后进一步研究调制深度  $B$  对 TDS 的影响, 最后在相同的参数条件下将 DFB-SL-DPMOF 对 TDS 的抑制效果和具有双路光反馈的分布反馈半导体

激光器 (DFB-SL-DOF) 以及具有单路相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器 (DFB-SL-SPMOF) 系统进行对比和分析.

#### 3.1 延迟时间 $\tau_1$ 对 TDS 的影响

参数取值如下<sup>[21]</sup>:  $\alpha = 5.0$ ,  $g = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $\tau_p = 1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$ ,  $\tau_{in} = 8.0 \times 10^{-12} \text{ s}$ ,  $\tau_N = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$ ,  $\varepsilon = 2.5 \times 10^{-23}$ ,  $P = 1.6$ ,  $k_{f_1} = k_{f_2} = 0.1$ ,  $B_1 = B_2 = B = 1.0$ ,  $\tau_2 = 3.0 \text{ ns}$ , 以  $\tau_1$  作为控制参数, 利用四阶-龙格库塔法对 (1) 式和 (2) 式进行数值求解, 得到  $\tau_1 = 2.08, 2.48, 2.88 \text{ ns}$  这3个值时系统输出激光强度的时间序列和对应的 ACF 曲线如图2所示.

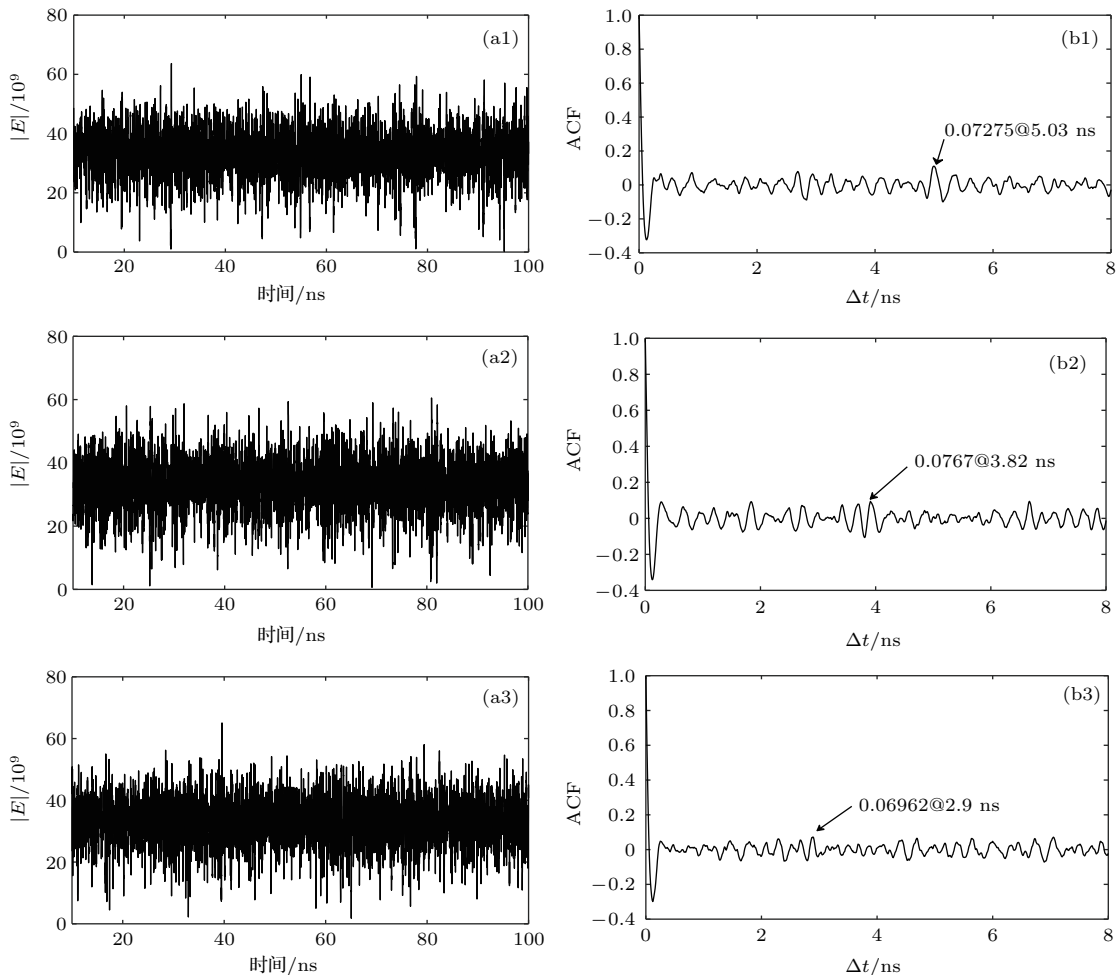


图2 DFB-SL-DPMOF 在不同的延迟时间  $\tau_1$  下输出混沌激光的时间序列 (a1)—(a3) 以及对应的 ACF 曲线 (b1)—(b3) (a1)—(b1)  $\tau_1 = 2.08 \text{ ns}$ ; (a2)—(b2)  $\tau_1 = 2.48 \text{ ns}$ ; (a3)—(b3)  $\tau_1 = 2.88 \text{ ns}$

