

半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽*

张依宁 冯玉玲[†] 王晓茜 赵振明 高超 姚治海

(长春理工大学物理系, 长春 130022)

(2019年12月12日收到; 2020年2月14日收到修改稿)

外腔延时特征和带宽是影响混沌激光应用的两个重要参量. 本文将一个单路光反馈的半导体激光器输出的激光部分地注入到另一个双路滤波光反馈的半导体激光器中, 从而构成一个具有外光注入的双路滤波光反馈半导体激光器系统, 即主从激光器系统, 用于抑制混沌激光的延时特征并研究其带宽. 数值研究了外光注入系数、反馈强度、抽运因子和滤波器带宽对系统输出混沌激光的延时特征的影响, 然后将该系统对延时特征的抑制效果和具有外光注入的单路光反馈半导体激光器系统、具有外光注入的双路光反馈半导体激光器系统、具有外光注入的单路滤波光反馈半导体激光器系统以及无光注入双路滤波光反馈半导体激光器系统进行对比和分析, 结果表明本文提出的方案对延时特征的抑制效果最好. 然后在本文提出的具有外光注入的双路滤波光反馈半导体激光器系统中, 延时特征被有效抑制的参数条件下研究系统输出混沌激光的带宽, 结果表明, 通过适当选择参数的取值, 本文提出的方案可以提高系统输出混沌激光的带宽.

关键词: 半导体激光器, 滤波光反馈, 延时特征, 带宽

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191881

1 引言

半导体激光器 (semiconductor laser, SL) 是 B 类激光器, 所以在光注入或光反馈等外部扰动下可以输出混沌激光^[1-5], 并且带宽可以达到 GHz 量级. SL 输出的混沌激光可广泛应用在高速真随机数生成与应用^[6,7]、光时域反射仪^[8]、混沌保密通信^[9]和混沌激光雷达^[10]等领域. 外腔反馈半导体激光器能输出高维度的混沌激光, 被认为是较好的混沌熵源^[11-16]. 但由于外腔反馈等作用, 会导致输出的混沌激光中产生明显的外腔延时特征 (time delay signature, TDS), 这就制约了混沌激光的应用, 例如用混沌激光作为物理熵源生成高数随机数的性能将会变差; 另一方面混沌激光的带宽决定了保密通信的传输速率. 所以采取适当的措施来抑制 SL 输出混沌激光的延时特征并提高其带宽是很

有意义的. Li 和 Chan^[17] 实验和数值研究了具有光纤布拉格光栅反馈腔的单模激光器的延时特征, 数值结果给出了混沌状态对应的参数区间, 实验证实了当光纤布拉格光栅相对于激光器自由振荡频率正失谐时, 可以观察到 TDS 的最佳抑制效果. 孙巍阳等^[18] 提出了一种展宽半导体激光器混沌载波发射机带宽的方案, 数值研究了主从半导体激光器之间失谐频率、注入强度、主从激光器偏置电流和从激光器的反馈强度对混沌载波发射机带宽的影响. Schires 等^[19] 实验验证了在短反馈和长反馈相结合的情况下, 混合分布反馈半导体激光器可以输出高带宽的混沌光. Xu 等^[20] 用一个具有光纤随机光栅反馈的半导体激光器作为主激光器, 其输出注入到一个从激光器, 则从激光器能输出具有平坦功率谱的混沌光, 其带宽达到 8.5 GHz. Nguimdo 等^[21] 数值研究了半导体激光器 TDS 与其外部反馈系数之间的关系, 结果证实通过调整相位和反馈

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

[†] 通信作者. E-mail: FYLCUST@163.com

强度, 可以很好地抑制延时特征. Zhao 等^[22] 实验和数值研究了具有延迟干涉自相位调制光反馈半导体激光器产生混沌激光的有效带宽和 TDS, 在相位调制引起的频谱扩展和延迟干涉的非线性滤波的共同作用下, 可以在宽动态工作范围内产生具有平坦频谱并具有优异 TDS 抑制特性的宽带混沌. Brunner 等^[23] 通过实验和理论研究了光反馈半导体激光器输出混沌光的时间序列, 并从中提取到了时延特征信号. Uchida 等^[24] 研究表明, 通过光注入方式半导体激光器可以实现混沌信号带宽增强. Wu 等^[25] 的研究结果已证实, 在合适的反馈参数条件下, 双光反馈半导体激光器输出混沌信号的 TDS 可得到更为有效的抑制. 本文提出一个具有外光注入的双路滤波光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external optical injection and double filtered optical feedback, SL-EOI-DFOF) 系统降低半导体激光器输出混沌激光的延时特征值, 然后在 TDS 被有效抑制的条件下, 研究了系统输出混沌激光的带宽.

2 理论模型

将具有单路外腔光反馈的分布反馈半导体激光器 (distributed feedback semiconductor lasers, DFB-SL) 作为主激光器, 将具有双路滤波外腔光反馈的 DFB-SL 作为从激光器, 所提方案的系统示意图如图 1 所示.

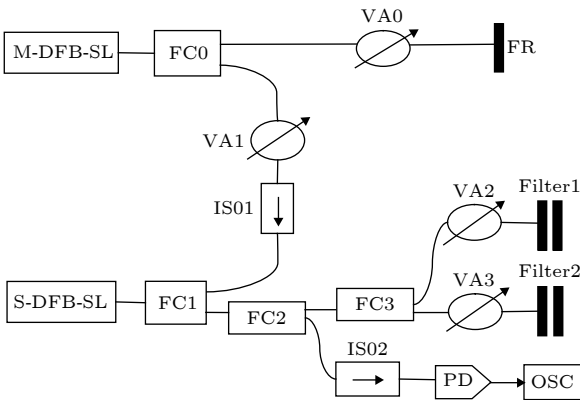


图 1 SL-EOI-DFOF 系统示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the SL-EOI-DFOF system.

