

单反馈 He-Ne 激光器混沌激光产生的理论及 实验研究

张元芳 杨玲珍

(太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 基于外光反馈机制,利用 He-Ne 激光器(中心波长为 632.8 nm)进行了混沌激光产生的理论及实验研究。在固定抽运电流和外腔长度的情况下,研究不同反馈系数对 He-Ne 激光器输出特性的影响。理论及实验结果表明:He-Ne 激光器在单反馈下随着反馈系数的增大可通过周期态进入混沌。

关键词 混沌激光;光反馈;He-Ne 激光器

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102003

Theoretical and Experimental Study of Chaos Generation with Single Optical Feedback in the He-Ne Laser

Zhang Yuanfang Yang Lingzhen

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract Chaos generation of the He-Ne laser, whose central wavelength is 632.8 nm, is demonstrated theoretically and experimentally based on the external optical feedback mechanism. The impact of different feedback coefficients on the dynamics of the He-Ne laser is studied under the condition of fixed pump current and of fixed external cavity length. The numerical and experimental results show that the He-Ne laser can enter chaos by the route of periodic state with the feedback coefficient increasing.

Key words chaotic laser; optical feedback; He-Ne lasers

OCIS codes 140.1540; 140.3460; 190.3100; 230.1150

1 引 言

由于混沌信号具有天然的保密性、抗干扰性和不可预测性等特点,使得混沌在保密通信和抗干扰测距等应用中具有很大潜力。半导体激光器和光纤激光器在光注入^[1,2]、光反馈^[3~5]或光电反馈^[6,7]等情况下可产生混沌现象。对于工作波长为 3390 nm 的 He-Ne 激光器,通过改变其工作条件即可实现混沌输出,如 Weiss 等^[8,9]研究了 He-Ne 激光器(中心波长 3390 nm)在不同激光频率下,可通过倍周期、“Ruelle-Takens”或间歇路径进入混沌;Halas 等^[10,11]也证实了该类激光器可产生混沌振荡。研

究结果表明:He-Ne 激光器(中心波长 3390 nm)的横、纵向弛豫率和腔衰减率在同一量级,因而激光器状态就由带有偏振、反转粒子数和电场的 3 个方程决定,所以激光器容易产生混沌。但是波长为 632.8 nm 的单模 He-Ne 激光器,其横、纵向弛豫率比腔衰减率大,激光器状态仅由单个电场方程决定,通常处于稳定状态,而混沌本质是一种不稳定现象,所以该类激光器不易产生混沌。然而 Kuwashima 等^[12]分析得出激光器在单反馈下自由度可变为无限维,通过调节外反馈镜倾斜度,在长腔长等条件下,可实现波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器混沌输

收稿日期: 2011-07-05; **收到修改稿日期**: 2011-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61107033)资助课题。

作者简介: 张元芳(1988—),女,硕士研究生,主要从事氦氖激光器的非线性动力学特性方面的研究。

E-mail: fazhanziji@163.com

导师简介: 杨玲珍(1973—),女,教授,硕士生导师,主要从事光纤激光器的非线性动力学特性方面的研究。

E-mail: office-science@tyut.edu.cn

出^[13~15]。2003年,Uchida等^[16]实验上实现了在光反馈下 He-Ne 激光器单向耦合产生的混沌同步。本文在 Kuwashima 等建立的理论模型基础上,理论分析了波长为 632.8 nm 的单模 He-Ne 激光器在单反馈下反馈系数对激光器输出的时序图、频谱图、相图和自相关图的影响,并进行了相应的实验研究。理论和实验结果表明:波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器在外光反馈条件下可通过周期态进入混沌,数值模拟与实验结果一致。