Fig. 2. Time series (a1)—(a3) and the corresponding ACF curves (b1)—(b3) of chaotic laser from DFB-SL-DPMOF with different delay time  $\tau_1$ : (a1)—(b1)  $\tau_1 = 2.08 \text{ ns}$ ; (a2)—(b2)  $\tau_1 = 2.48 \text{ ns}$ ; (a3)—(b3)  $\tau_1 = 2.88 \text{ ns}$ .

由图 2(a1)—(a3) 可见, 光强的幅值随时间的变化呈无规则的起伏状态, 这表明此时半导体激光器输出的是混沌激光; 图 2(b1)—(b3) 中, 左边第一个尖峰几乎和纵轴重合, 这个尖峰是由弛豫振荡引起的 [14], 其余尖峰中的最高尖峰及其峰值 (即延时特征值  $\beta$ ) 已经在图中标出, 可见  $\beta$  值都小于 0.2, 即输出混沌光的 TDS 被有效地抑制了. 为了进一步显示系统输出混沌光的  $\beta$  值随延迟时间  $\tau_1$  的变化, 数值求解 (1) 式和 (2) 式, 得到拟合平滑后的延时特征值  $\beta$  随  $\tau_1$  的变化趋势曲线, 如图 3 所示.

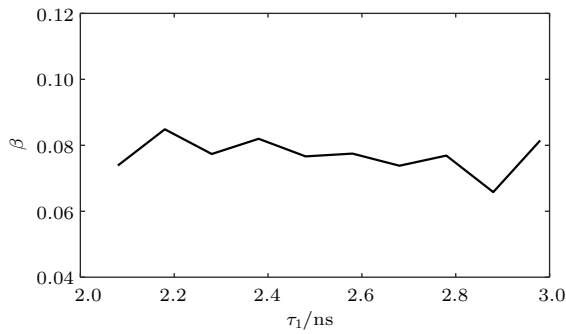


图 3 延时特征值  $\beta$  随延迟时间  $\tau_1$  的变化

Fig. 3. Variation of the time delay characteristic values  $\beta$  with the delay time  $\tau_1$ .

由图 3 可见, 在所选的  $\tau_1$  的取值范围内, 随着  $\tau_1$  的逐渐增大,  $\beta$  值有起伏地变化, 当  $\tau_1 = 2.88$  时,  $\beta$  值为最小, 所以图 3 所示的  $\beta$  值随  $\tau_1$  的变化情况和图 2(b1)—(b3) 是相符的, 即图 2(b3) (对应的  $\tau_1 = 2.88$  ns) 对 TDS 的抑制效果最好, 这是由于此时两个反馈腔的延时差  $\tau_2 - \tau_1 = 0.12$  ns  $\approx (1/2)\tau_{ro}$ ,  $\tau_{ro}(= 2\pi(gE^2/\tau_p)^{-1/2})$  为激光器的弛豫振荡周期 [14,15,17].

利用对 TDS 有较好抑制效果 (图 2 的 (b3)) 的参数条件, 下面进一步研究调制深度  $B$  对 TDS 的影响.

### 3.2 调制深度 $B$ 和反馈系数 $k_{f_1}$ 以及抽运因子 $P$ 对 TDS 的影响

首先取抽运因子  $P = 1.6$ , 其他参数的取值与图 2(b3) 相同, 数值求解 (1) 式和 (2) 式, 得到图 4(a) 所示的延时特征值  $\beta$  随参数  $B$  和  $k_{f_1}$  变化的二维图. 然后取反馈系数  $k_{f_1} = 0.1$ , 其他参数的取值与图 2(b3) 的相同, 数值求解 (1) 式和 (2) 式, 得到图 4(b) 所示的延时特征值  $\beta$  随参数  $B$  和  $P$  变化的二维图.