图 1 中 M-DFB-SL 代表主激光器, S-DFB-SL 代表从激光器, FC (optical fiber coupler) 是光纤耦合器, VA (variable attenuator) 是可调衰减器,

ISO (optical isolator) 是光隔离器. 光纤反射镜 FR (fiber reflector) 将光反馈回 M-DFB-SL 中, 在图 1 中, M-DFB-SL 产生的激光通过 FC0, VA1, ISO1 及 FC1 注入到 S-DFB-SL 中, S-DFB-SL 输出的激光经过 FC1 和 FC2 后分成两束, 其中一束经过 FC3 又分成两束, 分别通过 VA2 和 VA3 及滤波器 Filter1 和滤波器 Filter2 再反馈回 S-DFB-SL 中; 从 FC2 输出的另一束光经过 ISO2 后, 利用光电探测器 PD (photodetector) 将光信号转化成电信号, 之后将电信号输入到示波器 OSC (oscilloscope) 中.

图 1 所示系统的动力学速率方程为^[26,27]:

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha_m) \left[\frac{g_m(N_m(t) - N_{0m})}{1 + \varepsilon_m|E_m(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right] \times E_m(t) + \frac{k_f}{\tau_{in}} E_m(t - \tau) \exp(-i\omega_m \tau), \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = P_m J_{th} - \frac{N_m(t)}{\tau_N} - \left[\frac{g_m(N_s(t) - N_{0m})}{1 + \varepsilon_m|E_m(t)|^2} \right] |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha_s) \left[\frac{g_s(N_s(t) - N_{0s})}{1 + \varepsilon_s|E_s(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right] \times E_s(t) + \frac{k_{f1}}{\tau_{in}} F_1(t) + \frac{k_{f2}}{\tau_{in}} F_2(t) + \frac{k_{in}}{\tau_{in}} E_m(t) \exp(i2\pi \Delta f t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_s(t)}{dt} = P_s J_{th} - \frac{N_s(t)}{\tau_N} - \frac{g_s(N_s(t) - N_{0s})}{1 + \varepsilon_s|E_s(t)|^2} |E_s(t)|^2, \quad (4)$$

$$\frac{dF_1(t)}{dt} = \Lambda_1 E_s(t - \tau_1) \exp(-i\omega_s \tau_1) + (i2\pi \Delta f_1 - \Lambda_1) F_1(t), \quad (5)$$

$$\frac{dF_2(t)}{dt} = \Lambda_2 E_s(t - \tau_2) \exp(-i\omega_s \tau_2) + (i2\pi \Delta f_2 - \Lambda_2) F_2(t), \quad (6)$$

其中 $E_m(t)$ 和 $E_s(t)$ 分别为主激光器和从激光器的慢变电场复振幅, 脚标 m 和 s 分别代表主激光器和从激光器, $N(t)$ 为载流子密度, P_m 和 P_s 分别为主激光器和从激光器的抽运因子, $\Delta f = \frac{\omega_m - \omega_s}{2\pi}$ 是主激光器和从激光器中心场频率之间的频率失谐, ω_m 和 ω_s 分别为主激光器和从激光器的中心场

角频率, τ 是主激光器的外腔延迟时间, k_f 是主激光器反馈腔的反馈强度, g_m 和 g_s 分别为主激光器和从激光器的微分增益系数, α_m 和 α_s 分别是主激光器和从激光器的线宽增强因子, k_{in} 是主激光器对从激光器的外光注入系数, ε_m 和 ε_s 分别是主激光器和从激光器的饱和增益系数, N_{0m} 和 N_{0s} 分别是主激光器和从激光器的透明载流子密度, τ_p 是光子寿命, τ_N 是载流子寿命, J_{th} 是阈值电流密度, 且 $J_{th} = N_{th}/\tau_N$, $N_{th} = N_0 + 1/g\tau_p$, τ_{in} 是光子在激光腔内的往返时间. 脚标 1 和 2 分别表示从激光器的反馈腔 1 和反馈腔 2, τ_1 和 τ_2 分别是两个反馈腔的延迟时间, k_{f1} 和 k_{f2} 分别表示从激光器两个反馈腔的反馈强度, Δf_1 和 Δf_2 分别表示两个反馈腔内滤波器中心频率和从激光器中心频率之间的频率失谐, A_1 和 A_2 表示两个滤波器的带宽, $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 分别表示从激光器两个反馈腔中反馈光的电场振幅.

为了描述混沌激光的延时特征, 一般利用自相关函数和互信息函数, 自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 定义为^[28]

$$C_I(\Delta t) = \frac{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}$$

其中 $I(t) = E(t)^2$ 表示混沌光强度时间序列, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均, Δt 表示移动时间. 利用从激光器输出光的自相关函数曲线中的局部最大值来定量描述混沌输出的延时特征值 β , 即 TDS. 一般认为 $\beta < 0.2$ 时, 自相关峰值较难辨别, 即认为混沌激光的延时特征得到了较好的隐藏^[29]. 互信息函数 (mutual information, MI) 定义为^[30]

$$MI(\Delta t) = \sum_{I(t), I(t+\Delta t)} p[I(t), I(t + \Delta t)] \times \lg \frac{p[I(t), I(t + \Delta t)]}{p[I(t)]p[I(t + \Delta t)]}$$

其中 $p[I(t), I(t + \Delta t)]$ 表示联合概率密度, $p[I(t)]$ 和 $p[I(t + \Delta t)]$ 分别表示边缘概率密度.

