

氦氖激光器混沌反馈相位周期控制方法研究

蔡璐璐^{1,2} 任秩倩^{1*} 万玉良¹ 吴飞¹

¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 通过分析氦氖激光器在光反馈下的混沌动力学特征,提出了氦氖激光器混沌反馈相位控制方法,并建立了激光混沌反馈相位周期控制下的动力学方程和物理模型。选取适当的反馈系数,加入相位控制器控制反馈光的相移,通过对反馈系数和反馈光相移的控制,可以将激光混沌控制到稳定态、周期态及混沌态。结果表明:在不同强度的反馈光下,通过1/8波长周期相移调制控制、1/4波长周期相移调制控制、半波长周期相移调制控制以及波长周期相移调制控制,氦氖激光器的混沌经过一定的弛豫时间可以被控制到单周期态、双周期态、三周期态以及多周期态等。

关键词 激光技术;氦氖激光器;周期;相位控制;混沌

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.011404

Study on Chaotic Controlling via Feedback Phase Periodicity in He-Ne Laser

Cai Lulu^{1,2} Ren Zhiqian¹ Wan Yuliang¹ Wu Fei¹

¹College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Hebei Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The method of chaotic controlling is presented via controlling the phase in He-Ne lasers under optical feedback, which is based on the analysis of the chaotic dynamics characteristics of He-Ne lasers in the feedback light. The dynamics equations and physical model under the control of laser chaotic feedback phase cycle are established. Selecting appropriate feedback coefficient, the laser chaos can be controlled to a steady state, periodic state, and chaos state by controlling the feedback coefficient and the phase-shift of the feedback light using the phase controller in the feedback channel. Under the conditions of different intensities of feedback light, it is shown that, after a certain time of relaxation, chaos can be controlled into periodic state, dual periodic state, triple periodic state and multiple periodic state respectively by 1/8, 1/4, 1/2 and one wavelength periodic phase-shift modulation.

Key words laser technique; He-Ne lasers; period; phase control; chaos

OCIS Codes 140.1340; 140.1540; 060.5060

1 引言

混沌具有对初值条件敏感的特性,其信号具有随机变化和类白噪声谱等特点。激光混沌具有高的频率和宽的频谱,使得其在保密通信^[1-2]和抗干扰测距等应用中受到人们的广泛关注。半导体激光器和光纤激光器在光注入、光反馈和光电反馈等情况下可产生混沌现象。而氦氖激光器本身具有相干性好、结构简单、价格低廉、波长短、频率稳定等特征,作为新型混沌源应用于实际中,具有潜在的应用价值和发展前景。近年来,国内外研究者对氦氖激光器的混沌和混沌同步进行了大量的研究。1983年,Weiss等^[3]在He-Ne激光器动力学特性研究实验中,证实了三种进入混沌的途径。Kuwashima等^[4-6]首先通过带有一个压电陶瓷(PZT)

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-09-29; 网络出版日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(F2010001309)

作者简介: 蔡璐璐(1977—),女,博士,副教授,主要从事光纤高温传感技术、光纤混沌特性研究、智能仪表等方面的研究。E-mail: ysucaill@ysu.edu.cn

的外腔镜作用,实现了波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器混沌输出。2003 年, Uchida 等^[7]实验上实现了在光反馈下氦氖激光器单向耦合产生的混沌同步。2012 年, 张元芳等^[8]提出利用单反馈 He-Ne 激光器产生混沌激光, 得出了波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器在光反馈条件下可通过周期态进入混沌。

由于混沌动力学行为极其复杂, 需要寻求一些方法来控制混沌, 探索其本质特性。激光混沌控制研究备受重视, 光反馈方法^[9]、相位调制方法、周期扰动方法等多种激光混沌控制方法被提出。近年来, 研究者对采用相移调制方法控制激光混沌进行了大量的研究。2005 年, 颜森林等^[10]提出双环掺铒光纤激光器混沌相移控制方法, 最终实现了激光混沌动力学行为的控制; 2006 年, 颜森林^[11]提出了注入半导体激光器混沌相位周期控制方法, 通过外部光注入半导体激光器系统, 采用相位控制器控制混沌到周期态; 2012 年, 吴飞等^[12]提出双环掺铒光纤激光器混沌的耦合反馈相移控制, 利用耦合器将系统的输出量反馈到系统中, 通过对反馈系数和反馈光相移的控制实现激光混沌到周期态的控制等。但是, 很少有对氦氖激光器混沌控制的研究。在上述研究的基础上, 本文根据氦氖激光器在反馈光下的混沌特性^[13], 在反馈通道上加入相位控制器控制反馈光的相移, 通过周期调制反馈光的相移可以有效地将氦氖激光器的混沌状态控制到稳定态和周期态, 并能够产生多种激光动力学现象。

