

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0013-06

半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的数值研究

方 捻 单 超 王陆唐 黄肇明

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 建立了半导体光纤环形激光器的动力学模型, 并进行了数值分析和研究。半导体光放大器采用由张应变引起的自身双折射理论模型, 光纤的双折射效应和偏振控制器对光的偏振调节作用综合用一个线性双折射琼斯矩阵表示。利用 Matlab 软件对该模型进行仿真, 寻找到特定电流下半导体光纤环形激光器产生偏振混沌时偏振控制器的延迟角与方位角的范围以及半导体光放大器注入电流对环形激光器产生偏振混沌的影响。仿真的环形激光器输出功率与偏振度随半导体光放大器注入电流的变化关系与实验结果相符。结果表明, 半导体光放大器注入电流越大、偏振控制器的延迟角与方位角越接近零, 越容易产生高频偏振混沌。

关键词 激光器; 偏振混沌; 半导体光放大器; 光纤环形激光器

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0013

Numerical Investigation of Semiconductor Fiber Ring Laser about Generation of Polarization Chaos

Fang Nian Shan Chao Wang Lutang Huang Zhaoming

(The Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network,

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The dynamic model of the semiconductor fiber ring laser is developed and investigated numerically. A semiconductor optical amplifier (SOA) model is employed in which the self birefringence of SOA due to stress is taken into account. The integral action of the birefringence of the fiber and the PC is represented with a Jones matrix of linear retarder. The dynamics model was simulated with Matlab software. The ranges of the linear retardation and the azimuth of the fast axis of the linear retarder are founded, in which the ring laser can generate polarization chaos. The effect of injected current of the SOA on the generation of polarization chaos in the ring laser is explored. The simulation results of the relationships between optical powers, degrees of polarization (DOP) of fiber ring laser and currents of the SOA are consistent with the experimental results reported earlier. A conclusion is drawn that the bigger the injected current is, and the more adjacent to zero the linear retardation and the azimuth of the fast axis of the linear retarder are, the easier the semiconductor fiber ring laser generates polarization chaos with high frequency.

Key words lasers; polarization chaos; semiconductor optical amplifier; fiber ring laser

1 引 言

N. Korneev^[1] 通过数值分析指出, 在非均匀(既有线性双折射又有非线性双折射)和周期结构的谐振腔中都能产生复杂的混沌的偏振动力学, 即偏振混沌。Loh 等^[2~4] 实验观察到了外光反馈腔半导体激光器的偏振混沌现象, 建立了该激光器的偏振自调制的动力学方程。Williams 等^[5] 建模研究了掺铒光纤环形激光器的偏振混沌动力学行为。王陆唐

等^[6] 报道了基于半导体光纤环形激光器的偏振混沌光通信的实验结果, 但没有建立相应的理论模型。本文主要通过建立半导体光纤环形激光器的动力学方程, 探讨半导体光放大器(SOA)注入电流、偏振控制器(PC)的延迟角与方位角对产生偏振混沌的影响。

Loh 和 Williams 建模时都采用两偏振模式共享载流子的速率方程。我们引用 Dorren 等^[7] 提出

基金项目: 国家自然科学基金(60577042)和上海市重点学科(T102)资助项目。

作者简介: 方 捻(1972-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn

的由张应变引起的 SOA 自身双折射的理论模型, 利用两正交线偏振模式 TE 和 TM 模分别作用于 SOA 载流子的速率方程与 SOA 两正交线偏振模式的传输方程, 把光纤的双折射效应和 PC 对光的偏振调节作用综合用一个线性双折射琼斯矩阵表示, 来建立半导体光纤环形激光器的偏振混沌动力学模型。这里需指出的是, 我们使用的线性双折射琼斯矩阵包含了延迟角和方位角, 而 Loh 和 Williams 建模时都只考虑了波片或 PC 的延迟角的变化。

2 半导体光纤环形激光器结构

半导体光纤环形激光器如图 1 所示, 主要由 SOA、PC、滤波器、环形器和耦合器 OC 构成。其中 SOA 是非线性器件, PC 用来控制光纤环中传输光的偏振态, 滤波器用来确定环形激光器的工作波长, 环形器用来引入调制信号光, 同时还起