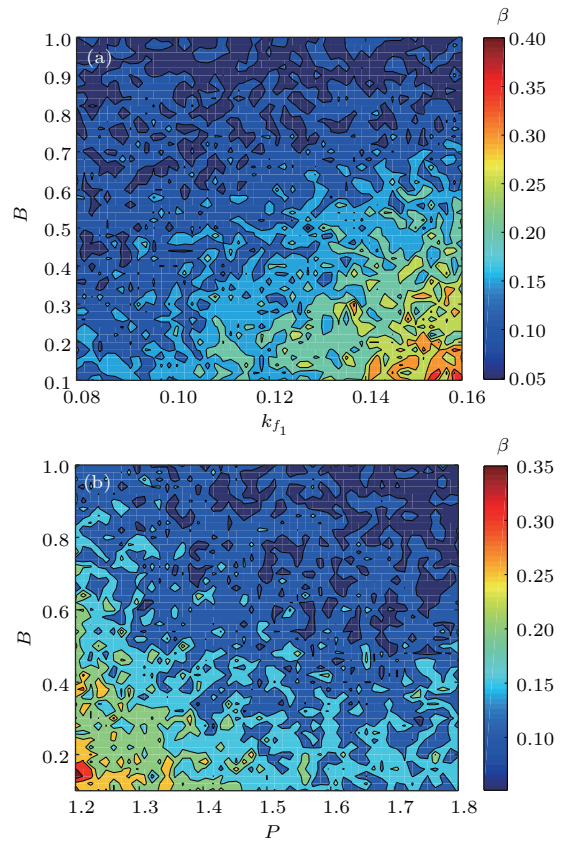


图 4 (a) 延时特征值  $\beta$  随参数  $B$  和  $k_{f_1}$  变化的二维图; (b) 延时特征值  $\beta$  随参数  $B$  和  $P$  变化的二维图

Fig. 4. (a) Two dimensional maps of the time delay characteristic values  $\beta$  in the parameter space of  $B$  and  $k_{f_1}$ ; (b) two dimensional maps of the time delay characteristic values  $\beta$  in the parameter space of  $B$  and  $P$ .

由图 4(a) 可见, 对于确定的  $k_{f_1}$ , 随着  $B$  的增大, 整体趋势  $\beta$  是变小的, 由图 4(b) 可见, 对于确定的  $P$ , 随着  $B$  的增大, 整体趋势  $\beta$  也是变小的, 即当  $B = 1$  时, TDS 被很好抑制, 这是由于  $B = 1$  时, 相位调制器产生的相移  $\varphi_{PM_i}(t)$  随着伪随机信号的变化灵敏, 能较好地消除由于外腔反馈产生的弱周期性. 对于图 4(a), 其左上角的大部分参数区间内,  $\beta$  值都小于 0.2; 但是当  $B < 0.7$  时, 随着  $k_{f_1}$  值的逐渐增大则反馈光增强, 从而使由于反馈产生的弱周期性也随之增强, 所以  $\beta$  值逐渐变大. 对于图 4(b), 其右上角的大部分参数区间内,  $\beta$  值都小于 0.2; 但是当  $B < 0.9$  时, 随着  $P$  值在区间 (1.2, 1.6) 内的增大, 系统输出混沌激光的无序性增强 [18], 从而使外腔反馈产生的弱周期性减弱, 所以  $\beta$  值逐渐变小; 随着  $P$  值在区间 (1.6, 1.8) 内的增大, 系统输出混沌激光的无序性变化不明显 [18], 所以整体趋势是  $\beta$  值的减小趋于平缓. 综上所述, 在下面的数值计算中取  $B = 1$ .



### 3.3 结果对比与分析

为了表明本文提出的方案(DFB-SL-DPMOF)能有效地抑制TDS, 这里将DFB-SL-DPMOF和DFB-SL-DOF以及DFB-SL-SPMOF这3个系统对TDS的抑制效果进行对比和分析. 首先对于DFB-SL-DOF(即双路光反馈), 则(1)式中的 $\varphi_{PM_1} = \varphi_{PM_2} = 0$ , 这里取其他参数值和图2的对应相同, 用这些参数值数值求解(1)–(2)式, 得到 $\tau_1$ 分别取2.08, 2.48, 2.88 ns时系统输出混沌激光的时间序列和对应的自相关函数曲线, 如图5所示.

由图5(a1)–(a3)可见, 激光强度的时间序列呈无规律的起伏状态, 这说明此时系统输出的是混沌激光; 由图5(b1)–(b3)都可以看到明显的尖峰, 左边第一个尖峰几乎和纵轴重合, 它是由弛豫振荡引起的<sup>[14]</sup>, 其右边的峰值依次出现在 $\Delta t$ 为外腔延迟时间 $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 整数( $n$ )倍位置的尖峰是延时特

征峰, 并随着整数( $n$ )的增加, 延时特征峰的峰值逐渐下降, 峰值最大的延时特征峰及其峰值(即延时特征值 $\beta$ )已经在图中标出. 比较图5(b1)–(b3)可见: 图5(b3)对TDS抑制的效果较好, 但是在其中依然存在峰值约为0.1889的尖峰; 比较图5(b3)和图2(b1)–(b3), 前者对TDS的抑制程度不够理想, 而后者(即DFB-SL-DPMOF)对TDS的抑制效果好.