2 理论模型

氦氖激光器混沌反馈相位周期控制系统如图 1 所示。

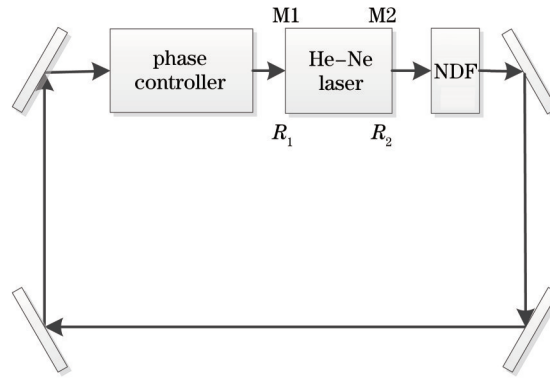


图 1 光反馈注入激光器混沌相位控制系统

Fig.1 Chaotic phase controlling in lasers under optical feedback injection

从激光器输出的光通过中性密度滤波片(NDF)、相位控制器以及四个平面镜耦合进激光器中, 其中 NDF 用来调节反馈光的强度, 相位控制器用来控制反馈光相位。相位控制器可以采用电光相位调制器, 利用电光效应原理, 通过直接控制外部调制电压来控制其输出光场的相移。反馈相位周期控制系统的动力学方程为

$$\frac{dE(T)}{dT} = \mu E(T) - bE(T)^3 + \rho R^{1/2} E(T - T_r) (\cos \theta - \varepsilon \sin \theta), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(T)}{dT} = \mu\alpha - b\beta E(T)^2 + \rho R^{1/2} \frac{E(T - T_r)}{E(T)} (\varepsilon \cos \theta + \sin \theta), \quad (2)$$

式中 $E(T)$ 和 $\phi(T)$ 分别是激光场振幅和相位; $\rho = (1 - R_2) / (\gamma_{\perp} \tau_{in} R_2^{1/2} \sqrt{1 + \varepsilon^2})$, 其中 R_2 为激光器镜面 M2 对应的反馈率, γ_{\perp} 为横向弛豫率, ε 为反馈延迟光相位, $\tau_{in} = 2n_g L / c$ 是光在激光器内腔长为 L 时往返一周的时间, $n_g = c / v_g$ 是群速折射率, c 是真空中光速, v_g 是激光腔内光子的群速度; R 为外腔镜面的反馈率, 直接用来表示反馈系数; T_r 为通过 γ_{\perp} 归一化后的延迟时间; α 和 β 分别为增益相位和饱和相位; μ 和 b 分别为净增益系数和饱和系数; $\theta = \varphi(T - T_r) - \varphi(T) + \Omega$, 其中 Ω 是激光通过相位控制器所产生的相移。

混沌周期相位控制方法是让相位控制器控制输出光场相移, 使其有正弦调制变化, 如相位调制器控制电压在 $1/8$ 个波长的周期上有正弦调制变化, 即 $\Omega(t) = (\pi/4) \sin(2\pi f t)$, 其中 f 是调制控制的频率, 可称这种控制为 $1/8$ 波长周期相移控制。同样有 $1/4$ 波长周期相移控制即 $\Omega(t) = (\pi/2) \sin(2\pi f t)$ 、半波长周期相位相移控制即 $\Omega(t) = \pi \sin(2\pi f t)$ 以及波长周期相移控制即 $\Omega(t) = 2\pi \sin(2\pi f t)$ 。

3 数值模拟

通过改变相位控制器的电压,分别采用1/8波长周期相移控制、1/4波长周期相位相移控制、半波长周期相移控制以及波长周期相移控制对光反馈下氦氖激光器的混沌控制进行数值模拟。用Matlab利用四阶龙格-库塔法对动力学方程(1),(2)式进行数值求解,其中模拟参量为 $\alpha=1.4$, $\beta=3.8$, $b=1$, $\varepsilon=2.17$, $\mu=0.08$, $T_r=0.17$, $R_1=1$, $R_2=0.02$, $\gamma_{\perp}=10^{\circ}$, $n_g=1.0000536667$ 。

