

# 基于偏振反馈的半导体光放大器光纤环的动态偏振响应

王春华 李力 彭蕾 于清洋 张申飞 刘涛

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 理论仿真和实验研究了偏振反馈对基于半导体光放大器(SOA)的光纤环激光系统的动态响应的影响。在建立的各向同性 SOA 光纤环系统的速率方程基础上对系统的工作状态进行了稳态与混沌态的仿真研究。仿真结果表明,对各向同性的 SOA 光纤环系统,稳态下可通过环路偏振态的  $90^\circ$  扭转反馈,实现正交偏振的双稳态输出;而在非稳态下通过调节环路偏振态转换,可得到全偏振态遍历的偏振混沌输出。建立了基于 SOA 光纤环的偏振混沌的实验系统,通过调节光纤环路的偏振转换特性,实验观察到了系统稳态工作下的正交偏振调制输出,以及混沌态下动态偏振度小于 1% 的偏振混沌输出。实验结果与理论仿真结果一致。

**关键词** 光电子学;半导体光放大器;光纤环;偏振混沌;正交偏振调制;偏振度

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0614003

## Polarization Dynamics of an SOA-Based Fiber Ring with Polarization Feedback

Wang Chunhua Li Li Peng Lei Yu Qingyang Zhang Shenfei Liu Tao

(Key Laboratory Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** The influence of the polarization feedback of the fiber ring on the dynamics of the isotropic semiconductor optical amplifier (SOA)-based fiber ring system is studied by theoretical simulation and experiment. It is found from simulation that a bistable orthogonal-polarization light under stationary can be realized by a polarization feedback of a  $90^\circ$ -rotation, and a dynamically-depolarized polarization chaos under non-stationary can be realized by properly setting polarization feedback. Experimentally, such a orthogonal-polarization modulation light is observed and a dynamically-depolarized polarization chaos with dynamical degree of polarization less than 1% is obtained in a SOA fiber ring system. The experimental results are well consistent with the theoretical simulations.

**Key words** optoelectronics; semiconductor optical amplifier; fiber ring; polarization chaos; orthogonal polarization modulation; degree of polarization

**OCIS codes** 140.1540; 140.3560; 060.4370; 190.3100

## 1 引言

光动态退偏技术是解决光传感以及光相干检测中的偏振扰动及偏振衰落等问题的关键技术之一。目前的动态退偏光主要由扰偏技术实现或直接产生退偏光。扰偏技术是对输入光的偏振态进行调制,调制后的偏振态输出或为两正交偏振态交换调制输

出,其偏振态(SOP)在经过球心的平面圆上周期性变化;或为偏振态在全偏振态上均匀分布。偏振动态变化的结果是其偏振度(DOP)的时间平均为零。扰偏的实现方法主要有振动挤压光纤、电光相位调制以及液晶双折射调制等扰偏技术<sup>[1,2]</sup>。而直接输出的退偏光源主要是以宽光谱的自发辐射或超辐射

**收稿日期**: 2012-01-06; **收到修改稿日期**: 2013-03-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077018)和上海市重点学科项目(SKLSFO2012-06)资助课题。

**作者简介**: 王春华(1963—),女,博士,教授,主要从事光传感及光通信领域的教学与研究。

E-mail: lizawch@staff.shu.edu.cn

光源为主,而窄带退偏光源的研究则较少。Kim等<sup>[3]</sup>利用正交偏振合波抽运实现了基于 Raman 放大的多波长连续退偏光,Liu等<sup>[4]</sup>利用光纤的非线性偏振旋转效应实现了退偏飞秒激光。

目前关于激光动力学现象的研究,由于其在全光信息处理和保密通信中的巨大应用前景而成为光通信领域的研究热点<sup>[5~9]</sup>。激光偏振效应的动力学现象主要包括稳态偏振调制和偏振混沌,其产生机理源于激光系统内部的各向异性和非线性调制的存在。目前的研究主要集中在垂直面发生激光器(VCSEL)的各向异性<sup>[10~13]</sup>、半导体激光器与外部偏振旋转反馈<sup>[14~18]</sup>,以及半导体光放大器(SOA)波导的各向异性<sup>[19~21]</sup>等实现的正交偏振双稳态或偏振混沌。一般情况下,光纤激光系统的偏振效应由 SOA 的各向异性和光纤环的偏振转换共同决定。针对半导体内部的各向异性导致的偏振动力学响应已有较多的研究报道<sup>[10~13,19~21]</sup>,本文则针对光纤环路中的偏振转换效应对系统动力学输出的影响进行了理论仿真及实验研究,实现了稳态下的正交偏振调制输出和非稳态下的偏振混沌输出。偏振调制输