到隔离器的作用以构成单向环, 耦合器用来输出混沌光。

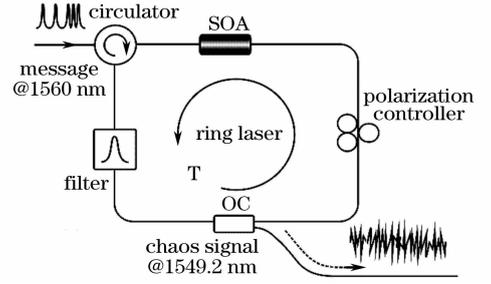


图 1 半导体光纤环形激光器

Fig. 1 Semiconductor fiber ring laser

3 半导体光纤环形激光器的理论模型

设 x 和 y 方向分别为 TE 模电场振动方向和 TM 模横向电场振动方向。忽略放大的自发辐射 (ASE) 噪声的影响, 光波在 SOA 中的传输方程^[7]为

$$\frac{\partial}{\partial t} E_x(t, z) + v_{gx} \frac{\partial}{\partial z} E_x(t, z) = \frac{1}{2} \Gamma_x (1 + i\alpha_x) g_x(t, z) E_x(t, z) - \frac{1}{2} \alpha_{intx} E_x(t, z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} E_y(t, z) + v_{gy} \frac{\partial}{\partial z} E_y(t, z) = \frac{1}{2} \Gamma_y (1 + i\alpha_y) g_y(t, z) E_y(t, z) - \frac{1}{2} \alpha_{inty} E_y(t, z), \quad (2)$$

式中 E 为两个模式的慢变复包络, v_g 为群速度, Γ 为限制因子, α 为线宽展宽因子, g 为增益函数, α_{int} 为模式损耗。

TE 模和 TM 模在 SOA 中的 (线性) 增益表达式可表示为

$$g_x(t, z) = \xi_x [2n_x(t, z) + n_y(t, z) - N_0], \quad (3)$$

$$g_y(t, z) = \xi_y [2n_y(t, z) + n_x(t, z) - N_0], \quad (4)$$

式中 $n_x(t, z)$ 和 $n_y(t, z)$ 为沿 x 和 y 轴方向跃迁的空穴数, N_0 为透明载流子数, ζ_x 和 ζ_y 为增益系数, 在强光入射的情况下, 由于载流子热引起增益饱和, ζ_x 和 ζ_y 相应地可表示为 $\xi_x = \xi_{0x}/(1 + \epsilon S_x)$, $\xi_y = \xi_{0y}/(1 + \epsilon S_y)$, ξ_{0x} 和 ξ_{0y} 为小信号增益系数, ϵ 在 SOA 中的典型值为 10^{-7} ^[7]。

在不考虑超快非线性响应的情况下, x, y 方向的载流子速率方程^[7]可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} n_x(t, z) = -\frac{n_x(t, z) - \bar{n}_x}{T_1} - g_x(t, z) S_x(t, z), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_y(t, z) = -\frac{n_y(t, z) - \bar{n}_y}{T_1} - g_y(t, z) S_y(t, z), \quad (6)$$

式中 \bar{n}_x, \bar{n}_y 分别表征各自的稳定值, $\bar{n}_x = \bar{n}f/(1+f)$, $\bar{n}_y = \bar{n}/(1+f)$, 其中 $\bar{n} = T_1 I/e$, I 为 SOA 的工作电流值, e 为电子电荷; T_1 为电子空穴复合时间; f 为两偏振方向载流子失衡因子。S 表示总光子数, 且有 $S = |E(t, z)|^2$ 。

环形激光腔中光波传输的边界条件如下

$$\begin{bmatrix} E_x(t, 0) \\ E_y(t, 0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-K} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-jkl_t) & 0 \\ 0 & \exp(-jkl_t) \end{bmatrix} M_l(\delta, \varphi) \begin{bmatrix} E_x(t - l_f/v_{gxf}, L_S) \\ E_y(t - l_f/v_{gyf}, L_S) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 K 为输出耦合器的耦合系数^[8], l_f 为光纤长度, L_S 为 SOA 有源波导长度。 $k = \beta - j\alpha$ 为光纤的复传播常数, $\beta = 2\pi/\lambda$ 为相位常数, α 为衰减常数。 $M_l(\delta, \varphi)$ 是偏振控制器与光纤的偏振作用综合的线双折射琼斯矩阵。 δ 是延迟角, 取值范围为 $-\pi \sim \pi$, φ 为方位角 (快轴与 x 轴的夹角), 取值为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。

$$M_l(\delta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \exp(-j\delta) & \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi \exp(-j\delta) \\ \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi \exp(-j\delta) & \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \exp(-j\delta) \end{bmatrix}.$$