采用1/8波长周期相移控制方法,即相移的变化满足公式 $\Omega(t)=(\pi/4)\sin(2\pi ft)$ 。图2表示系统在 $R=0.26$ 时混沌状态所对应的时序图和相图。图3和图4表示系统处于混沌状态($R=0.26$),调制频率为9.62 GHz和2.01 GHz时,系统被分别控制到单周期态和双周期态的时序图及相图(图中所给出的插图是相应的时序放大图,插入图与主图有相同的坐标轴)。

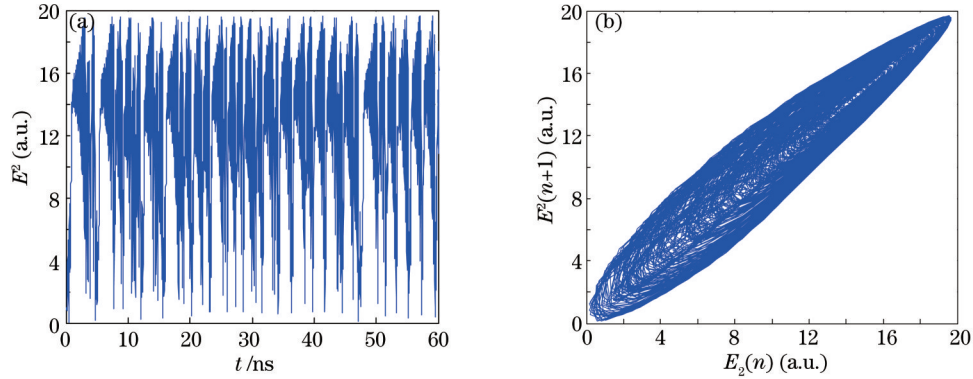


图2 系统未被相位控制的混沌时序图和相图($R=0.26$)

Fig.2 Chaotic sequence diagrams and phase diagram of the system without phase control ($R=0.26$)

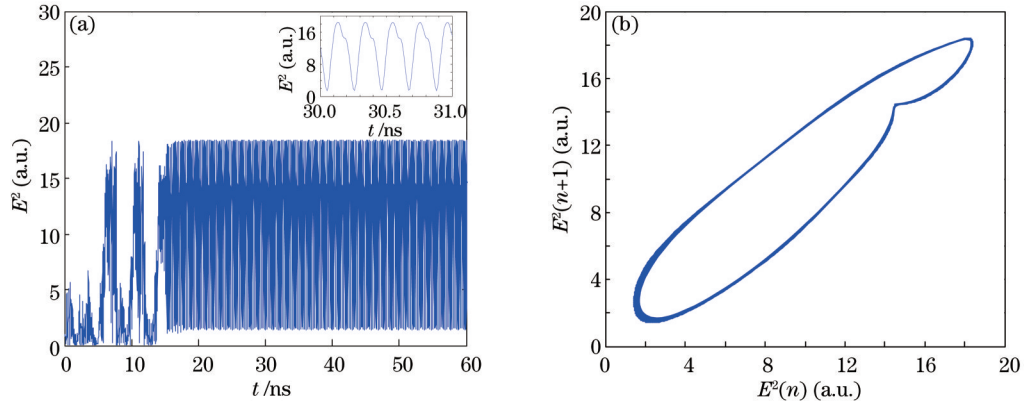


图3 1/8波长相位周期控制混沌到单周期态($R=0.26$)

Fig.3 Chaos controlled to periodic state by 1/8 wavelength phase cycle control ($R=0.26$)

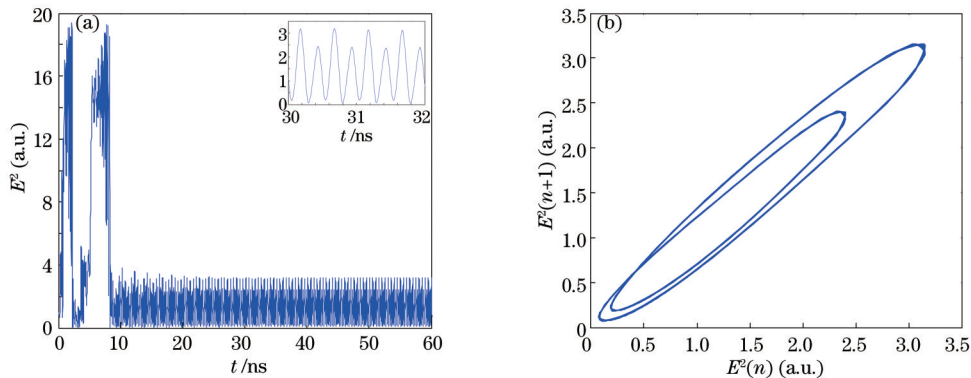


图4 1/8波长相位周期控制混沌到双周期态($R=0.26$)