出光的偏振态在两正交偏振态间有规律地交替变化,而偏振混沌的输出光偏振态的瞬时高速混沌变化,经过调节环内偏振转换特性,其 DOP 时间平均可接近为零。因此两种系统输出都可作为动态退偏光,在抗偏振衰落以及与偏振相关的通信测量中发挥作用。

## 2 原 理

### 2.1 系统方程

基于 SOA 放大的光纤环激光发生系统如图 1 所示。其中由普通单模光纤构成的光纤环为系统提供谐振腔,SOA 为系统提供增益放大和非线性效应,隔离器用于实现环内信号的单向循环谐振,滤波器用于频率选择,偏振控制器则用于调节光纤环的偏振转换特性。系统输出由耦合器 1 耦合输出,并由耦合器 2 分为两路:一路光通过正交偏振分离器,输出两路正交光,分别由光探测器(PD)检测后送入示波器观察两路偏振正交信号的时域波形;另一路光则送入偏振分析仪,以检测光的偏振度。

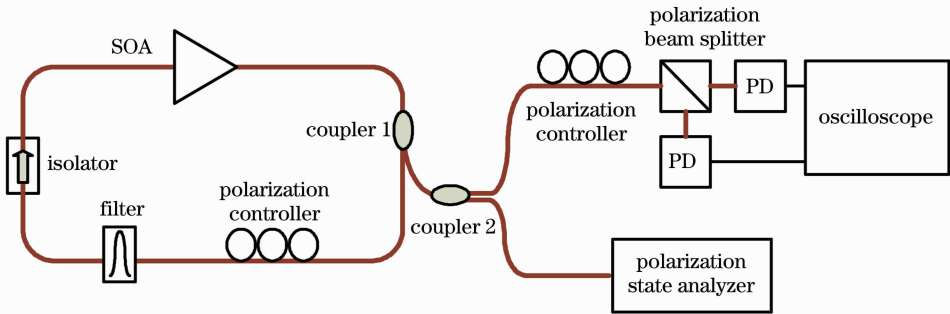


图 1 基于 SOA 的光纤激光器与偏振测试系统

Fig. 1 SOA-based fiber laser and polarization measurement system

一般而言,系统中所有的各向异性都会对输出光的偏振特性产生影响,这些参量或来自 SOA 的非线性偏振,或来自于光纤环的线性偏振转换效应。本文主要研究光纤环的偏振转换的影响,因此设 SOA 为各向同性,即横电(TE)模和横磁(TM)

模具有相同的增益系数和线宽因子,此时 SOA 的作用主要是为系统提供增益放大和非线性调制,而偏振的影响则主要来自于光纤环的偏振转换特性。由此建立起 SOA 中基于 TE 和 TM 模场的系统方程为

$$\begin{aligned} \frac{dE_x(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(1+j\alpha)\left[G(N) - \frac{1}{\tau_{ph}}\right]E_x(t) + \eta_x E_{x,in}(t)\exp(j\omega\tau), \\ \frac{dE_y(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(1+j\alpha)\left[G(N) - \frac{1}{\tau_{ph}}\right]E_y(t) + \eta_y E_{y,in}(t)\exp(j\omega\tau), \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_{sp}} - G(N)[|E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2], \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$G(N) = \xi(N - N_{th}), \quad (2)$$