然后对于DFB-SL-DOF, DFB-SL-SPMOF和DFB-SL-DPMOF这3个系统, 分别以反馈系数 $k_{f_1}$ 和抽运因子 $P$ 作为控制参数. DFB-SL-DOF系统的参数取值和图5(b3)对应相同; 对于DFB-SL-SPMOF系统, 则(1)式中的 $k_{f_2} = 0$ , 取 $B = 1.0$ , 其他参数取值和图2(b3)对应相同; DFB-SL-DPMOF系统的参数取值:  $B = 1.0$ , 其他参数的取值和图4对应相同; 数值求解(1)–(2)式, 得到这3个系统输出混沌光的延时特征值 $\beta$ 随 $k_{f_1}$ 和 $P$ 的变化趋势曲线, 分别如图6(a)和图6(b)所示.

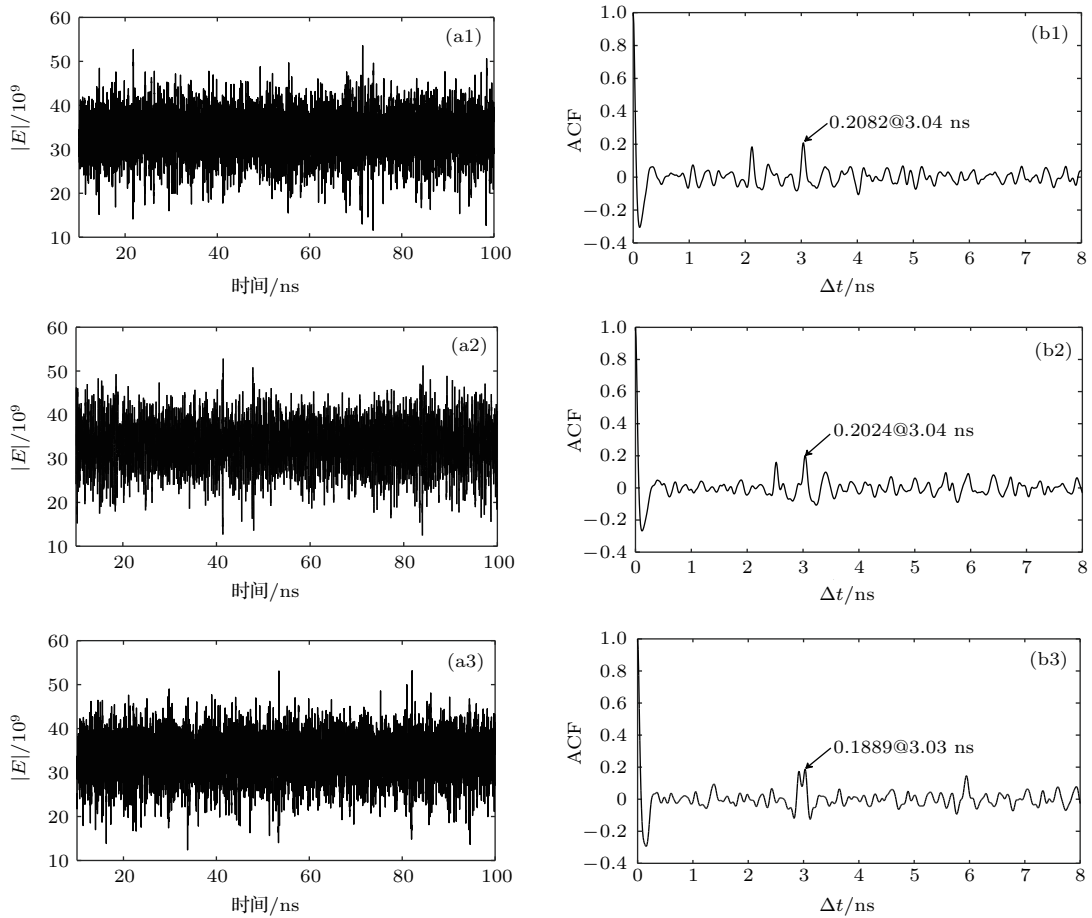


图5 DFB-SL-DOF在不同的延迟时间 $\tau_1$ 下输出混沌光的时间序列(a1)–(a3)和对应的ACF曲线(b1)–(b3) (a1), (b1)  $\tau_1 = 2.08$  ns; (a2), (b2)  $\tau_1 = 2.48$  ns; (a3), (b3)  $\tau_1 = 2.88$  ns

Fig. 5. Time series (a1)–(a3) and the corresponding ACF curves (b1)–(b3) of chaotic laser from DFB-SL-DOF with different delay time  $\tau_1$ : (a1), (b1)  $\tau_1 = 2.08$  ns; (a2), (b2)  $\tau_1 = 2.48$  ns; (a3), (b3)  $\tau_1 = 2.88$  ns.