Fig.4 Chaos controlled to dual-periodic state by 1/8 wavelength phase cycle control ($R=0.26$)

采用1/4波长周期相移控制的方法,即相移的变化满足公式 $\Omega(t) = (\pi/2)\sin(2\pi ft)$ 。图5表示系统在 $R=0.49$ 时混沌状态所对应的时序图和相图。图6~8给出了系统处于混沌状态 ($R=0.49$), 调制频率处于 7.089 GHz、4.042 GHz 及 8.888 GHz 时, 系统被分别控制到单周期态、双周期态及三周期态的时序图及相图。

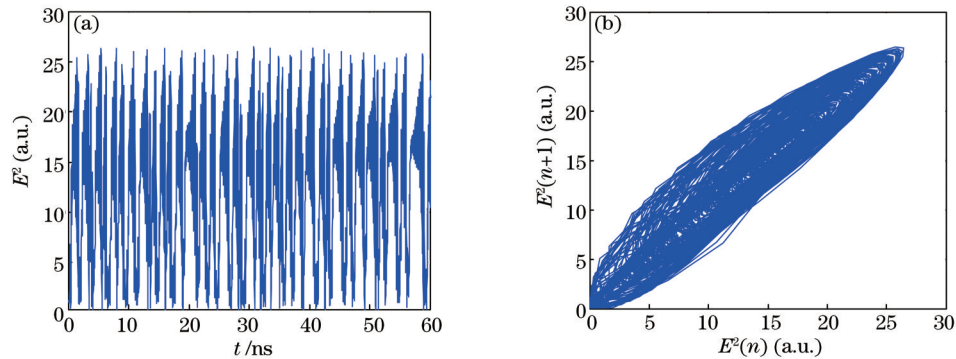


图5 系统未被相位控制的混沌时序图和相图 ($R=0.49$)

Fig.5 Chaotic sequence diagrams and phase diagram of the system without phase control ($R=0.49$)

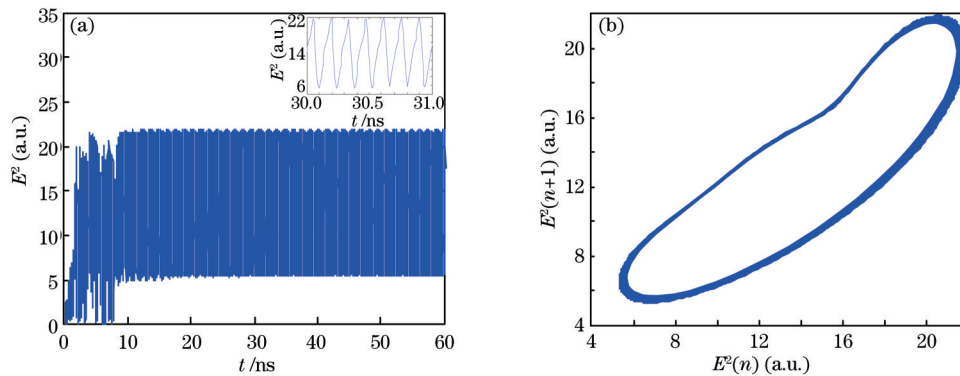


图6 1/4波长相位周期控制混沌到单周期态 ($R=0.49$)

Fig.6 Chaos controlled to periodic state by 1/4 wavelength phase cycle control ($R=0.49$)