3 TDS 的数值研究和分析

首先对本文提出的 SL-EOI-DFOF 系统数值研究外腔延迟时间 τ_1 对 TDS 的影响, 然后进一步

研究外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 k_{f1} 对 TDS 的影响, 最后在相同的参数条件下将 SL-EOI-DFOF 系统对 TDS 的抑制效果和具有外光注入的单路光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external optical injection and single optical feedback, SL-EOI-SOF) 系统、具有外光注入的双路光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external optical injection and double optical feedback, SL-EOI-DOF) 系统、具有外光注入的单路滤波光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with external optical injection and single filtered optical feedback, SL-EOI-SFOF) 系统以及无光注入双路滤波光反馈半导体激光器 (semiconductor laser with double filtered optical feedback, SL-DFOF) 系统进行对比和分析.

3.1 延迟时间 τ_1 对 TDS 的影响

数值研究中的参数取值如下^[17,27]: $\alpha = 5.0$, $g = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_p = 1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\tau_N = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$, $\varepsilon = 2.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$, $P_m = 1.4$, $P_s = 1.6$, $k_f = 0.1$, $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 20 \text{ GHz}$, $k_{f1} = 0.1$, $k_{f2} = 0.2$, $\tau_2 = 3 \text{ ns}$, $k_{in} = 0.1$, $A_1 = A_2 = 20 \text{ GHz}$, $\Delta f = 3.0 \text{ GHz}$. 用以上参数值通过 4 阶龙格-库塔法对方程 (1)–(6) 进行数值求解, 得到 τ_1 分别为 2.7, 2.8 和 2.9 ns 时从激光器输出混沌激光的时间序列图、自相关曲线以及互信息曲线, 如图 2 所示.

在图 2(a1)–(a3) 中, 光强的幅值随时间的变化呈现无规则的起伏, 说明此时半导体激光器输出的是混沌激光; 由图 2(b1)–(b3) 可见左边第一个尖峰几乎和纵轴重合, 这是由激光器的弛豫振荡引起的^[31], 其余的尖峰即为延时特征峰. 通过对比图 2(b1)–(b3), 可见延时特征峰的峰值都小于 0.2 且图 2(b2) (对应的 $\tau_1 = 2.8 \text{ ns}$) 中峰值最小, 所以当 $\tau_1 = 2.8 \text{ ns}$ 时 TDS 的抑制效果最好, 这是由于此时两个反馈腔的延时差 $\tau_2 - \tau_1 = 0.2 \text{ ns}$ 等于半导体激光器的弛豫振荡周期 $\tau_{RO} \approx 2\pi(gE^2/\tau_p)^{-1/2} \approx 0.2 \text{ ns}$ ^[17,25,27,32]. 通过观察对比图 2(c1)–(c3) 以及图 2(b1)–(b3) 发现当自相关曲线的峰值都小于 0.2, 即 TDS 被有效抑制时, 互信息曲线的峰值也都被有效抑制, 并且其峰值都小于自相关曲线的峰值, 这和相关文献的研究结果一致^[21,33,34]. 所以下面的研究中只利用自相关函数来描述系统输出混沌激光的 TDS^[35].

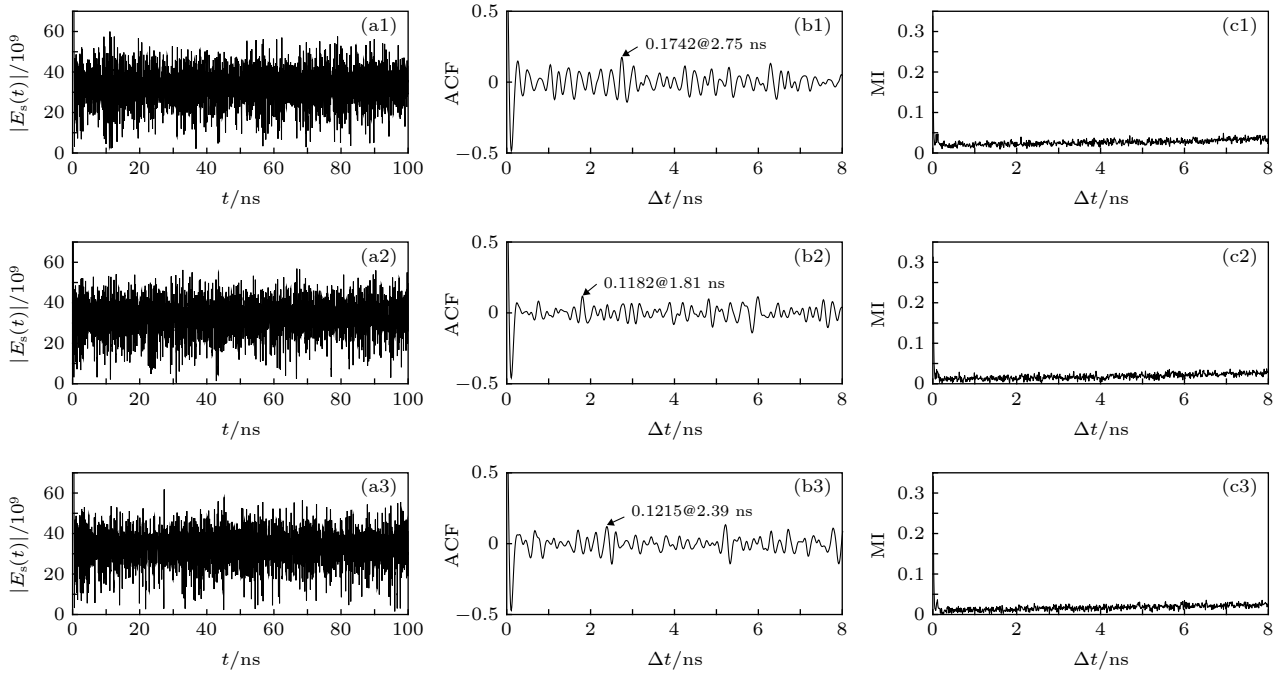


图 2 SL-EOI-DFOF 在不同的延迟时间 τ_1 下输出混沌激光的 (a1)—(a3) 时间序列、(b1)—(b3) 自相关曲线以及 (c1)—(c3) 互信息曲线 (a1)—(c1) $\tau_1 = 2.7$ ns; (a2)—(c2) $\tau_1 = 2.8$ ns; (a3)—(c3) $\tau_1 = 2.9$ ns

Fig. 2. Time series (a1)–(a3), ACF curves (b1)–(b3) and MI curves (c1)–(c3) of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF at different delay times τ_1 : (a1)–(c1) $\tau_1 = 2.7$ ns; (a2)–(c2) $\tau_1 = 2.8$ ns; (a3)–(c3) $\tau_1 = 2.9$ ns.