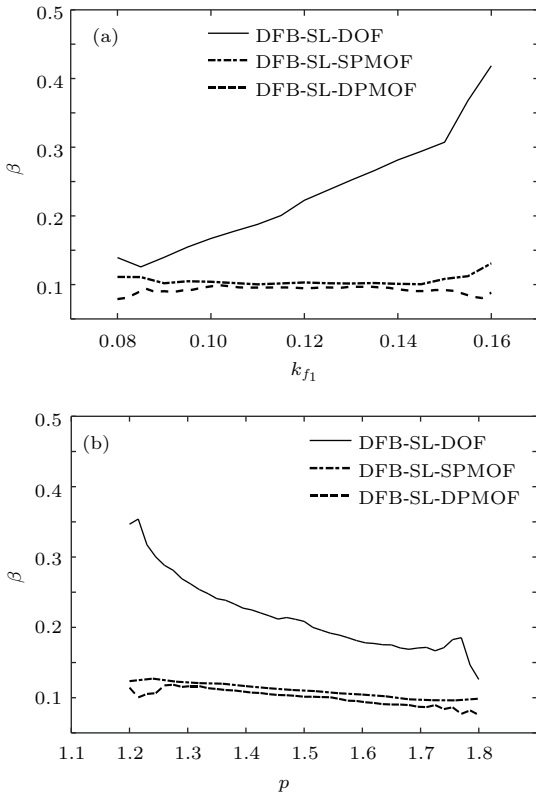


图6 对于DFB-SL-DOF, DFB-SL-SPMOF和DFB-SL-DPMOF输出的混沌激光, 延时特征值 $\beta$ 随着 $k_{f_1}$ 的变化(a)和延时特征值 $\beta$ 随着 $P$ 的变化(b)  
 Fig. 6. For chaotic laser from the DFB-SL-DOF, DFB-SL-SPMOF, and DFB-SL-DPMOF, variation of the time delay characteristic values  $\beta$  with  $k_{f_1}$  (a) and variation of the time delay characteristic values  $\beta$  with  $P$  (b).

由图6(a)和图6(b)可见: 在所选的控制参数值的区间内, DFB-SL-DPMOF系统输出混沌光的延时特征值 $\beta$ 随着控制参数的变化整体较缓慢, 曲线趋于平坦(这和图4相符), 并且 $\beta$ 值都在0.12以下, 远小于DFB-SL-DOF系统输出混沌光的延时特征值 $\beta$ , 同时也略小于DFB-SL-SPMOF系统输出混沌光的延时特征值 $\beta$ . 其原因是: 反馈腔中的相位调制器产生的相移能消除由于外腔反馈产生的TDS, 所以图6(a)和图6(b)中DFB-SL-SPMOF系统和DFB-SL-DPMOF系统输出混沌光的 $\beta$ 值小于DFB-SL-DOF系统的 $\beta$ 值; 双路相位调制光反馈与单路相位调制光反馈比较, 前者将使系统输出混沌光的混沌程度增强<sup>[22]</sup>, 所以图6(a)和图6(b)中DFB-SL-DPMOF系统输出混沌光的 $\beta$ 值小于DFB-SL-SPMOF系统的 $\beta$ 值. 综上, 比较而言DFB-SL-DPMOF系统对TDS的抑制效果最好. 这证明本文提出的方案(即DFB-SL-DPMOF)对TDS抑制的有效性.

## 4 带宽的数值研究和分析

在DFB-SL-DPMOF中的TDS被较好地抑制的基础上, 研究其输出混沌光的带宽.

### 4.1 抽运因子 $P$ 对带宽的影响

分别取抽运因子 $P = 1.2, 1.4$ , 其他参数值和图2(b3)相同, 数值求解(1)式和(2)式, 得到系统输出混沌光强度的时间序列和功率谱如图7所示.

对图7中的功率谱进行拟合, 得到平滑后的功率谱曲线, 见功率谱中白色曲线, 经过分析得到图7(b1)和(b2)对应的3 dB带宽分别为2.8 GHz和3.7 GHz. 由图7(a1)和(a2)可见激光器输出的是混沌激光, 即在所选的参数条件下, 改变抽运因子 $P$ 则激光器输出混沌光的带宽随之变化. 下面以抽运因子 $P$ 作为控制参数, 其他参数的取值和图7的对应相同, 数值求解(1)式和(2)式, 得到系统输出混沌光的3 dB带宽随抽运因子 $P$ 的变化曲线如图8所示.