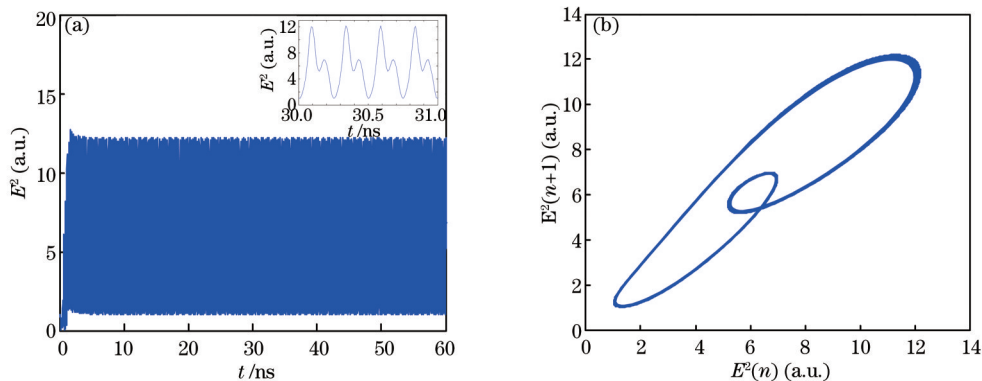
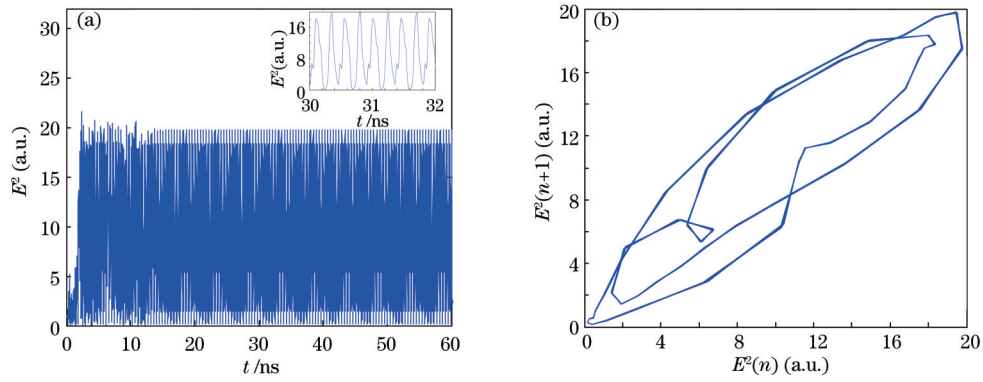
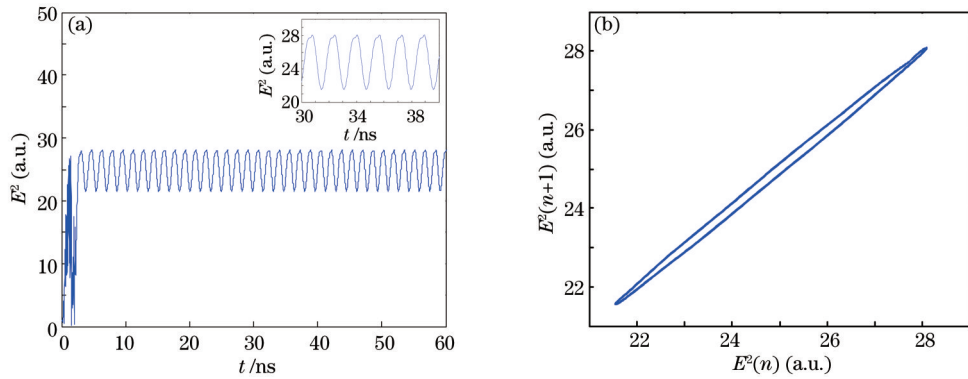
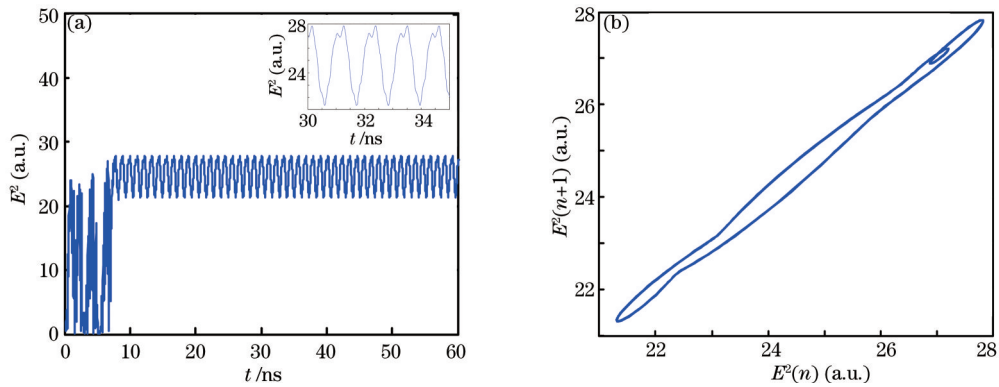
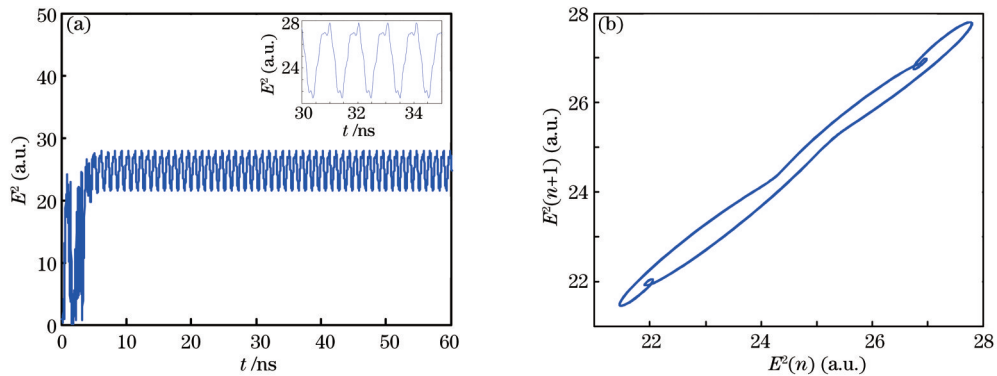