(1)和(2)式中,  $E_x$  和  $E_y$  分别对应 SOA 的 TE 和 TM 模,  $N$  表示反转载流子密度,  $N_{th}$  为透明放大时的载流子密度阈值,  $\alpha$  为 SOA 的线宽增强因子, 表示 SOA 的相位调制效应,  $\tau_{ph}$  表示光子寿命,  $E_{x_{in}, y_{in}}(t)$  表示由光纤环返回进入 SOA 的电场,  $\eta_{x, y}$  是返回系数,  $\xi$  是 SOA 的增益系数,  $I$  为 SOA 的注入电流,  $e$  为电子电量,  $\tau_{sp}$  为载流子

自发发射寿命。

单模光纤环行腔中由于加入了偏振控制器, 因此引入了由光纤弯曲和扭转导致的线双折射和圆双折射效应。光纤环形腔的偏振转换效应可由 Jones 矩阵表示为<sup>[22, 23]</sup>

$$\mathbf{T}(\delta_1, \theta, \delta_c) = \begin{bmatrix} \cos \delta_c & \sin \delta_c \\ -\sin \delta_c & \cos \delta_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \exp(j\delta_1/2) + \sin^2 \theta \exp(-j\delta_1/2) & 2j \sin \theta \cos \theta \sin \frac{\delta_1}{2} \\ 2j \sin \theta \cos \theta \sin \frac{\delta_1}{2} & \cos^2 \theta \exp(-j\delta_1/2) + \sin^2 \theta \exp(j\delta_1/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\delta_1$  表示由于光纤弯曲引入的线双折射,  $\delta_c$  表示由于光纤扭转引入的圆双折射, 而  $\theta$  表示线双折射效应的主轴方位角。设光纤环长导致的传输延迟为  $\tau$ , SOA 输出的光场为  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$ , 则光在经过光纤环一周后, 返回进入 SOA 时的电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_{x_{in}} \\ E_{y_{in}} \end{bmatrix} = \sqrt{k} \mathbf{T} \begin{bmatrix} E_x(t-\tau) \\ E_y(t-\tau) \end{bmatrix} = \sqrt{k} \begin{bmatrix} T_{11} E_x(t-\tau) + T_{12} E_y(t-\tau) \\ T_{21} E_x(t-\tau) + T_{22} E_y(t-\tau) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, 光纤环的传输损耗由于较小而忽略未计,  $\sqrt{k}$  为耦合器 1 的耦合系数。将(4)式代入(1)式中可得

$$\begin{aligned} \frac{dE_x(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(1+j\alpha) \left[ G(N) - \frac{1}{\tau_{phx}} \right] E_x(t) + \eta T_{11} E_x(t-\tau) + \eta T_{12} E_y(t-\tau) \\ \frac{dE_y(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(1+j\alpha) \left[ G(N) - \frac{1}{\tau_{phy}} \right] E_y(t) + \eta T_{21} E_x(t-\tau) + \eta T_{22} E_y(t-\tau) \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_{sp}} - G(N) [ |E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2 ], \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式中  $\eta = \sqrt{k}/\tau_{in}$ ,  $\tau_{in}$  为 SOA 内部时延。由(5)式可见, 光纤环中的偏振耦合导致进入 SOA 的两正交返回光强度和相位都将发生变化, 并在 SOA 中的增益调制效应和相位调制效应的共同作用下, 导致 SOA 中 TE 和 TM 模的放大增益和相位变化不同。一般而言, 在稳态情况下, 系统工作在正常的激光模式, 即输出光的光强、相位以及偏振态是稳定

的; 而在非稳态条件下, 系统输出光强、相位和偏振态是随机时变的, 且其变化形态不仅取决于 SOA 的注入电流以及 SOA 的各项参数, 而且与光纤环的各项参数密切相关。因此在一般动态情况下, (5)式难以得到解析解。为得到一般动态情况下的系统状态, 首先利用四阶龙格库塔方法对(5)式进行计算机仿真求解, 仿真中的参数设置如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System parameters used in simulation

Parameters	Symbol	Value	Unit
Fiber cavity length	$L$	0.5	m
Electronic charge	$e$	$1.602 \times 10^{-19}$	C
Injected current	$I$	150~200	mA
Transparent threshold	$N_{th}$	$1.50 \times 10^8$	
Spontaneous emission lifetime	$\tau_{sp}$	500	ps
Lifetime of photon	$\tau_{ph}$	2	ps
Length of SOA	$L_s$	800	mm
Gain coefficient	$\xi$	$7.0 \times 10^{-9}$	$\text{ps}^{-1}$
Coupling coefficient of coupler	$k$	0.9	
Linewidth enhancement factor	$\alpha$	5	
Refractive index of SOA	$n$	4	