将传输方程与载流子速率方程沿着 SOA 的长度积分, 并与边界条件相结合, 可以得到描述电场两偏振分量与载流子的差分-微分方程。

$$E_x(t) = B_x(t) \sqrt{1-K} \exp(-jkl_t) \{ [\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \exp(-j\delta)] E_x(t - \tau_R) + [\sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi \exp(-j\delta)] E_y(t - \tau_R) \}, \quad (8)$$

$$E_y(t) = B_y(t) \sqrt{1-K} \exp(-jkl_t) \{ [\sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi \exp(-j\delta)] E_x(t - \tau_R) + [\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \exp(-j\delta)] E_y(t - \tau_R) \}, \quad (9)$$

$$\frac{dW_x(t)}{dt} = -\frac{W_x(t) - \bar{n}_x L_S}{T_1} - \frac{v_{gx}}{\Gamma_x} \exp\left(-\frac{\alpha_{intr}}{v_{gx}} L_S\right) \times \left\{ \exp\left\{ \frac{\Gamma_x \xi_x}{v_{gx}} [2W_x(t) + W_y(t) - N_0 L_S] \right\} - 1 \right\} |E_x(t - \tau_R)|^2, \quad (10)$$

$$\frac{dW_y(t)}{dt} = -\frac{W_y(t) - \bar{n}_y L_S}{T_1} - \frac{v_{gy}}{\Gamma_y} \exp\left(-\frac{\alpha_{inty}}{v_{gy}} L_S\right) \times \left\{ \exp\left\{ \frac{\Gamma_y \xi_y}{v_{gy}} [2W_y(t) + W_x(t) - N_0 L_S] \right\} - 1 \right\} |E_y(t - \tau_R)|^2, \quad (11)$$

其中

$$E_x(t) = E_x(t, 0), E_y(t) = E_y(t, 0), W_x(t) = \int_0^{L_S} n_x(t + z/v_{gx}, z) dz, W_y(t) = \int_0^{L_S} n_y(t + z/v_{gy}, z) dz,$$

$$B_x(t) = \exp\left\{ -\frac{\alpha_{intr}}{2v_{gx}} L_S + \frac{\Gamma_x(1 + i\alpha_x)\xi_x}{2v_{gx}} [2W_x(t) + W_y(t) - N_0 L_S] \right\},$$

$$B_y(t) = \exp\left\{ -\frac{\alpha_{inty}}{2v_{gy}} L_S + \frac{\Gamma_y(1 + i\alpha_y)\xi_y}{2v_{gy}} [2W_y(t) + W_x(t) - N_0 L_S] \right\}.$$

4 半导体光纤环形激光器仿真结果

4.1 参数的确定

根据文献[9], 限制因子 Γ_y 可比 Γ_x 小 30%, 并结合文献[10], 确定 $\Gamma_x = 0.41, \Gamma_y = 0.29$ 。根据文献[10]与文献[7]的 SOA 模型的对应关系以及文献[10]的 SOA 部分参数, 确定了 $L_S, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_{intr}, \alpha_{inty}, N_0, v_{gx}$ 与 v_{gy} 等参数。文献[7,9]均指出, 不可能准确估计 $N_0, T_1, \Gamma_x, \Gamma_y, \alpha_{intr}, \alpha_{inty}, v_{gx}$ 与 v_{gy} 的值, 但可以简单地通过以下确定增益系数和载流子非平衡因子的方法来补偿这些不确定性。即令增益系数 $\xi_x = \xi_y = \xi$, 根据实验测得的不同电流下 TE 与 TM 模的增益, 换算出 ξ 和 f , 这样自然包含了因注入电流较大引起的 SOA 的增益饱和效应。根据文献[10,11], 确定 $T_1 = 2000$ ps。其他参数根据实际实验确定。