图7 1/4波长相位周期控制混沌到双周期态 ($R=0.49$)

Fig.7 Chaos controlled to dual-periodic state by 1/4 wavelength phase cycle control ($R=0.49$)

采用半波长周期相移控制,即相移的变化满足公式 $\Omega(t) = \pi \sin(2\pi ft)$ 。图9~图11给出系统处于混沌状态 ($R=0.49$), 调制频率为 0.614 GHz、0.894 GHz 及 0.967 GHz 时, 混沌系统被分别控制到单周期态、双周期态及三周期态的时序图及相图。

采用波长周期相移控制,既相移的变化满足公式 $\Omega(t) = 2\pi \sin(2\pi ft)$ 。图12和图13分别表示系统处于混沌状态 ($R=0.26$) 调制频率为 1.92 GHz 时, 以及混沌状态 ($R=0.49$) 调制频率为 1.56 GHz 时, 系统被控制到三周期态所对应的时序图及相图。

图8 1/4波长相位周期控制混沌到三周期态 ($R=0.49$)Fig.8 Chaos controlled to triple-periodic state by quarter-wavelength phase cycle control ($R=0.49$)图9 半波长相位周期控制混沌到单周期态 ($R=0.49$)Fig.9 Chaos controlled to periodic state by half-wavelength phase cycle control ($R=0.49$)图10 半波长相位周期控制混沌到双周期态 ($R=0.49$)Fig.10 Chaos controlled to dual-periodic state by half-wavelength phase cycle control ($R=0.49$)图11 半波长相位周期控制混沌到三周期态 ($R=0.49$)Fig.11 Chaos controlled to triple-periodic state by half-wavelength phase cycle control ($R=0.49$)