3.2 外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 k_{fl} 对 TDS 的影响

下面取对 TDS 抑制效果较好的延迟时间 $\tau_1 = 2.8$ ns, 其他参数取值与图 2(b2) 相同, 数值求解方程 (1)—(6), 得到图 3 所示的系统输出混沌激光的延时特征值 β 随外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 k_{fl} 变化的二维图.

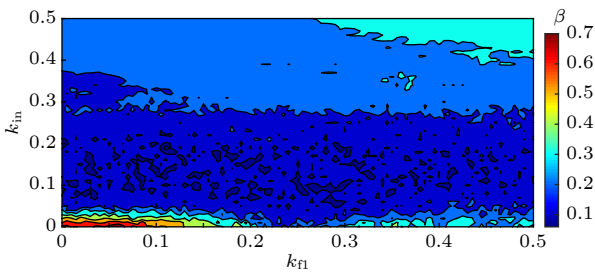


图 3 SL-EOI-DFOF 输出混沌激光延时特征值 β 随参数 k_{in} 和 k_{fl} 变化的二维图

Fig. 3. Two-dimensional maps of the time-delay characteristic β in the parameter space of k_{in} and k_{fl} of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF.

由图 3 可见, 当 k_{in} 在区间 (0, 0.5) 内时, k_{fl} 的变化对 β 值的影响不明显, 这是由于此时注入光对输出混沌激光的延时特征值 β 起主要作用; 随着 k_{in}

在该区间内的增大, 整体上看 β 值先减小, 之后再增大, 这是由于当 k_{in} 在区间 (0, 0.25) 内增大时, 外部注入光对从激光器的扰动使其输出光的无序性增强, β 值减小; 但随着 k_{in} 在 (0.25, 0.5) 内的继续增大, 此时主激光器对从激光器相当于是一个外腔, 会使从激光器出现弱周期性, 导致 β 值又增大. 当 k_{in} 在区间 (0.05, 0.25) 内时, β 值都是较小的, 都小于 0.2, 即 TDS 被很好地抑制了.

3.3 结果对比和分析

为了表明本文所提出的 SL-EOI-DFOF 系统能更好地抑制 TDS. 这里首先将本文提出的方案和 SL-EOI-SOF 系统、SL-EOI-DOF 系统、SL-EOI-SFOF 系统及 SL-DFOF 系统进行对比和分析. 对于 SL-EOI-SOF 系统而言, 方程 (5) 和方程 (6) 不存在, 取方程 (3) 中的 $F_1(t) = E_s(t - \tau_1) \times \exp(-i\omega_s\tau_1)$, $k_{in} = 0.1$, $k_{fl} = 0.1$, $k_{f2} = 0$; 对于 SL-EOI-DOF 系统而言, 方程 (5) 和方程 (6) 不存在, 取方程 (3) 中的 $F_1(t) = E_s(t - \tau_1) \exp(-i\omega_s\tau_1)$, $F_2(t) = E_s(t - \tau_2) \exp(-i\omega_s\tau_2)$, $k_{in} = 0.1$, $k_{fl} = 0.1$, $k_{f2} = 0.2$; 对于 SL-EOI-SFOF 系统而言, 取方程 (3) 中的 $k_{in} = 0.1$, $k_{fl} = 0.1$, $k_{f2} = 0$; 对于 SL-

EOI-DFOF 系统而言, 取方程 (3) 中的 $k_{in} = 0.1$, $k_{r1} = 0.1$, $k_{r2} = 0.2$; 对于 SL-DFOF 系统而言, 取方程 (3) 中的 $k_{in} = 0$, $k_{r1} = 0.1$, $k_{r2} = 0.2$. 以上这 5 个系统中的其他参数的取值与图 2(b2) 相同, 数值求解方程 (1)–(6) 得到 5 个系统输出混沌激光的延时特征值 β 随 P_m 的变化曲线, 如图 4 所示.

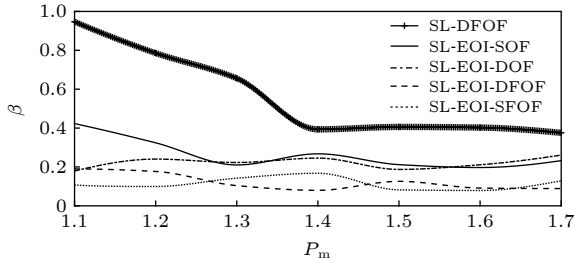


图 4 SL-EOI-SFOF, SL-EOI-DOF, SL-EOI-SFOF, SL-EOI-DFOF 和 SL-DFOF 输出混沌激光的延时特征值 β 随 P_m 的变化

Fig. 4. Variations of the time delay characteristic values β with P_m of chaotic laser from the SL-EOI-SFOF, SL-EOI-DOF, SL-EOI-SFOF, SL-EOI-DFOF and SL-DFOF, respectively.