4.2 初值与算法的确定

当 SOA 注入电流为某一常数值, 取 $W_x(0) = \bar{n}_x L_S, W_y(0) = \bar{n}_y L_S$, 即由注入电流决定的稳态值。有一个小的扰动(激光器噪声)分别作用于 TE 模和 TM 模。电场的初值大小只是影响程序出现

混沌的运行时间, 不影响最终运行结果, 因为初值较小时需要更多次的迭代激光器才能振荡起来。利用固定步长 4 阶龙格-库塔算法求解差分-微分方程组(8)~(11), 步长小于 50 ps。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

Confinement factor Γ_x, Γ_y	0.41, 0.29
Linewidth enhancement factor α_x, α_y	7, 7
Modal loss $\alpha_{intr}, \alpha_{inty}/\text{ps}^{-1}$	0.38
Electron-hole recombination time T_1/ps	2000
Optical transition state number $N_0/10^8$	9.75
Group velocity $V_{gx}, V_{gy}/(\mu\text{m}/\text{ps})$	84, 27
SOA length $L_S/\mu\text{m}$	1500
Fiber length l_f/m	9.9
Delay time of a ring τ_R/ns	49
Coupling coefficient K	0.5
Optical wavelength λ/nm	1549.2
Fiber refractive index n	1.48
Fiber loss coefficient $\alpha/(\text{dB}/\text{km})$	0.22
Electric unit charge $e/10^{-19}$ C	1.60

4.3 仿真结果与分析

4.3.1 方位角与延迟角对偏振混沌输出的影响

在电流较大时, 如 450 mA, 设置延迟角 $\delta = \pi$,

方位角 $\varphi = \pi/4$ (PC 加光纤的偏振作用相当于一个半波片), 两个模式间没有耦合, 只是相互转换, 激光器输出为周期方波。然后单独调节方位角 φ , 使 φ 从 $\pi/4$ 慢慢减小到 $\pi/4 - 0.3$, 系统就出现了偏振混沌。继续减小 φ 直到 $\pi/4 - 1.27$, 仍然是偏振混沌输出, 但 φ 减到 $\pi/4 - 1.3$ 输出为偏振混沌与方波的叠加, 这是周期方波向偏振混沌的过渡态。所以 $-0.485 < \varphi < 0.485$ 是半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的方位角(弧度)范围。如果单独调节延迟角 δ , 使 δ 从 π 慢慢减小, 直到 $\pi - 1.1$ 系统才出现混沌。继续减小 δ 直到 $\pi - 5.18$, 仍然是偏振混沌输出, 但减到 $\pi - 5.2$ 再次出现周期方波向偏振混沌

的过渡态。所以 $-2.04 < \delta < 2.04$ 是半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的延迟角(弧度)范围。而且 φ 和 δ 越接近零, 偏振混沌变化的频率越高, 庞加莱球上的轨迹越密集, 然而 $\varphi = 0$ 或 $\delta = 0$ 时, 输出变为偏振自脉冲。图 2 给出了两个方波向偏振混沌过渡的输出状态和两种不同的偏振混沌状态时, TE 和 TM 模强度的时域波形以及一个环行周期内偏振态在庞加莱球上的变化轨迹。仿真结果与我们实验时的情况一致: 偏振混沌输出对扳动 PC 旋钮(相当于扭转光纤, 改变的是模型中琼斯矩阵的方位角 φ) 较敏感, 而对旋转 PC 旋钮(相当于挤压光纤, 改变的是模型中琼斯矩阵的延迟角 δ) 不太敏感。