由图8可见, 当抽运因子 $P$ 在区间(1.1, 1.6)内逐渐增大时, 激光器输出混沌光的带宽整体呈线性增加趋势, 带宽约增加2.0倍; 当 $P$ 大于1.6时, 带宽的增长趋于平缓. 其原因是, 系统输出激光的混沌程度随着 $P$ 在区间(1.1, 1.6)内的增大而增强, 从而使带宽随之增加; 当 $P$ 大于1.6时, 继续增大 $P$ 对系统输出激光的混沌程度影响不明显, 则对带宽的影响不明显<sup>[18]</sup>.

### 4.2 反馈系数 $k_{f_1}$ 对带宽的影响

这里根据图8取抽运因子 $P = 1.6$ , 以反馈系数 $k_{f_1}$ 作为控制参数, 其他参数的取值和图7的相同, 数值求解(1)式和(2)式, 得到混沌光的3 dB带宽随 $k_{f_1}$ 的变化曲线如图9所示.

由图9可见, 当反馈系数 $k_{f_1}$ 从0.08增加到0.16时, 激光器输出混沌光的带宽整体呈递增的趋势, 这里获得的混沌激光的带宽最大值约为7.2 GHz. 这是因为在所选的参数范围内随着 $k_{f_1}$ 的增加, 一般来说会使系统输出混沌光的复杂度增加<sup>[22]</sup>, 从而拓宽了输出混沌光的带宽. 可见在本文提出的方案中, 通过适当选择参数的取值, 可以使系统输出混沌光的带宽有所提高.

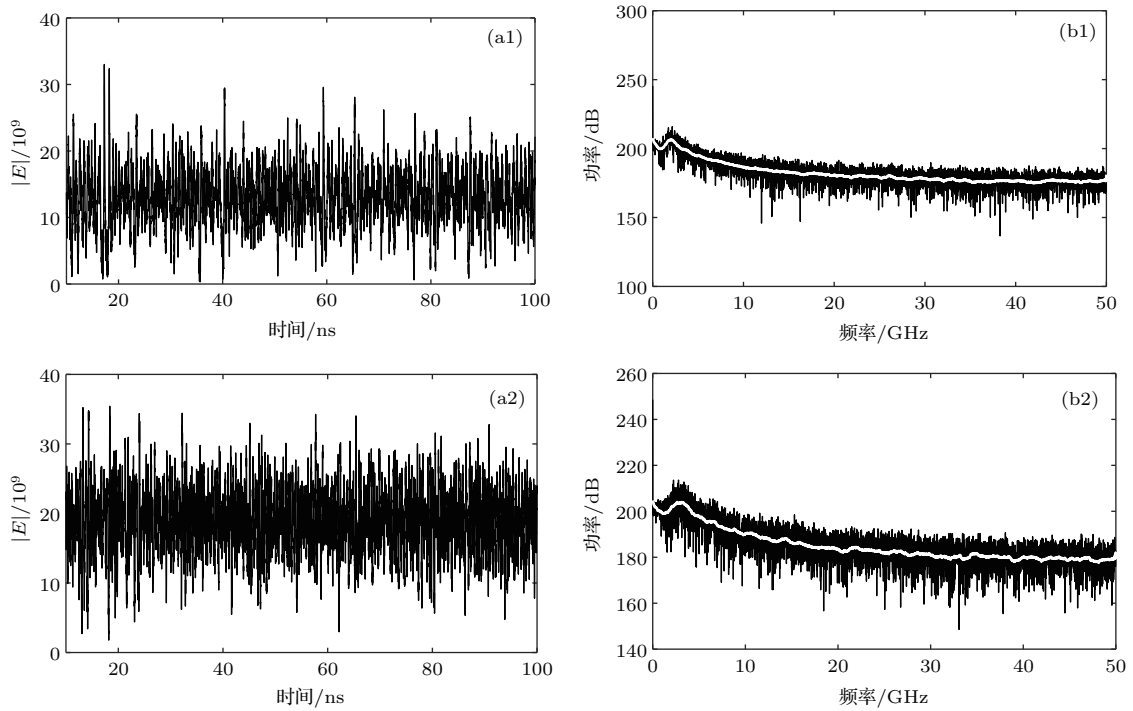


图7 不同抽运因子  $P$  下 DFB-SL-DPMOF 输出混沌光的时间序列 (a1), (a2) 及对应的功率谱 (b1), (b2) (a1), (b1)  $P = 1.2$ ; (a2), (b2)  $P = 1.4$

Fig. 7. Time series (a1), (a2) and the corresponding power spectrums (b1), (b2) of chaotic laser from DFB-SL-DPMOF with different pumping factors  $P$ : (a1), (b1)  $P = 1.2$ ; (a2), (b2)  $P = 1.4$ .