由图 4 可见, 在所选的控制参数区间范围内, SL-DFOF 系统输出混沌激光的延时特征值 β 远大于其他 4 个系统, 其原因是外部光注入可以有效抑制混沌激光的 TDS^[36]; SL-EOI-DFOF 和 SL-EOI-SFOF 系统输出混沌激光的延时特征值 β 都小于 0.2, 并且小于 SL-EOI-SFOF 和 SL-EOI-DOF 系统输出混沌激光的 β 值, 这是因为滤波器的滤波特性对 TDS 具有抑制作用^[37]. 并且可以看出本文提出的 SL-EOI-DFOF 系统在 $P_m = 1.4$ 时, β 达到极小值, 则下面的研究中取 $P_m = 1.4$.

下面针对 SL-EOI-DFOF 和 SL-EOI-SFOF 两个系统进一步证明本文所提出的 SL-EOI-DFOF 系统可以更好地抑制 TDS. 滤波器带宽也是影响反馈光 TDS 的因素之一. 这里以滤波器带宽 Λ_1 作为控制参数进行对比和分析. 对于 SL-EOI-DFOF 系统取方程 (6) 中的 $\Lambda_2 = 20$ GHz, 其他的参数取值与图 4 相同; 对于 SL-EOI-SFOF 系统则取方程 (6) 中的 $\Lambda_2 = 0$ GHz, 其他参数取值也与图 4 相同. 数值求解方程 (1)–(6), 得到两个系统输出混沌激光的延时特征值 β 随 Λ_1 的变化, 如图 5 所示.

由图 5 可见, 在其他参数相同的情况下, 在所选的控制参数区间内, SL-EOI-DFOF 系统输出混沌光的 β 值随 Λ_1 的变化平稳, 都小于 0.12, 在

$\Lambda_1 = 20$ GHz 时 β 达到最小值; 并且可以看出在 Λ_1 的大部分区间内 SL-EOI-DFOF 系统的 β 值都小于 SL-EOI-SFOF 系统. 其原因是: 与单路滤波光反馈系统相比, 由于滤波器的滤波特性和混沌激光的维度, 采用双路滤波光反馈系统更有利于获得高混沌程度的混沌激光^[32]. 综合图 4 和图 5, 比较而言 SL-EOI-DFOF 系统对 TDS 的抑制效果最好, 证明了本文提出的 SL-EOI-DFOF 系统对 TDS 抑制的有效性.

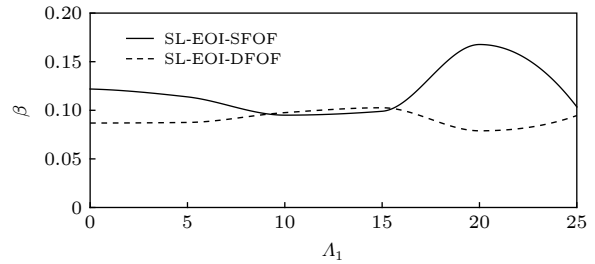


图 5 SL-EOI-DFOF 和 SL-EOI-SFOF 输出混沌激光的延时特征值 β 随 Λ_1 的变化

Fig. 5. Variations of the time delay characteristic values β with Λ_1 of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF and SL-EOI-SFOF, respectively.

4 带宽的数值研究和分析

在本文提出的 SL-EOI-DFOF 系统中 TDS 被有效抑制的基础上, 研究了其输出混沌激光的带宽随外光注入系数 k_{in} 、反馈强度 k_{r1} 、抽运因子 P_m 和滤波器带宽 Λ_1 的变化规律.

4.1 外光注入系数 k_{in} 对带宽的影响

这里取 $P_m = 1.4$, $\Lambda_1 = 20$ GHz, k_{in} 分别选择 0, 0.1, 0.2, 其他参数值与图 5 相同. 数值求解方程 (1)–(6), 得到系统输出混沌激光的时间序列和功率谱如图 6 所示. 由图 6(a1)–(a3) 可见时间序列呈现无规则的起伏, 说明激光器此时输出的是混沌激光.

对图 6(b1)–(b3) 中的功率谱进行拟合, 得到平滑后的功率谱曲线 (见功率谱中的白色曲线), 可以看出, 随着 k_{in} 的增大, 系统输出混沌激光的功率谱变得平坦, 即带宽有明显的展宽, 经过分析得到图 6(b1)–(b3) 对应的 3 dB 带宽分别为 4.33, 5.21 和 7.64 GHz. 即在所选参数条件下, 改变外光注入系数 k_{in} , 则激光器输出混沌激光的带宽随之增大.