## 2.2 仿真结果

随注入电流的不同,系统工作可由稳态进入到混沌态。在设定参数下,系统在注入电流超过 91 mA 时开始进入混沌态。稳态条件下,当光纤环的偏振转换为单位矩阵即  $\delta_c = 0, \delta_l = 0$  时,系统为常规的激光系统,输出光强随时间不变,偏振态稳定于一点;而当光纤环中的偏振转换不是单位矩阵,即存在偏振转换效应时,系统依然处于稳态,但由于环路中正交偏振光分量的相互耦合,导致 SOA 中的 TE 和 TM 模的增益与相位调制强度不同,系统输出的两路正交偏振光的强度和相位随时间做有规律变化。因此通过调节环中的偏振控制器,可使系统工作在偏振调制状态。图 2 给出了环中双折射效应

为:任意  $\theta, \delta_c = \pi/2, \delta_l = 0$  时,仿真得出的系统具有稳态正交偏振调制输出。其中图 2(a)为系统输出的正交偏振分量的场强;图 2(b)为  $E_x/E_y$  关系轨迹;图 3(c)为系统输出光的偏振态在庞加莱球上的变化轨迹。由图 2(a)可见在稳态条件下,如果在环路中引入  $\pi/2$  的光场扭转,系统输出光为两正交偏振态交替出现的偏振态方波调制输出。图 2(c)中, SOP 轨迹看似为经过  $H(1, 0, 0), V(-1, 0, 0), R(0, 0, 1)$  和  $L(0, 0, -1)$  的圆,实际上在脉冲持续期间, SOP 分别位于水平线偏振点  $H$  和垂直线偏振点  $V$ , 轨迹上的其他 SOP 点是脉冲上升下降沿过程中光的 SOP。

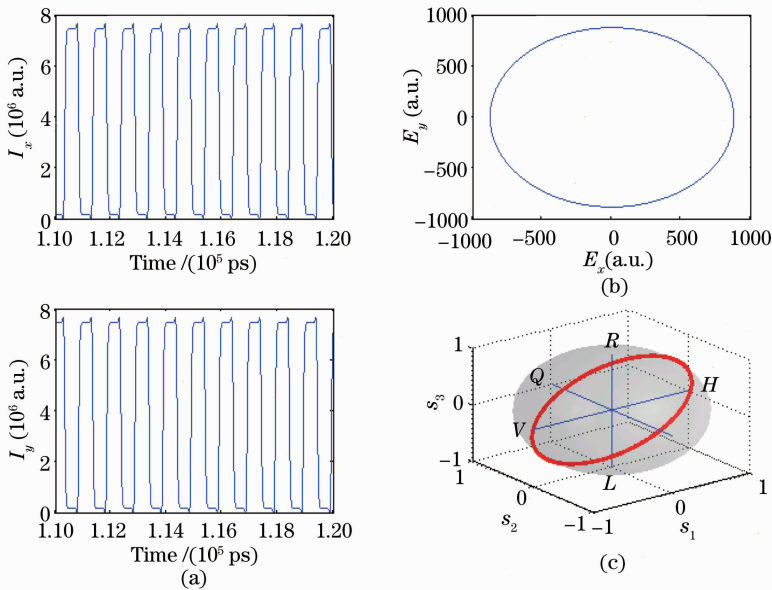


图 2 正交偏振调制输出的仿真结果。(a)正交输出光强波形;(b)  $E_x, E_y$  关系;(c)输出 SOP 轨迹

Fig. 2 Simulation results of the orthogonal polarization output of the system. (a) Intensity waveforms of  $E_x$  and  $E_y$  modes; (b) attractor of  $E_x$  versus  $E_y$ ; (c) output SOP trajectory