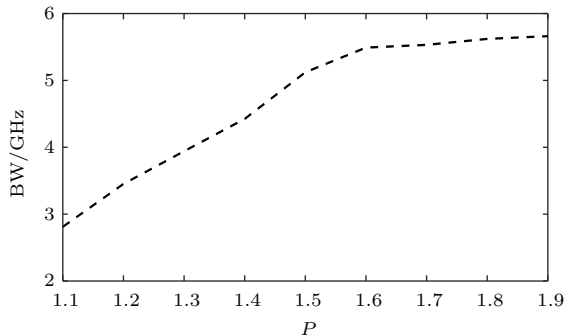


图8 DFB-SL-DPMOF 输出混沌光的带宽随抽运因子  $P$  的变化

Fig. 8. Variation of the bandwidth with pumping factor  $P$  for chaotic laser from the DFB-SL-DPMOF.

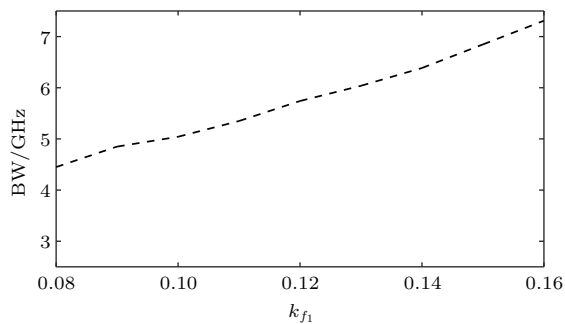


图9 DFB-SL-DPMOF 输出混沌光的带宽随反馈系数  $k_{f_1}$  的变化

Fig. 9. Variation of the bandwidth with feedback coefficient  $k_{f_1}$  for chaotic laser from the DFB-SL-DPMOF.

## 5 结 论

采用双路相位调制光反馈的方案来抑制 DFB-SL 输出混沌光的 TDS 并研究其带宽. 首先数值研究了调制深度  $B$ 、反馈系数  $k_{f_1}$  和抽运因子  $P$  对系统输出混沌光的 TDS 的影响, 结果表明: 在所选择的参数条件下, DFB-SL-DPMOF 系统 (即本文所提方案对应的系统) 输出混沌光的延时特征值  $\beta$  随着调制深度  $B$  的增加而变小,  $\beta$  随着反馈系数  $k_{f_1}$  的增加而变大,  $\beta$  随着抽运因子  $P$  的增加而变小. 并且在所选参数范围的大部分区间内  $\beta < 0.2$ , 即实现了对 TDS 的较好抑制. 进而通过对比发现, DFB-SL-DPMOF 系统对 TDS 的抑制效果比 DFB-SL-DOF 系统和 DFB-SL-SPMOF 系统好. 最后对于能较好地抑制输出混沌光 TDS 的 DFB-SL-DPMOF 系统和参数条件, 数值研究了其输出混沌光的带宽随抽运因子  $P$  和反馈系数  $k_{f_1}$  的演化关系并进行了物理分析. 数值结果表明: 当抽运因子  $P$  从 1.1 增大到 1.6 时, 激光器输出混沌光的带宽整体呈线性增长趋势, 约增加 2.0 倍, 当  $P$  大于 1.6 时, 带宽的增长趋于平缓, 这是由于抽运因子对系统输出激光的混沌程度的影响; 随着反馈系数  $k_{f_1}$  的增加整体呈现递增的趋势, 这是因为随着反



馈系数的增加,一般来说会使系统输出混沌光的复杂度增加,从而拓宽了输出混沌光的带宽.这里获得的混沌激光的带宽最大值约为7.2 GHz.所以对于本文提出的方案,通过优化参数的取值,可以在较大的参数区间内抑制混沌光的TDS并使其带宽有所提高.从而证明了本文所提出方案的有效性.本文的结果对于混沌激光的应用是有意义的.