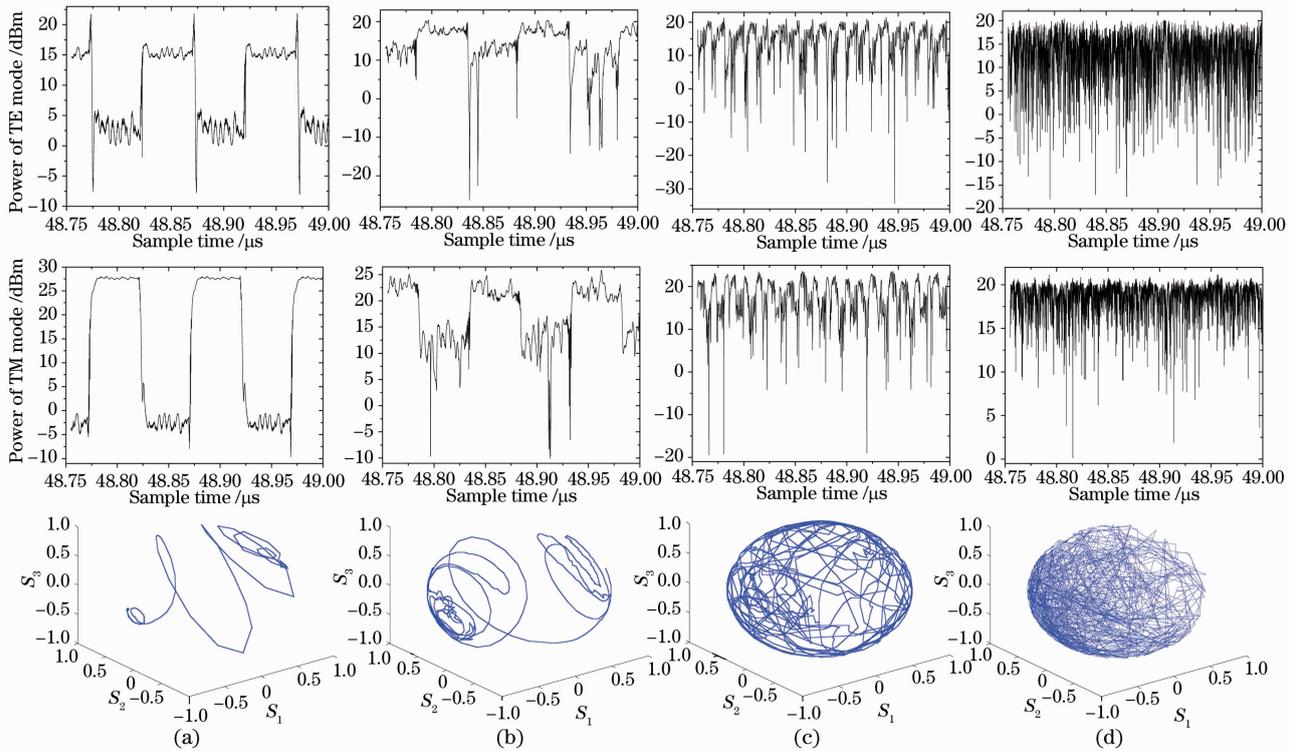


图 2 注入电流为 450 mA 时, 输出时域波形和一个环行周期内偏振态在庞加莱球上的变化轨迹。(a) $\varphi = \pi/4 - 0.1, \delta = \pi$, 方波向偏振混沌的过渡态 1, 最大 Lyapunov 指数为 0.0177, (b) $\varphi = \pi/4 - 0.2, \delta = \pi$, 方波向偏振混沌的过渡态 2, 最大 Lyapunov 指数为 0.0284, (c) $\varphi = \pi/4 - 0.3, \delta = \pi$, 低频偏振混沌, 最大 Lyapunov 指数为 0.0586, (d) $\varphi = \pi/4 - 0.6, \delta = \pi$, 高频偏振混沌, 最大 Lyapunov 指数为 0.1022

Fig. 2 When the injected current of the SOA is 450 mA, the output temporal waveshapes and the trajectories of the SOPs on the Poincaré sphere in a ring period. (a) $\varphi = \pi/4 - 0.1, \delta = \pi$, a transition state of square-wave to polarization chaos, the maximal Lyapunov index is 0.0177, (b) $\varphi = \pi/4 - 0.2, \delta = \pi$, another transition state of square-wave to polarization chaos, the maximal Lyapunov index is 0.0284, (c) $\varphi = \pi/4 - 0.3, \delta = \pi$, polarization chaos with low frequency, the maximal Lyapunov index is 0.0586 (d) $\varphi = \pi/4 - 0.6, \delta = \pi$, polarization chaos with high frequency, the maximal Lyapunov index is 0.1022

4.3.2 SOA 注入电流对偏振混沌输出的影响

减小电流到 215 mA 再做计算, 结果在 $\delta = \pi$ 时, 半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的 PC 方位角范围几乎不变。然而, 在 $\varphi = \pi/4$ 时, 半导体光