2 理论分析

对于工作波长为 632.8 nm 的单模驻波 He-Ne 激光器,其在单反馈下的理论模型如图 1 所示。满足的速率方程为^[12]

$$\frac{dE(T)}{dT} = \mu E(T) - bE(T)^3 + \eta E(T - T_r)(\cos \theta - \epsilon \sin \theta), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(T)}{dT} = \mu\alpha - b\beta E(T)^2 + \eta \frac{E(T - T_r)}{E(T)}(\epsilon \cos \theta + \sin \theta). \quad (2)$$

方程中的各参数为

$$T = \gamma_{\perp} t, \quad T_r = \gamma_{\perp} \tau_r, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{\gamma_{\perp}} \left[-\kappa + \frac{g^2 D_0}{\gamma_{\perp} (1 + \delta^2)} \right], \quad (4)$$

$$b = \frac{4g^4 D_0}{\gamma_{\perp}^3 \gamma_{\parallel} (1 + \delta^2)^2}, \quad (5)$$

$$\alpha = \Delta - \left[\frac{g^2 D_0}{\kappa \gamma_{\perp} (1 + \delta^2)} (\Delta + \delta) \right] / \left[\frac{g^2 D_0}{\kappa \gamma_{\perp} (1 + \delta^2)} - 1 \right], \quad (6)$$

$$\beta = -\delta, \quad (7)$$

$$\theta = \phi(T - T_r) - \phi(T), \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{\omega_c - \omega_L}{\kappa}, \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega_L}{\gamma_{\perp}}, \quad (10)$$

$$\eta = \frac{1}{\gamma_{\perp} \tau_{in} R_2} \frac{1 - R_2}{\sqrt{1 + \epsilon^2}} (R_2 R)^{1/2}, \quad (11)$$

式中 R 为外反馈系数, τ_r 为延迟时间, γ_{\perp} 为横向弛豫率(量级约为 10^8), γ_{\parallel} 为纵向弛豫率, κ 为腔内光子弛豫率, T_r 为归一化后的延迟时间, $E(T)$ 为电场振幅, $\phi(T)$ 为电场相位。 μ 和 b 分别为增益系数和饱和系数, α 和 β 分别为增益相位和饱和相位, ϵ 为反馈延迟光相位, D_0 为不饱和反转粒子数, R_1 和 R_2 分别为激光器前后端面的反馈系数, τ_{in} 为光在内腔往返

一次运行的时间, ω_c 为腔频率, ω_L 为激光频率, ω_0 为原子中心频率。

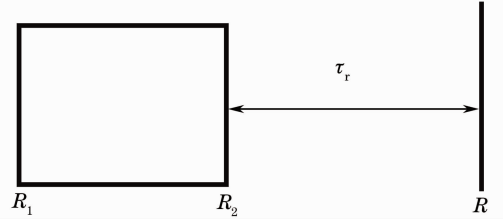


图 1 理论模型

Fig. 1 Theoretical model

在不同反馈系数下, He-Ne 激光器输出不同状态,图 2 所示为单反馈下 He-Ne 激光器进入混沌振荡过程的数值模拟。其中,模拟参量为 $\mu = 0.08$, $\alpha = 1.4$, $\beta = 3.8$, $b = 1$, $\epsilon = 2.17$, $T_r = 0.17$ (外腔长设为 25 cm), $R_2 = 0.02$ 。图中分别是反馈系数 R 在 0.15, 0.47, 0.49 和 0.58 时对应的时序图、频谱图和相图。相图中 $P(n)$ 是指对应时序图中激光器输出的连续峰值幅度,如采集数据点数为 n ,横坐标表示第 n 个点的输出幅值,纵坐标表示第 $n+1$ 个点的输出幅值,即整个相图表示的是相邻两点随时间(迭代次数)的分离程度。反馈系数 R 为 0.15 时,图 2(a)中时序的波形起伏基本一致,频谱图图 2(b)中谐振峰之间的间隔相等,相图图 2(c)为一个有限环,此时激光器输出状态为一周期振荡;反馈系数 R 为 0.47 时,时序图图 2(d)中波形开始有规律地变动,频谱图图 2(e)中也出现多个间隔相等的谐振峰,相图图 2(f)为一个极限环,可判定激光器在该条件下处于多周期振荡状态;反馈系数 R 为 0.49 和 0.58 时激光器输出状态为混沌振荡,如图 2(g)~(l)所示。可见随着反馈系数的增大,时间序列从规律的振荡状态逐渐进入波形随机起伏的混乱状态,并且输出光的峰峰值也在增大;频谱中谐振峰的凸起越来越小,频谱逐渐平缓;相图中区域的面积也在逐渐增大。以上数值结果表明,在单反馈下, He-Ne 激光器随着反馈系数的增大经过周期态最后进入混沌振荡。