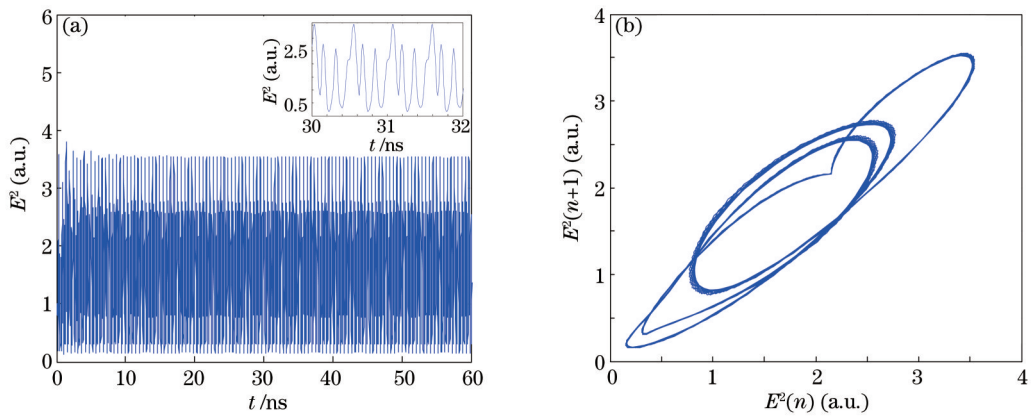
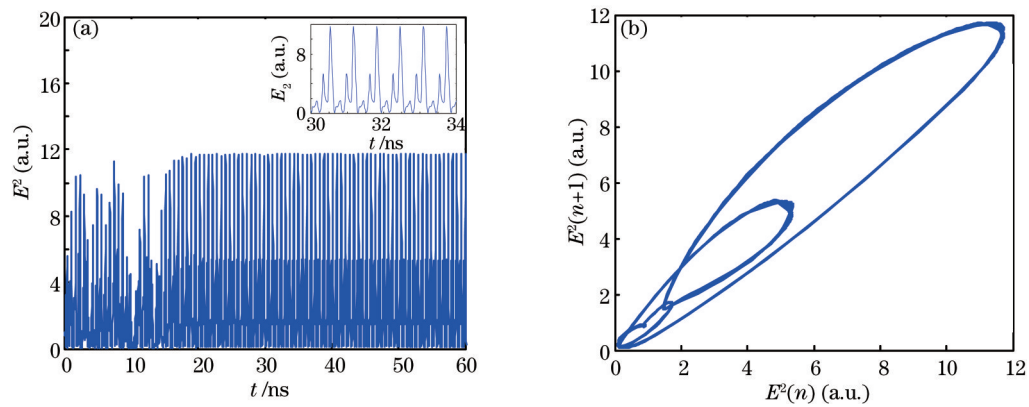
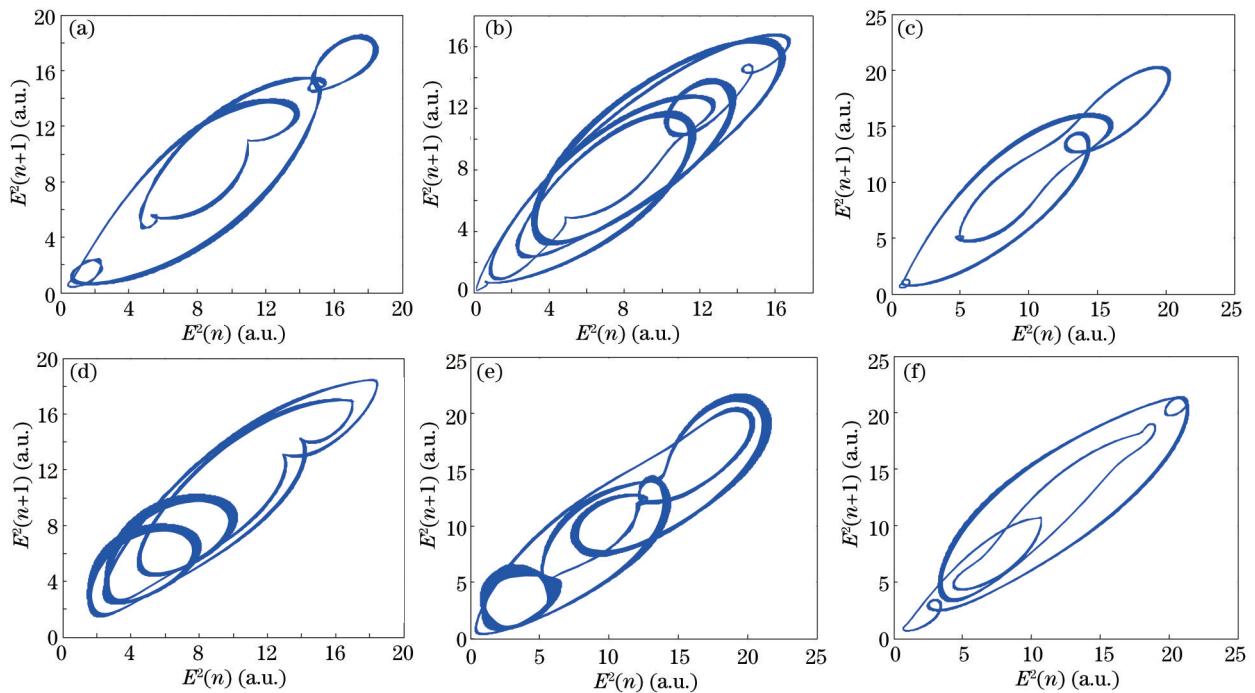
图 12 波长相位周期控制混沌到三周期态 ($R=0.26$)Fig.12 Chaos controlled to triple-periodic state by a wavelength phase cycle control ($R=0.26$)图 13 波长相位周期控制混沌到三周期态 ($R=0.49$)Fig.13 Chaos controlled to triple-periodic state by a wavelength phase cycle control ($R=0.49$)