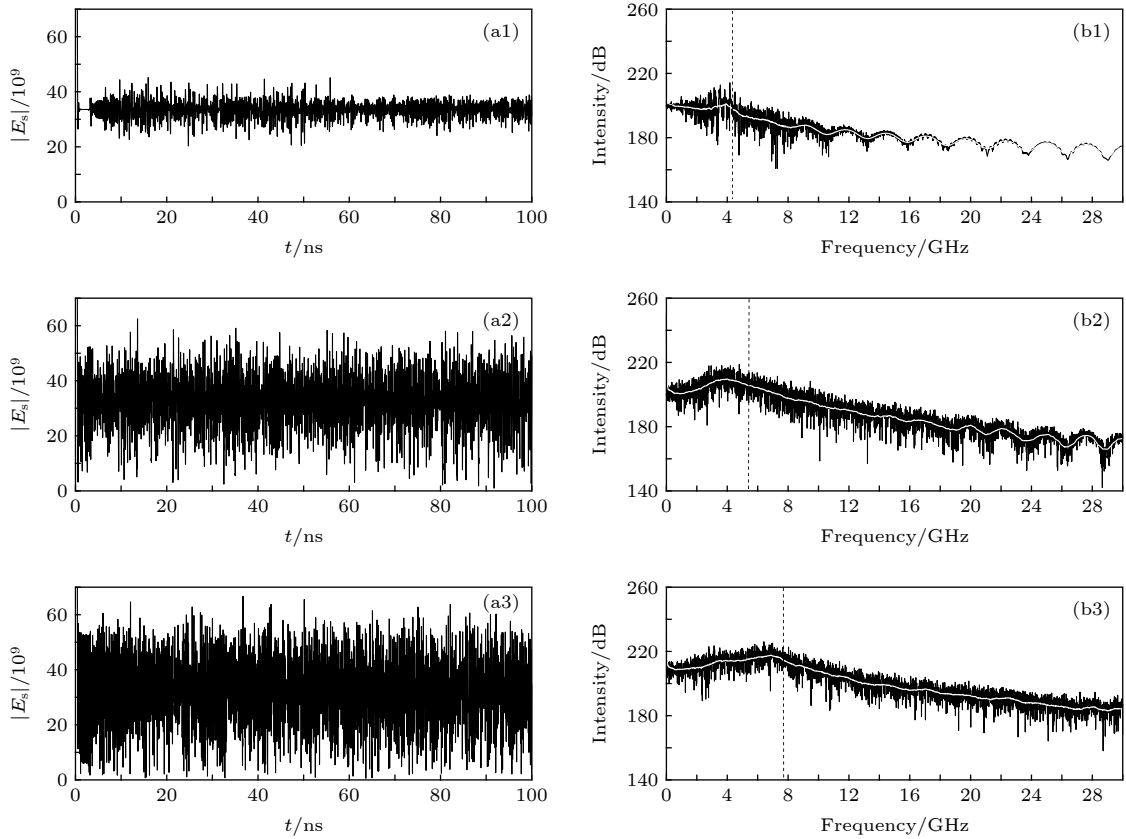


图 6 SL-EOI-DFOF 在不同的外光注入系数 k_{in} 下输出混沌激光的 (a1)—(a3) 时间序列以及 (b1)—(b3) 对应的功率谱 (a1), (b1) $k_{in} = 0$; (a2), (b2) $k_{in} = 0.1$; (a3), (b3) $k_{in} = 0.2$, 其中 (b1)—(b3) 中的虚线标示了混沌激光 3 dB 带宽的值

Fig. 6. Time series (a1)–(a3) and the corresponding power spectra (b1)–(b3) of chaotic laser from SL-EOI-DFOF at different external light injection coefficient k_{in} : (a1), (b1) $k_{in} = 0$; (a2), (b2) $k_{in} = 0.1$; (a3), (b3) $k_{in} = 0.2$, the dashed lines in (b1)–(b3) indicate the value of the 3 dB bandwidth of the chaotic laser.

为了展示混沌激光的带宽随外光注入系数 k_{in} 的整体变化趋势, 下面以 k_{in} 作为控制参数, 其他参数的取值与图 6 相同, 数值求解方程 (1)—(6), 得到系统输出混沌激光的 3 dB 带宽随外光注入系数 k_{in} 的变化如图 7 所示.

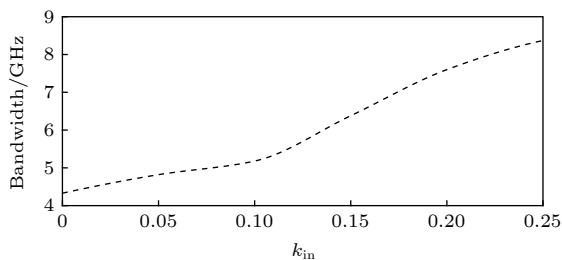


图 7 SL-EOI-DFOF 输出混沌激光的带宽随 k_{in} 的变化
Fig. 7. Bandwidth versus k_{in} of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF.

由图 7 可见, 当外光注入系数 k_{in} 在所选参数范围内逐渐增大时, 激光器输出混沌激光的带宽整体呈递增的趋势, 这里获得的带宽最大值约为

8.5 GHz. 这是由于随着 k_{in} 的增加, 注入光的光强也随之增加, 主激光器对从激光器的扰动效果随之增大, 导致激光器输出混沌光的混沌程度增强, 从而使带宽增加^[38].

4.2 滤波器带宽 Δ_1 对系统输出混沌激光带宽的影响

根据图 3, 取对 TDS 有较好抑制的 $k_{in} = 0.2$, 其他参数取值与图 7 相同, 数值求解方程 (1)—(6), 得到系统输出混沌激光的 3 dB 带宽随 Δ_1 的变化如图 8 所示.

由图 8 可见, 曲线变化缓慢, 即滤波器的带宽 Δ_1 对系统输出混沌激光的带宽有影响, 但不明显, 说明滤波器的滤波特性对带宽的影响不大.

4.3 反馈强度 k_{f1} 对系统输出混沌激光带宽的影响

下面以反馈强度 k_{f1} 作为控制参数, 其他参数

取值与图 8 相同, 数值求解方程 (1)—(6), 得到系统输出混沌激光的 3 dB 带宽随 k_{f1} 的变化如图 9 所示.

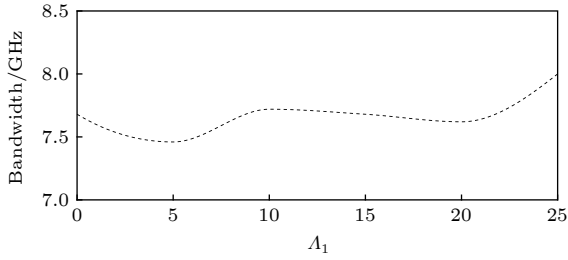


图 8 SL-EOI-DFOF 输出混沌激光的带宽随 A_1 的变化
Fig. 8. Bandwidth versus A_1 of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF.