3 实验装置及结果

3.1 实验装置

光反馈下 He-Ne 激光器产生混沌的实验装置如图 3 所示。实验中,在抽运电流为 6 mA 时 He-Ne 激光器的输出功率为 2 mW,发出的光经过一个无偏分束镜(BS,其透射率与反射率比为 80:20)分成两束光。其中,一束光由反射镜(反馈系数为

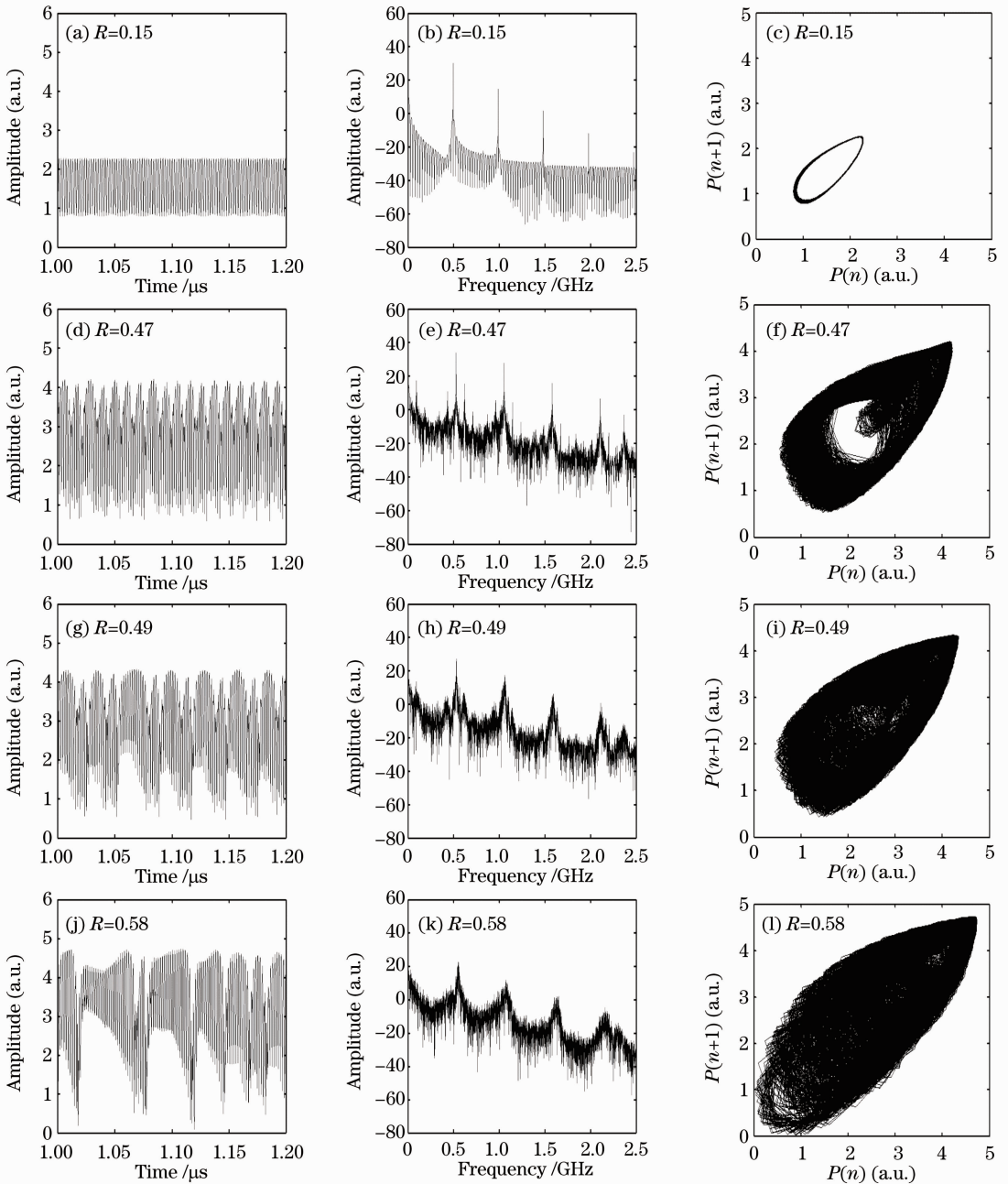


图2 反馈系数 R 为 0.15, 0.47, 0.49 和 0.58 时对应的 (a), (d), (g), (j) 时序图, (b), (e), (h), (k) 频谱图和 (c), (f), (i), (l) 相图

Fig. 2 (a), (d), (g), (j) time series, (b), (e), (h), (k) spectra and (c), (f), (i), (l) phase portraits respectively with feedback coefficient R of 0.15, 0.47, 0.49 and 0.58

95%) 反射并耦合进激光器中, 实现光反馈; 另一束光作为探测光, 由带宽为 1.2 GHz 的光电探测器 (PD) 和实时示波器 (OSC) 进行探测, 示波器的测量带宽为 500 MHz。