图 14 混沌被控制到多周期态

Fig.14 Chaos controlled to multi-periodic state

由以上时序图可见,系统无论最初处于何种混沌状态,在通过相位周期控制到某一周期态的过程中,都存在着一一定的弛豫时间,例如,图3的弛豫时间约为17 ns,图4约为8 ns,图6约为9 ns,图7约为3 ns,图8约为15 ns,图9约为3 ns,图10约为8 ns,图11约为7 ns,图12约为8 ns,图13约为17 ns,但最长都不超过20 ns。且氦氖激光器输出波的振荡频率非常接近其相应的调制频率。激光混沌系统还可以被控制到多周期态,图14(a)~(f)所示为混沌系统被控制到多周期态的相图。

4 结 论

在反馈光下氦氖激光器产生混沌的基础上,在反馈通道上加入相位控制器,建立了相位调制激光的动力学方程,通过选用不同的反馈系数并控制光相移进行周期变化。数值模拟结果表明,反馈光下氦氖激光器产生的混沌,通过相位周期控制可以调制到单周期态、双周期态、三周期态以及多周期态。实现了对氦氖激光器混沌的控制,对研究氦氖激光混沌特性及其应用是有益的。

参 考 文 献

- 1 Hu Hanping, Su Wei, Yu Zhiliang, *et al.* Chaos generation of variable parameters and secure communication based on optoelectronic feedback oscillation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506006.
胡汉平, 苏 威, 于志良, 等. 基于动态参数的光电延迟振荡系统及其保密通信研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506006.
- 2 Liu Yujin, Zhang Shenghai, Yang Hua, *et al.* Application in secret communication of chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905004.
刘玉金, 张胜海, 杨 华, 等. 光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步在保密通信中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905004.
- 3 F Kuwashima, I Kitazima, H Iwasawa. The chaotic oscillation of the single-mode He-Ne (6328Å) class A laser [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1998, 37(2): L325-L328.
- 4 F Kuwashima, T Ichikawa, I Kitazima, *et al.* Chaotic oscillation in a single-mode class a He-Ne laser (6328Å) II [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(1): 6321-6326.
- 5 F Kuwashima, H Iwasawa. Chaotic oscillation in single-mode class a laser with long optical delayed feedback [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46(4): 1524-1527.
- 6 C O Weiss. Routes to chaotic emission in a CW He-Ne laser [J]. *Phys Rev A*, 1983, 28(2): 892-895.
- 7 A Uchida, K Higa, T Shiba, *et al.* Generalized synchronization of chaos in He-Ne lasers [J]. *Phys Rev E*, 2003, 68(1): 0162151.
- 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 Yan Senlin. Frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers using optical feedback [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0302003.
颜森林. 空间耦合半导体激光器高维混沌系统的光反馈增频与控制[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302003.
- 10 Yan Senlin, He Longqing, Wu Haiyong, *et al.* Studies on method of phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(5): 642-646.
颜森林, 何龙庆, 吴海勇, 等. 双环掺铒光纤激光器混沌相移控制方法研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(5): 642-646.
- 11 Yan Senling. Chaotic controlling via phase periodicity in optical injection semiconductor lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5109-5114.
颜森林. 注入半导体激光器混沌相位周期控制方法研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5109-5114.
- 12 Wu Fei, Jia Li, Zhang Yuebin, *et al.* Dual-ring erbium-doped fiber laser chaos controlled by coupling feedback phase-shift [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 895-900.
吴 飞, 贾 莉, 张跃宾, 等. 双环掺铒光纤激光器混沌的耦合反馈相移控制[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 895-900.
- 13 Zhang Yuanfang. Theoretical and Experimental Study of Chaos Generation with Optical Feedback in the He-Ne Laser [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. 5-24.
张元芳. 反馈下氦氖激光器混沌激光产生的理论及实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. 5-24.