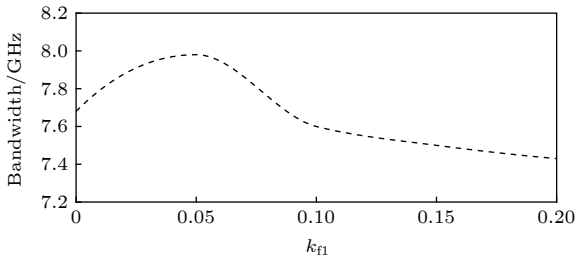


图 9 SL-EOI-DFOF 输出混沌激光的带宽随 k_{f1} 的变化
Fig. 9. Bandwidth versus k_{f1} of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF.

从图 9 可以看出, 当反馈强度 k_{f1} 在所选参数范围内逐渐增大时, 激光器输出混沌激光的带宽先增大, 而后缓慢地减小. 这是由于随着 k_{f1} 在区间 (0, 0.05) 内的增大, 系统进入混沌态, 混沌程度增强, 拓宽了带宽; 但是随着反馈强度 k_{f1} 在区间 (0.05, 0.2) 内的持续增大, 导致激光器输出混沌光的混沌程度减弱, 带宽减小.

4.4 抽运因子 P_m 对系统输出混沌激光带宽的影响

下面以抽运因子 P_m 作为控制参数, 其他参数取值与图 9 相同, 数值求解方程 (1)—(6), 得到系统输出混沌激光的 3 dB 带宽随 P_m 的变化如图 10 所示.

由图 10 可见, 当抽运因子 P_m 在 (1.1, 1.7) 范围内逐渐增大时, 激光器输出混沌光的带宽整体呈线性增加趋势, 这里获得的带宽最大值约为 8.8 GHz (经计算此时 β 值小于 0.2). 这是由于: 随着 P_m 在区间 (1.1, 1.7) 内的增大, 主激光器对从激光器的扰动作用随之增强, 使得激光器输出混沌光的混沌程度增强, 从而拓宽了混沌激光的带宽.

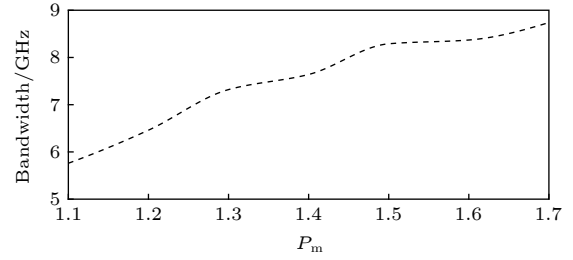


图 10 SL-EOI-DFOF 输出混沌激光的带宽随 P_m 的变化
Fig. 10. Bandwidth versus P_m of chaotic laser from the SL-EOI-DFOF.

根据以上研究可见, 通过适当选择参数的取值, 本文提出的方案可以提高系统输出混沌激光的带宽.

5 结 论

本文采用 SL-EOI-DFOF 系统来抑制 TDS 并研究其带宽. 首先对外光注入系数 k_{in} 、反馈强度 k_{f1} 、抽运因子 P_m 和滤波器带宽 A_1 对系统输出混沌激光 TDS 的影响进行了数值研究和理论分析. 结果表明: 在所选的参数区间内, β 值随反馈强度 k_{f1} 的变化较缓慢, 并且给出了本文提出的系统输出混沌光的延时特征值 β 随着外光注入系数 k_{in} 变化的过程中 TDS 被有效抑制的 k_{in} 取值参数区间, 进而通过对比和分析 SL-EOI-SOF 系统、SL-EOI-DOF 系统、SL-EOI-SFOF 系统、SL-EOI-DFOF 系统以及 SL-DFOF 系统输出混沌光的延时特征值 β 随抽运因子 P_m 以及滤波器带宽 A_1 的变化曲线, 表明了光注入和滤波光反馈对 TDS 的有效抑制, 并且通过进一步分析阐明了本文所提出的 SL-EOI-DFOF 系统对 TDS 的抑制效果是最佳的; 然后在 TDS 具有最佳抑制效果的参数条件下, 研究了外光注入系数 k_{in} 、滤波器带宽 A_1 、反馈强度 k_{f1} 和抽运因子 P_m 对系统输出混沌激光带宽的影响并进行了物理分析, 结果表明: 在所选的参数条件下, 随着 k_{in} 的增加, 系统输出混沌激光的带宽也随之增大, 这是由于 k_{in} 的增加使得注入光的光强也随之增加, 主激光器对从激光器的扰动效果随之增大, 导致激光器输出混沌光的混沌程度增强, 从而使带宽增加; 系统输出混沌激光的带宽随 A_1 的变化较缓慢; 随着 k_{f1} 的增大, 系统输出混沌激光的带宽先增大之后逐渐减小; 混沌激光的带宽随 P_m 的增加而增大, 这是由于在所选的参数范围内, 随着

P_m 的增大, 主激光器对从激光器的扰动作用增强, 使得激光器输出混沌光的混沌程度增强, 拓宽了带宽; 这里获得混沌激光带宽的最大值约为 8.8 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激光的 TDS 并使其带宽有所提高, 从而证明了本文所提方案的有效性. 本文的研究结果对于混沌激光的应用是有意义的.