中性密度滤波片 (NDF) 用来调节反馈光强度, 因反射系数与反射光强度成线性关系, 所以反馈系数 R 的表达式为 $R = 0.95I_1^2/I_0^2$ (其中, 0.95 为反射镜反馈系数, I_1 为中性密度滤波片右端处测得的功率, I_0 为 He-Ne 激光器的直接输出功率, 在本实验中为 2 mW)。

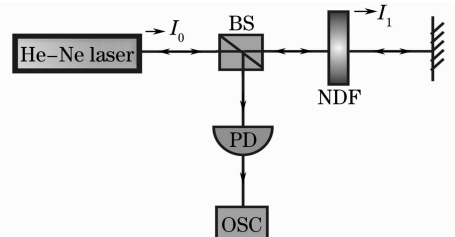


图3 混沌产生装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for chaos generation

3.2 实验结果

图 4 所示为在抽运电流为 6 mA, 外腔长为 25 cm, 反馈系数 R 分别为 0.152, 0.1923, 0.2874 和 0.4013 时对应的时序图, 自相关图和相图。图 4(a) 中的时间序列幅值基本不变, 图 4(c) 为一个极限环, 此时激光器处于周期振荡状态; 随着反馈系数增大, 激光器输出的时间序列逐渐混乱, 如反馈系数

$R=0.1923$ 和 0.2874 时激光器输出情况; 最后在图 4(j) 中时间序列随机波动, 图 4(k) 中产生了一个倒丁字形结构的自相关曲线, 图 4(l) 中产生了奇异吸引子, 可见激光器已产生混沌振荡。实验表明, 在单反馈下, He-Ne 激光器随着反馈系数的增大经过周期态最后进入混沌振荡状态。