纤环激光器产生偏振混沌的 PC 延迟角范围却变为 $-1.44 < \delta < 1.44$ 。这说明电流对偏振混沌的产生影响较大, 小电流时偏振混沌不容易产生, 需要小心调节 PC。然而在小电流时容易产生偏振的准方波

和准正弦周期信号,它们在庞加莱球上为规则的弧线(准方波)或闭合线(准正弦),如图 3 所示。

为了考察注入电流的影响,在实验上曾测得环形激光器输出功率与偏振度(DOP)随 SOA 注入电流的变化关系^[12],如图 4(a)所示。同样,我们也仿真了这一过程,结果如图 4(b)所示。两者变化趋势

非常一致,但在输出结果的数值上两者有些不同。这是由于建模时没有考虑 SOA 的 ASE 噪声和端面损耗,又无法获得该实验中 PC 的延迟角和方位角参数,故仿真用的 PC 参数($\delta=\pi-1.6, \varphi=\pi/4$)无法完全与实验上相对应。

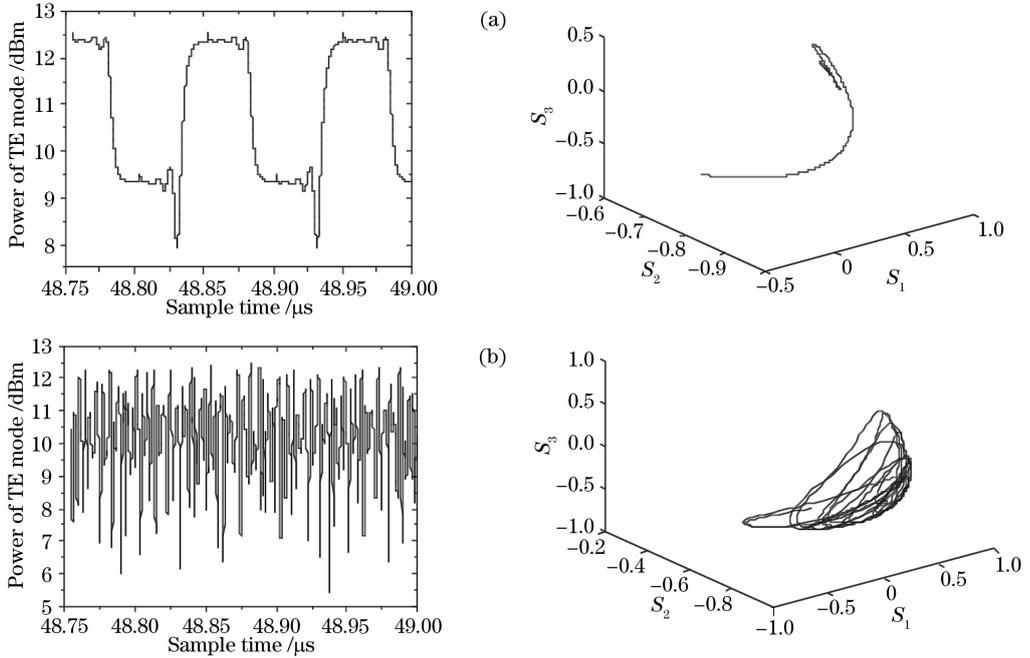


图 3 注入电流为 215 mA 时,准方波和准正弦输出的 TE 模强度时域波形与一个环形周期内偏振态在庞加莱球上的变化轨迹。(a) $\delta=\pi-1.6, \varphi=\pi/4$,准方波, (b) $\delta=\pi-1.65, \varphi=\pi/4$,准正弦

Fig. 3 When the injected current of the SOA is 215 mA, temporal waveshapes of TE mode of the quasi-square-wave and the quasi-sine outputs and their trajectories of the SOPs on the Poincare sphere in a ring period. (a) $\delta=\pi-1.6, \varphi=\pi/4$, quasi-square-wave, (b) $\delta=\pi-1.65, \varphi=\pi/4$, quasi-sine