随着 SOA 的注入电流的加大,超过稳定阈值电流,系统即由稳定态进入混沌态。设定  $\delta_c = 0, \delta_l = 0$ ,即环路上无偏振转换效应,仿真得到此时系统工作在强度混沌状态。图 3 给出了仿真得出的强度混沌状态下,系统输出光的波形。由图 3(a)可见,  $I_x$  和  $I_y$  具有相同的时序波形,且大小相同;图 3(a)和图 3(b)表明两路光同相等幅;而图 3(c)表明此时输出光偏振态稳定在  $Q$  点。

如果考虑光纤环路中的偏振转换的影响,SOA 输出光在经过光纤环一周后,重新进入 SOA 的光场的偏振态会发生变化,导致进入 SOA 的 TE 模与 TM 模光的相位和光强都不相同,即  $E_x(t)$  和  $E_y(t)$  不同。由(5)式可见,SOA 对 TE 和 TM 模分别引入

的非线性瞬时相位调制和幅度调制强度也将不同,由此导致偏振混沌的产生。图 4(a)、(b)和(c)分别给出了仿真得出的系统在偏振混沌态下两路正交偏振分量的光强时域波形、 $E_x$  和  $E_y$  的关系图和 SOP 在庞加莱球上的变化轨迹。

由图 4 可见,两正交偏振分量的光强时序波形不同,  $E_x$  和  $E_y$  已不再具有确定的相位和幅度关系,系统输出光的瞬时偏振态可随机遍历分布于整个庞加莱球表面。通过调节光纤环中的偏振控制器,可以使得输出光的瞬时偏振态在庞加莱球面上均匀分布,此时光的输出光偏振度的时间平均接近为零。但此时的偏振转换特性不是确定的,而与系统的注入电流,SOA 的增益与非线性系数以及光纤环的参数都有密切关系。

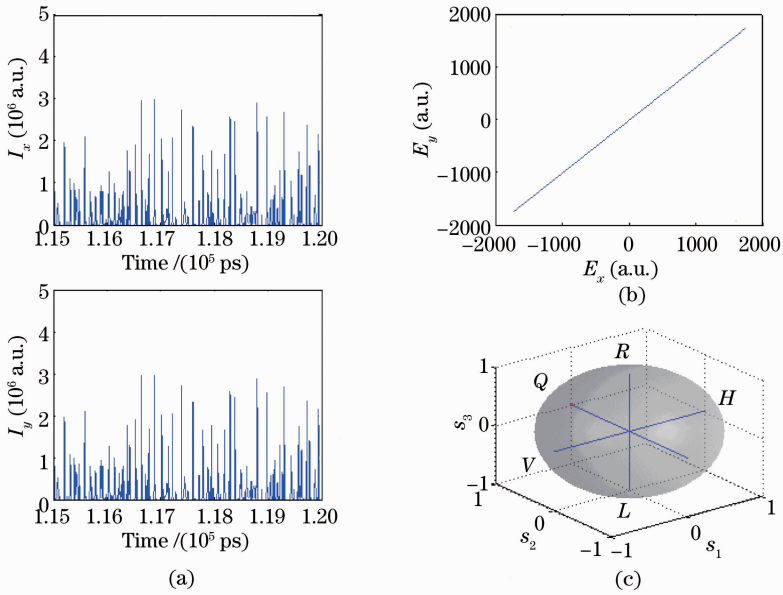


图3 强度混沌态下的系统输出。(a)正交输出光强波形；(b)  $E_y$ ,  $E_x$  关系曲线；(c)输出 SOP 轨迹  
Fig.3 Simulation results of intensity chaos. (a) Intensity waveforms of  $E_x$  and  $E_y$  modes; (b) attractor of  $E_x$  versus  $E_y$ ; (c) output SOP trajectory