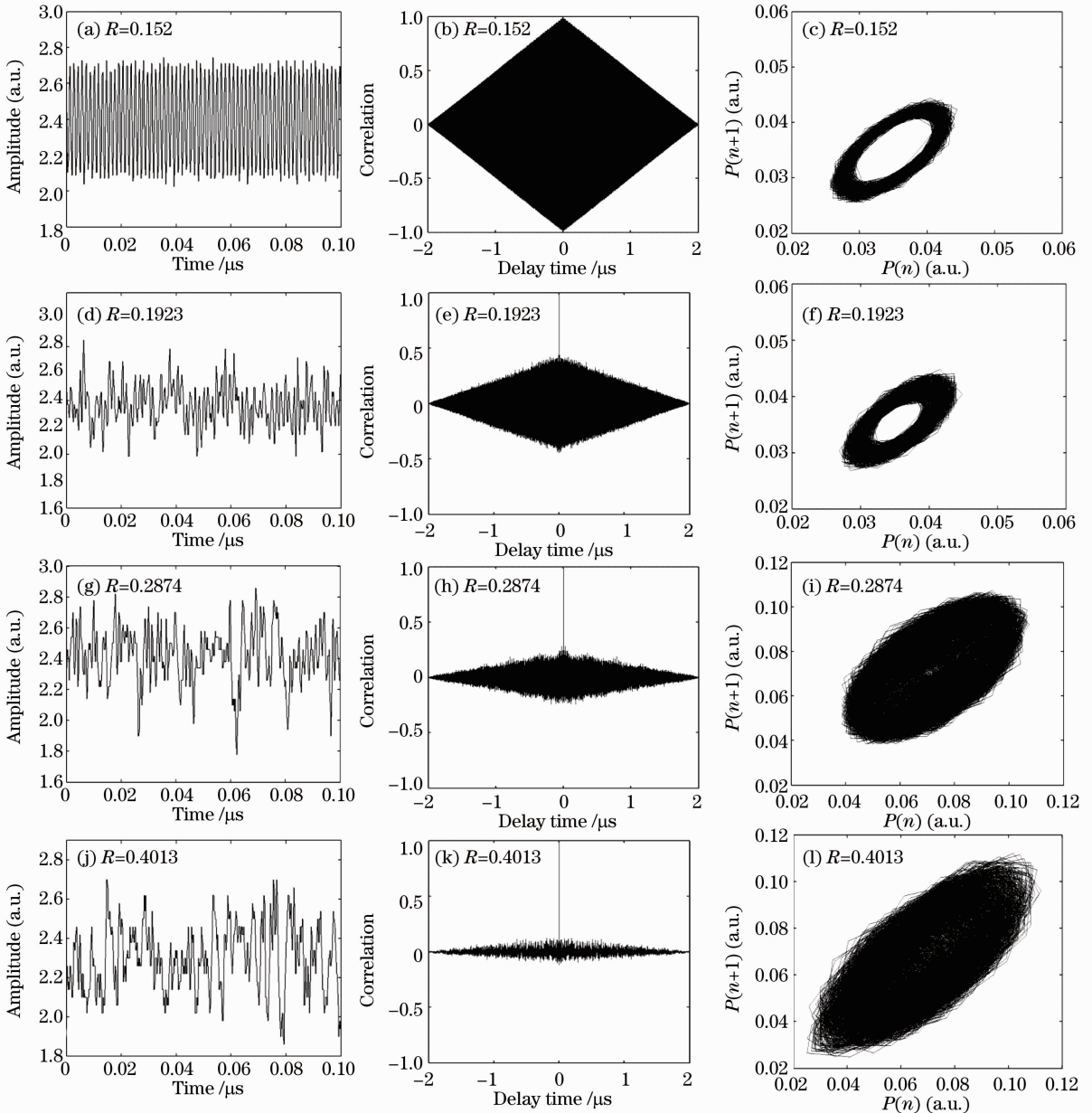


图 4 反馈系数 R 为 0.152, 0.1923, 0.2874 和 0.4013 时对应的 (a), (d), (g), (j) 时序图, (b), (e), (h), (k) 自相关图和 (c), (f), (i), (l) 相图

Fig. 4 (a), (d), (g), (j) time series; (b), (e), (h), (k) auto-correlation traces; and (c), (f), (i), (l) phase portraits respectively with feedback coefficient R of 0.152, 0.1923, 0.2874 and 0.4013