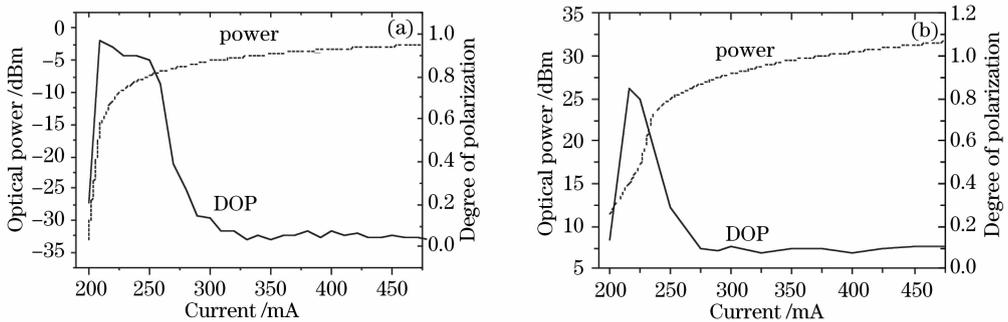


图 4 环形激光器输出功率与偏振度(DOP)随 SOA 注入电流的变化关系。(a) 实验结果, (b) 仿真结果

Fig. 4 Relationship between optical powers, degrees of polarization (DOP) of fiber ring laser and currents of the SOA. (a) Experiment results, (b) simulation results

5 结 论

对半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的动力学进行了数值分析和研究。采用由张应变引起的 SOA 自身双折射的理论模型,利用 TE 和 TM 模分

别作用于 SOA 载流子的速率方程与 SOA 两正交偏振模式的传输方程,把光纤的双折射效应和 PC 对光的偏振调节作用综合用一个包含了延迟角和方位角的线性双折射琼斯矩阵表示,建立了半导体光

纤环形激光器的偏振混沌动力学模型。利用 Matlab 软件对该模型进行仿真。通过仿真,寻找到了在特定注入电流下 SOA 光纤环形激光器产生偏振混沌的琼斯矩阵的延迟角与方位角的范围。仿真出了与实验结果相符的环形激光器输出功率与偏振度(DOP)随 SOA 注入电流的变化关系。发现 SOA 注入电流越大,PC 的延迟角与方位角越接近零,越容易产生高频偏振混沌。为相应的实验结果提供了理论依据,为基于半导体光纤环形激光器的混沌光通信的研究提供了理论参考与指导。

参 考 文 献

- 1 N. Korneev. Polarization chaos in nonlinear birefringent resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **211**: 153~157
- 2 W. H. Loh, Y. Ozeki, C. L. Tang. High-frequency polarization self-modulation and chaotic phenomena in external cavity semiconductor lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(5): 2613~2615
- 3 W. H. Loh, Chung L. Tang. Numerical Investigation of ultrahigh frequency polarization self-modulation in semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **21**(3): 389~395
- 4 W. H. Loh, C. L. Tang. Successive higher-harmonic bifurcations of a polarization self-modulated external cavity semiconductor laser[J]. *Opt. Commun.*, 1991, **85**: 283~290
- 5 Q. L. Williams, J. Garcia-Ojalvo, R. Roy. Fast intracavity polarization dynamics of an erbium-doped fiber ring laser: Inclusion of stochastic effects[J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(3): 2376~2386
- 6 Lutang Wang, Zhaoming Huang. Optical chaos communication with a dynamical SOA-based fiber ring laser[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5281**: 619~627
- 7 H. J. S. Dorren, Daan Lenstra, Yong Liu *et al.*. Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers; theory and application to all-optical flip-flop memories[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(1): 141~148
- 8 P. Shen, J. C. Palais, C. Lin. Fiber recirculating delay-line tunable depolarizer[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**: 443~448
- 9 X. Yang, D. Lenstra, G. D. Khoe *et al.*. Nonlinear polarization rotation induced by ultrashort optical pulses in a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**: 169~179
- 10 Sebastian Randel, Alessandro Marques de Melo, Klaus Petermann *et al.*. Novel scheme for ultrafast all-optical XOR operation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(12): 2808~2815
- 11 R. Gutiérrez-Castrejón, Laurent Schares, Lorenzo Occhi *et al.*. Modeling and measurement of longitudinal gain dynamics in saturated semiconductor optical amplifiers of different length[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(12): 1476~1484
- 12 Fang Nian, Guo Xiaodan, Wang Chunhua *et al.*. The characteristic of polarization chaos and coherence of SOA-based fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 128~131
方 捻,郭小丹,王春华 等. 半导体光放大光纤环形激光器的偏振混沌与相干性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 128~131