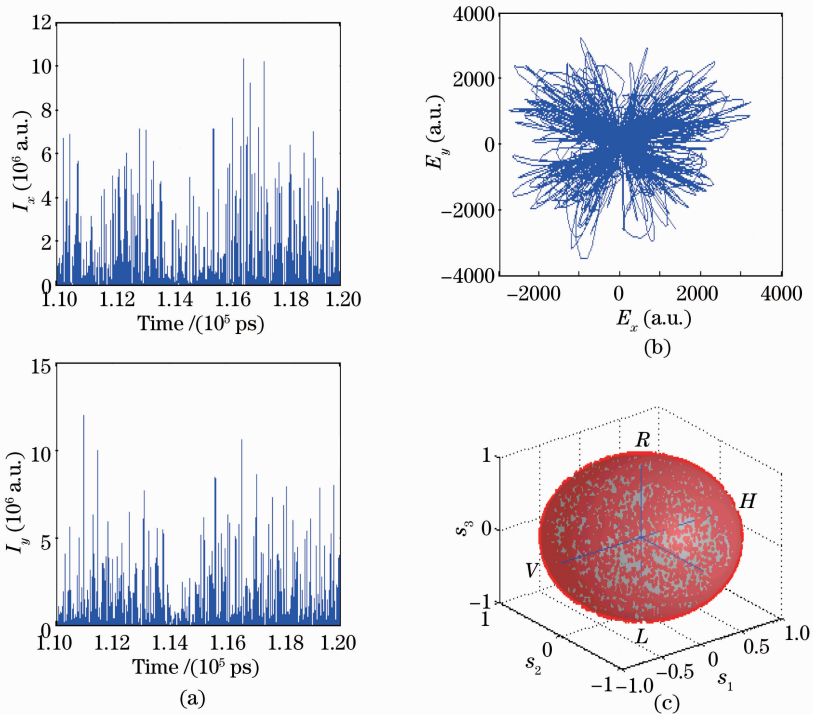


图4 偏振混沌态下的系统输出。(a)正交输出光的时序变化；(b)  $E_y$  和  $E_x$  关系曲线；(c)输出 SOP 轨迹  
Fig.4 Simulation results for the polarization chaos. (a) Time sequences of  $I_x$  and  $I_y$ ; (b) attractor of  $E_x$  versus  $E_y$ ; (c) output SOP trajectory

### 3 实验结果与分析

根据前面的理论与仿真结果，搭建了如图1所示实验系统。SOA 型号为 CovegaS1117s，其偏振相关增益小于 0.5 dB，各向异性较弱。光纤环长约

为 20 m，滤波器中心频率为 1550.9 nm，谱宽为 1.6 nm。SOA 光纤环的输出光由 3 dB 耦合器 2 分为两路，其中一路经过偏振控制器的调节后，由正交偏振分离器分为两束偏振正交光分量，再由光电探

测器接收后,送入示波器检测两路正交光的波形。另一路光则直接由 Santec PAM-10 偏振分析仪进行偏振态的检测。

实验中首先加大 SOA 的注入电流,当注入电流增大到 235 mA 时,系统开始出现混沌现象。调小注入电流至 180 mA,仔细调节偏振控制器并观察示波器输出,直至出现图 5 所示的脉冲波形。图中观察到的  $I_x$  和  $I_y$  两路信号为方波脉冲输出,相位相差  $180^\circ$ 。此时偏振控制器的偏振转换特性为:将部分 SOA 输出的两正交光旋转  $90^\circ$ 后送回 SOA,且沿 SOA 的 TE 或 TM 模方向进入 SOA,故而得到输出反相的两路偏振正交光。由示波器可以读出脉冲宽度为 44 ns,该脉宽由光纤环长决定,因此,通过设置不同的光纤环长,可以得到不同重复周期的正交偏振调制输出。由示波器的测量波形可见,检测到的输出光时域响应与仿真结果相一致。

增加 SOA 的注入电流至 235 mA 以上,可以观察到系统出现强度混沌,表明系统处于混沌状态。调节环中的偏振控制器,在示波器上可以发现,两路正交光的时域波形变得不同,继续调节偏振控制器,并观察偏振分析仪的 DOP 指示,直至其指示为零,

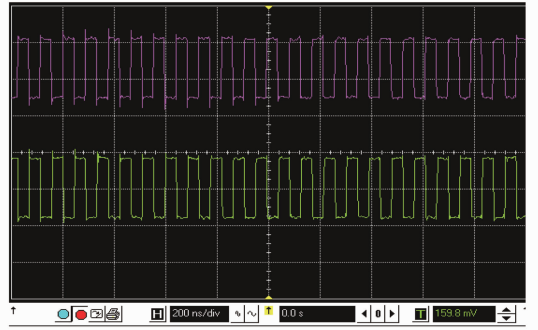


图 5 检测到的两路正交偏振光的脉冲序列  
Fig. 5 Pulse sequences of  $I_x$  and  $I_y$  received in the stationary state