参考文献

- [1] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1995 *Phys. Rev. A* **51** 4181
- [2] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173
- [3] Senlin Y 2009 *J. Opt. Commun.* **30** 20
- [4] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [5] Zhang M J, Liu T G, Zheng J Y, Wang A B, Wang Y C 2011 *Chin. J. Lasers* **4** 136 (in Chinese) [张明江, 刘铁根, 郑建宇, 王安帮, 王云才 2011 *中国激光* **4** 136]
- [6] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Yoshimura K 2008 *Nat. Photonics* **2** 728
- [7] Metropolis N, Ulam S 1949 *J. Am. Stat. Assoc.* **44** 335
- [8] Wang Y, Wang B, Wang A 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 1636
- [9] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi V 2005 *Nature* **438** 343
- [10] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 815
- [11] 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]
- [12] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [13] Jafari A, Sedghi H, Mabhouti K, Behnia S 2011 *Opt. Commun.* **284** 3018
- [14] Udaltsov V S, Goedgebuer J P, Larger L, Vladimir S, Cuenot J, William T, Rhodes 2003 *Phys. Lett. E* **308** 54
- [15] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [16] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [17] Li S S, Chan S C 2015 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 541
- [18] Sun W Y, Zhang S H, Wu T A, Zhang X X 2017 *Las. Optoelect. Prog.* **54** 208 (in Chinese) [孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 张晓旭 2017 *激光与光电子学进展* **54** 208]
- [19] Schires K, Gomez S, Gallet A, Duan G, Grillot F 2017 *IEEE J. Quantum Electron.* **99** 1
- [20] Xu Y P, Zhang L, Lu P, Mihailov S, Chen L, Bao X Y 2018 *Opt. Laser Technol.* **109** 654
- [21] Nguindo R M, Soriano M C, Colet P 2011 *Opt. Lett.* **36** 4322
- [22] Zhao A, Jiang N, Liu S 2019 *Opt. Express* **27** 12336
- [23] Brunner D, Porte X, Soriano M C, Fischer I 2012 *Sci. Rep.* **2** 732
- [24] Uchida A, Heil T, Liu Y, Davis P, Aida T 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 0
- [25] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [26] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [27] 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]
- [28] Udaltsov V S, Larger L, Goedgebuer J P, Locquet A, Citrin D S 2005 *J. Opt. Technol.* **72** 373
- [29] Gao F, Li N Q, Zhang L Y, Ouyang 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]
- [30] Sun W Y, Zhang S H, Wu T A, Zhang X X 2016 *Las. Optoelect. Prog.* **53** 121406 (in Chinese) [孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 张晓旭 2016 *激光与光电子学进展* **53** 121406]
- [31] Wang A, Yang Y, Wang B, Zhang B, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 8701
- [32] Jiang L, Xia G Q, Wu J G, Xiao P, Wu Z M 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 1202003 (in Chinese) [蒋龙, 夏光琼, 吴加贵, 肖平, 吴正茂 2012 *中国激光* **39** 1202003]
- [33] Wu Y, Wang B, Zhang J, Wang A, Wang Y 2013 *Math. Probl. Eng.* **2013** 1
- [34] Zhang J Z, Wang A B, Zhang M J, Li X C, Wang Y C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094207 (in Chinese) [张建忠, 王安帮, 张明江, 李晓春, 王云才 2011 *物理学报* **60** 094207]
- [35] Wang Y S, Zhao T, Wang A B, Zhang M J, Wang Y C 2017 *Las. Optoelect. Prog.* **54** 111404 (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** 111404]
- [36] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, Tai K 1997 *Quantum Semiclassical Opt.* **9** 765
- [37] Jiang N, Liu D, Xue C P, Qiu K 2015 *China Sciencepaper* **10** 1640 (in Chinese) [江宁, 刘丁, 薛琛鹏, 邱昆 2015 *中国科技论文* **10** 1640]
- [38] 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]

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

Zhang Yi-Ning Feng Yu-Ling[†] Wang Xiao-Qian Zhao Zhen-Ming
Gao Chao Yao Zhi-Hai

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

(Received 12 December 2019; revised manuscript received 14 February 2020)

Abstract

Semiconductor laser (SL) can output chaotic lasers under external disturbances such as optical injection or optical feedback, and the bandwidth can reach up to GHz magnitude. External-cavity feedback semiconductor lasers can output high-dimensional chaotic lasers and are considered to be better sources of chaotic entropy. However, due to external cavity feedback and other effects, it will give rise to obvious external cavity time delay signature (TDS) in the output chaotic laser, which restricts the application of chaotic lasers. On the other hand, the bandwidth of chaotic laser determines the transmission rate of confidential communication, and therefore TDS and bandwidth are two important parameters that will affect chaotic laser's applications. Therefore, it is significant to take appropriate measures to suppress the TDS and increase the bandwidth of chaotic laser output by semiconductor laser.

In this paper the output laser from a semiconductor laser with single optical feedback is partially injected to another semiconductor laser with double filtered optical feedback. Thus they form a semiconductor laser system with external optical injection and double filtered optical feedback, i.e. a master-slave laser system which is used to suppress the TDS of chaotic laser and investigate its bandwidth. We numerically investigate the influences of external light injection coefficient, feedback intensity, pumping factor, and filter bandwidth on TDS. Then the suppression effects of this system on TDS are analyzed and compared with those of semiconductor laser system with external optical injection and single optical feedback, those of semiconductor laser system with external optical injection and double optical feedback, those of semiconductor laser system with external optical injection and single filtered optical feedback, and those of semiconductor laser system with double filtered optical feedback. The results show that the proposed scheme in this paper has the best suppression effect on TDS. Then the bandwidth of the chaotic laser output from the system is investigated under the condition of parameters of effectively suppressing TDS. The results show that the system proposed in this paper can increase the bandwidth of the system output chaotic laser by properly selecting the parametric values, and the maximum bandwidth value of the obtained chaotic laser is about 8.8 GHz. The above investigations indicate the effectiveness of the proposed scheme. The results of this investigation are significant for the application of chaotic lasers.

Keywords: semiconductor laser, filtered optical feedback, time delay signature, bandwidth

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191881

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

[†] Corresponding author. E-mail: FYLCUST@163.com