## 参考文献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [2] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Oowada I, Kurashige T, Shiki M, Yoshimori S, Yoshimura K, Davis P 2008 *Nat. Photon.* **2** 728
- [3] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, Kanter I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 024102
- [4] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Elect.* **40** 815
- [5] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1636
- [6] Vicente R, Dauden J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Elect.* **41** 541
- [7] Jafari A, Sedghi H, Mabhouti K, Behnia S 2011 *Opt. Commun.* **284** 3018
- [8] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan L, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [9] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S, Ortin S 2009 *IEEE J. Quantum Elect.* **45** 879
- [10] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [11] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan L, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [12] Wu J G, Xia G Q, Cao L P, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 3153
- [13] Lee M W, Rees P, Shore K A, Ortin S 2005 *IEEE P-Optoelectron.* **152** 97
- [14] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, Zhang B B, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 8701
- [15] Lu D, Zhong Z Q, Xia G Q, Wu Z M 2016 *Acta Photon. Sin.* **45** 13 (in Chinese) [卢东, 钟祝强, 夏光琼, 吴正茂 2016 光子学报 **45** 13]
- [16] Xiang S, Pan W, Zhang L, Wen A, Shang L, Zhang H, Lin L 2014 *Opt. Commun.* **324** 38
- [17] Wu J, Xia G, Wu Z 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [18] 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]
- [19] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Elect.* **16** 347
- [20] Gao F, Li N Q, Zhang L Y, Ouyang Y K 2016 *J. Quantum Opt.* **22** 289 (in Chinese) [高飞, 李念强, 张力月, 欧阳康 2016 量子光学学报 **22** 289]
- [21] Mikami T, Kanno K, Aoyama K, Uchida A, Ikeguchi T, Harayama T, Sunada S, Arai K, Yoshimura K, Davis P 2012 *Phys. Rev. E* **85** 016211
- [22] Yang H B, Wu Z M, Tang X, Wu J G, Xia G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084204 (in Chinese) [杨海波, 吴正茂, 唐曦, 吴加贵, 夏光琼 2015 物理学报 **64** 084204]

# Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser\*

Li Zeng Feng Yu-Ling<sup>†</sup> Wang Xiao-Qian Yao Zhi-Hai

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

( Received 5 January 2018; revised manuscript received 23 March 2018 )

## Abstract

The center wavelength of the distribution feedback semiconductor laser is about 1550 nm, and it is in the lowest loss window of the optical fiber communication. A distribution feedback semiconductor laser (DFB-SL) can generate wideband chaotic signals under external disturbances such as optical feedback, optical injection, etc. Thus, due to the simple structure, DFB-SLs with the optical feedback are widely applied to many fields, including information security, lasers radar, and physical entropy sources for generating physical random numbers. However, optical feedback can cause weak periodicity in chaotic signals from the semiconductor laser, and increase the time delay characteristics of chaotic laser, moreover reduce the quality of random numbers generated by using chaotic signals. Meanwhile, to meet the needs of the current high speed and large capacity communication, the DFB-SL, which can generate wideband chaotic laser with low time delay characteristics, has received wide attention and become a hot research subject.

In this paper, we present a new scheme for suppressing the time delay characteristics and investigating the bandwidth (BW) of chaotic signals from the semiconductor laser. In this scheme, we build a system that is a distribution feedback semiconductor laser with double phase modulated optical feedback (DFB-SL-DPMOF). In this system, two phase modulators driven by the pseudorandom signals are respectively added to the two optical feedback cavities to eliminate the weak periodicity of the generated chaotic signals. For this system, we numerically investigate the influence of the system parameter, such as the delay time, feedback coefficient, etc., on the time delay characteristic of the chaotic laser. In this paper, the time delay characteristic of chaotic signal is expressed by the maximum value of the time delay signature (TDS) peak of the autocorrelation function curve. Then, to illuminate the effectiveness of this system, other two systems, i.e., DFB-SL with double optical feedback (DFB-SL-DOF) and DFB-SL with single phase modulated optical feedback (DFB-SL-SPMOF) are considered. We study the suppression effect of the system on the TDS among DFB-SL-DPMOF, DFB-SL-DOF and DFB-SL-SPMOF. For these three systems, we give and analyze the simulation curves of the time delay characteristic values with the feedback coefficient and the pumping factor respectively. The results indicate that our proposed scheme has the best suppression effect. Moreover, we numerically investigate the BW of chaotic signals from DFB-SL-DPMOF based on the parameter conditions suppressing TDS effectively. The results show that BW becomes large with the pumping factor and feedback coefficient increasing, and the maximum BW value of the obtained chaotic laser is about 7.2 GHz. Therefore the effectiveness of the presented scheme is numerically clarified. And the conclusions of this paper are useful for applying the chaotic laser to the secure communication field.

**Keywords:** distributed feedback semiconductor lasers, double phase modulated optical feedback, time-delay signature, bandwidth

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180035

\* Project supported by the Key Science and Technology Program of Jilin Province, China (Grant No. 20160204020GX).

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