此时观察到的两路正交输出光的波形由图 6(a)给出,表明系统输出为偏振混沌。对于输出偏振态的检测,由于输出信号的变化速率大于 100 MHz,而实验中的偏振分析仪的检测速率仅为 1 MHz,远低于信号的变化速率,因此检测不到信号的瞬时偏振度,而只能读出信号的时间平均偏振度。图 6(b)给出了偏振分析仪的测试结果。可见输出信号 Stokes 参数( $s_1, s_2, s_3$ )的时间平均接近为零,在庞加莱球上表示为圆心上的一点;检测到的时间平均 DOP 为 0.368%。

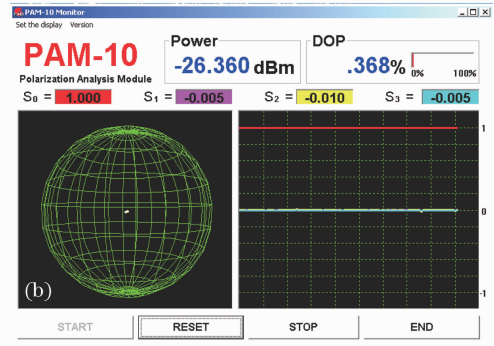
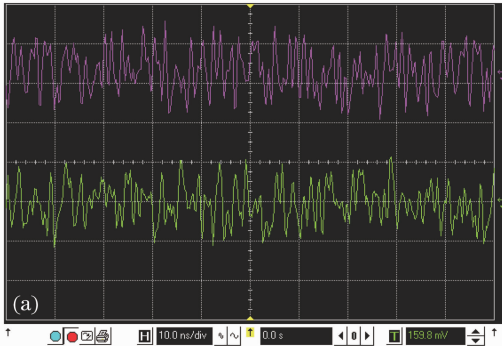


图 6 偏振混沌输出信号的实验观测。(a)两路正交偏振分离光的时域波形;(b)偏振分析仪监测的偏振态参数和动态 DOP

Fig. 6 Experimental observations of the polarization chaos. (a) Time sequences of  $I_x$  and  $I_y$ ; (b) time-averaged Stokes parameters and DOP

## 4 结 论

在基于各向同性 SOA 构成的光纤环激光系统的理论模型基础上,讨论了由于光纤环路的偏振转换特性对系统工作动态特性的影响。仿真和实验结果表明,通过调节 SOA 的注入电流可控制系统工作在稳态或混沌态;而环路的偏振效应则影响系统输出偏振态的动态响应。系统稳态工作时,通过调节光纤环路的偏振转换,可以实现正交偏振调制输