4 结 论

从理论和实验上研究了外光反馈使 He-Ne 激

光器产生混沌的现象, 得出其输出状态与反馈系数有关, 即随着反馈系数的增大, 激光器经过周期态进

入混沌振荡,理论模拟和实验结果基本一致。He-Ne 激光器具有自身的特点,如相干性好、价格便宜、波长短等,其产生的混沌带宽在兆赫兹量级,在混沌测距和混沌传感等方面有望得到更好的应用。

参 考 文 献

- 1 Kong Huijun, Wu Zhengmao, Wu Jiagui *et al.*. Experimental investigation on the nonlinear dynamical characteristics of distributed feedback semiconductor lasers subjected to external optical injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1490~1495
孔慧君, 吴正茂, 吴加贵 等. 外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学特性[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1490~1495
- 2 T. B. Simpson, J. M. Liu, A. Gavrielides *et al.*. Period-doubling route to chaos in a semiconductor laser subject to optical injection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(26): 3539~3541
- 3 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, 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
- 4 Kong Lingqin, Wang Anbang, Wang Haihong *et al.*. Dynamics of semiconductor laser with optical feedback: evolution from low-frequency fluctuations to chaos [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2008, **57**(4): 2266~2272
孔令琴, 王安帮, 王海红 等. 光反馈半导体激光器产生低频起伏与高维混沌信号及其演化过程[J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2266~2272
- 5 Yang Lingzhen, Qiao Zhanduo, Wu Yunqiao *et al.*. Study of chaotic bandwidth in erbium-doped ring fiber laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2010, **59**(6): 3965~3972
杨玲珍, 乔占朵, 邬云翘 等. 掺铒光纤环形激光器混沌带宽特性数值研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(6): 3965~3972
- 6 Wang Yanbin, Zhang Shenghai, Shao Ming *et al.*. Chaos and chaotic synchronization in current-modulated semiconductor lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2167~2171
王彦斌, 张胜海, 邵 铭 等. 电流调制半导体激光器的混沌及其同步[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2167~2171
- 7 F. Lin, J. Liu. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4): 562~568
- 8 C. O. Weiss, A. Godone, A. Olafsson. Routes to chaotic emission in a cw He-Ne laser [J]. *Phys. Rev. A*, 1983, **28**(2): 892~895
- 9 C. O. Weiss, H. King. Oscillation period doubling chaos in a laser [J]. *Opt. Commun.*, 1982, **44**(1): 59~61
- 10 N. J. Halas, S.-N. Liu, N. B. Abraham. Route to mode locking in a three-mode He-Ne 3.39- μm laser including chaos in the secondary beat frequency [J]. *Phys. Rev. A*, 1983, **28**(5): 2915~2920
- 11 R. S. Gioggia, N. B. Abraham. Anomalous mode pulling, instabilities, and chaos in a single-mode, standing-wave 3.39- μm He-Ne laser [J]. *Phys. Rev. A*, 1984, **29**(3): 1304~1309
- 12 F. Kuwashima, I. Kitazima, H. Iwasawa. Theory of chaotic dynamics on class A laser with optical delayed feedback [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(1): 601~608
- 13 F. Kuwashima, I. Kitazima, H. Iwasawa. The chaotic oscillation of the single-mode He-Ne(6328 \AA) class A laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(2): L325~L328
- 14 F. Kuwashima, T. Ichikawa, I. Kitazima *et al.*. Chaotic oscillation in a single-mode class A He-Ne laser(6328 \AA) II [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(1): 6321~6326
- 15 F. Kuwashima, H. Iwasawa. Chaotic oscillations in single-mode class A laser with long optical delayed feedback [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(4): 1526~1527
- 16 A. Uchida, K. Higa, T. Shioe *et al.*. Generalized synchronization of chaos in He-Ne lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **68**(1): 0162151

栏目编辑: 宋梅梅