出;而系统在混沌态工作时,调节光纤环路的偏振转换,可以实现系统输出的混沌动态退偏。依据理论仿真分析,建立了相应的实验系统,观察到了稳态工作下的正交偏振态的调制激光输出以及混沌态下的偏振混沌输出。实验结果与理论仿真结果具有良好的一致性。系统工作在偏振混沌态时,通过调节环路中的偏振控制器,可以实现输出光的动态 DOP 小于 1%。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Input-polarisation scanning technique for overcoming polarisation-induced fading in interferometric fiber sensors [J]. *Electronics Lett.*, 1988, **24**(15): 931~933
- 2 J. H. Lee, C. J. Youn, K. J. Park *et al.*. A novel technique to overcome the polarization effects [C]. OFC, 2003. 543~544
- 3 N. S. Kim, X. Zou, K. Lewis. CW depolarized multiwavelength Raman fiber ring laser with over 58 channels and 50 GHz channel spacing [C]. OFC, 2002. 640~642
- 4 Q. D. Liu, L. Shi, P. P. Ho *et al.*. Nonlinear vector rotation and depolarization of femtosecond laser pulses propagating in non-birefringent single-mode optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **138**(1-3): 45~48
- 5 J. Sakaguchi, T. Katayama, H. Kawaguchi. All-optical memory operation of 980-nm polarization bistable VCSEL for 20-Gb/s PRBS RZ and 40-Gb/s NRZ data signals [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12362~12370
- 6 L. Yi, W. Hu, H. He *et al.*. All-optical reconfigurable multi-logic gates based on nonlinear polarization rotation effect in a single SOA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 030603
- 7 Lü Yuxiang, Niu Libing, Zhang Jianzhong *et al.*. 500 Mb/s fast true random bit generator based on chaotic laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502010  
吕玉祥, 牛利兵, 张建忠等. 基于混沌激光的 500 Mb/s 高速真随机数发生器[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502010
- 8 Zhang Yuanfang, Yang Lingzhen. Theoretical and experimental study of chaos generation with single optical feedback in the He-Ne laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0102003  
张元芳, 杨玲珍. 单反馈 He-Ne 激光器混沌激光产生的理论及实验研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0102003
- 9 Lin Rizhao, Fu Zhongqian, Li Yongliang *et al.*. Communication using circle polarization shift keying modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105007  
林日钊, 傅忠谦, 李永亮等. 圆偏振移位键控的星地激光通信误码率研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1105007
- 10 R. Vicente, J. Mulet, C. R. Mirasso *et al.*. Bistable polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 996~998
- 11 T. Katayama, Y. Sato, T. Mori *et al.*. Polarization bistable characteristics of 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(45-49): L1231~L1233
- 12 Wang Xiaofa, Xia Guangqiong, Wu Zhengmao. Chaotic synchronization performances of two unidirectionally coupled VCSELs subject to negative optoelectronic feedback [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(7): 306~311  
王小发, 夏光琼, 吴正茂. 光电负反馈下单向耦合注入垂直腔表面发射激光器的混沌同步特性研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(7): 306~311
- 13 M. Sondermann, H. Bohnet, T. Ackemann. Low-frequency fluctuation and polarization dynamics in vertical-cavity surface-emitting lasers with isotropic feedback [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(2): 021802
- 14 Zhang Mingjiang, Liu Tiegen, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002  
张明江, 刘铁根, 郑健宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0405002
- 15 Yan Senlin. Period chaos controlling in a gain-modulated semiconductor laser by delay polarization feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 297~301  
颜森林. 增益可调半导体激光器混沌偏振延时双反馈周期的控制方法[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 297~301
- 16 Yan Senlin. Control of chaos in an external cavity delay feedback semiconductor laser via modulating the polarizing light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6878~6882  
颜森林. 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可调制方法研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(11): 6878~6882
- 17 Y. Takeuchi, R. Shongenji, J. Ohtsubo. Chaos synchronization in semiconductor lasers with polarization-rotated optical feedback [J]. *Opt. Rev.*, 2010, **17**(5): 467~475
- 18 D. W. Sukow, K. L. Blackburn, A. R. Spain *et al.*. Experimental synchronization of chaos in diode lasers with polarization-rotated feedback and injection [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(20): 2393~2395
- 19 Li Zhengyong, Wu Chongqing, Dong Hui *et al.*. Matrix analysis for polarization rotation of semiconductor optical amplifiers with related application [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 842~845  
李政勇, 吴重庆, 董辉等. 半导体光放大器偏振旋转效应的矩阵分析及应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 842~845
- 20 R. Geldenhuys, Y. Liu, J. J. Vegas Olmos *et al.*. An optical threshold function based on polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7275~7280
- 21 Wang Xiaochao, Fan Wei, Zhang Panzheng *et al.*. Pulse contrast enhancement based on nonlinear polarization rotation in optical fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1279~1284  
汪小超, 范薇, 张攀政等. 利用光纤中的非线性偏振旋转效应提高激光脉冲对比度[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1279~1284
- 22 M. Martinelli, J. C. Palais. Theory of a tunable fiber ring depolarizer theory [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3014~3018
- 23 C. Wang, L. Li, L. Peng. One degree of freedom fiber ring depolarizer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(12): 911~913

栏目编辑: 王晓琰