

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^{*}

孔令琴 王安帮 王海红 王云才[†]

(太原理工大学物理系, 太原 030024)

(2007 年 7 月 6 日收到; 2007 年 9 月 18 日收到修改稿)

利用光反馈半导体激光器产生了低频起伏及关联维数为 12.2 的高维混沌状态. 实验研究了低频起伏到高维混沌的演变过程. 实验表明, 当偏置电流 $I_b < 1.03I_{th}$ 时, 随着反馈强度的降低, 低频起伏的峰峰值先增大后减小, 平均周期一直减小, 直至进入稳定状态, 但不能转化为混沌. 当偏置电流 $I_b > 1.03I_{th}$ 时, 随着反馈强度的降低, 低频起伏的峰峰值一直增大, 平均周期一直减小, 直至进入无周期的高维混沌状态. 确立了光反馈半导体激光器在反馈强度及偏置电流改变下将会经历稳定激发、低频起伏和混沌三个区域. 数值模拟分析了偏置电流和反馈强度对低频起伏及混沌载波的制约关系. 模拟结果与实验结果相符.

关键词: 低频起伏, 混沌, 半导体激光器, 反馈

PACC: 4265T, 4255, 4260

1. 引言

光反馈半导体激光器会产生各种非线性动力学现象, 且具有广阔的应用前景. 近年来已得到人们的广泛关注^[1-7]. 例如光反馈可以改善半导体激光器的相位噪声; 光反馈引起的混沌激光输出可用于混沌保密通信及混沌激光测距等多个领域, 而且混沌保密通信系统的抗破译能力及混沌激光测距的分辨率都与系统产生的混沌状态密切相关, 所以对混沌性能的研究是至关重要的. 而低频起伏作为一种特殊非线性现象与混沌均处在第四个反馈阶段^[1], 两者之间存在着一定的联系. 目前对低频起伏已有较多的研究, 研究内容多集中在低频起伏的产生以及反馈强度和偏置电流对低频起伏平均周期的影响等方面^[8-10]. Sano^[11]认为, 低频起伏是由于外腔激光器的复合腔模和与之对应的反模相互碰撞导致的激光器系统不稳定所引起的. Hohl 等^[10]通过数值及实验分析了反馈强度对低频起伏平均周期的影响和自发辐射噪声对低频起伏的影响. Heil 等^[9]用单模分布反馈式半导体激光器产生了低频起伏输出, 分

析了偏置电流对低频起伏周期的影响. 所有这些研究均很少提及低频起伏与混沌载波之间的相互关系. 文献 [12] 通过数值分析得到激光器注入电流高于阈值时, 双外腔反馈能引起激光器出现低频起伏. 文献 [13] 研究了滑模变结构控制方法对光反馈半导体激光器的混沌控制, 获得了稳定的激光输出. 然而, 这些研究均为数值模拟, 并没有从实验上对其进行研究. 本文利用光反馈半导体激光器在实验产生低频起伏及高维混沌载波的同时, 研究了反馈强度和偏置电流对低频起伏到高维混沌演变的制约条件, 分析了低频起伏与混沌载波之间的关系. 同时, 采用半导体激光器的速率方程, 数值模拟了偏置电流和反馈强度对低频起伏及混沌载波的制约关系. 模拟结果与实验符合很好. 这对于混沌保密通信^[14]、混沌激光测距^[15]以及消除相干层析图像中的散斑噪声^[16]等方面的应用具有较高的参考价值.

2. 实验过程及结果

2.1. 实验装置

光反馈半导体激光器产生低频起伏、高维混沌

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60577019, 60777041)资助的课题.

[†] E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

的实验装置如图 1 所示.

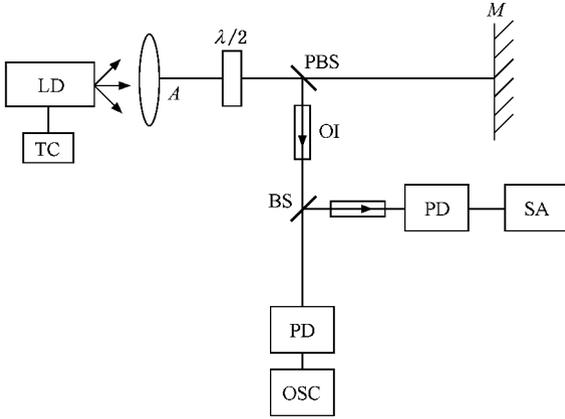


图 1 实验装置示意图

实验中所用的半导体激光器 LD 为 Sharp 公司生产的 LT024MD0 型半导体激光器,其中心波长为 778 nm,量子效率为 $\eta = 0.68$ mW/mA,阈值电流 $I_{th} = 56$ mA. LD 的输出光经透镜准直后,经过二分之一波片 $\lambda/2$,被偏振分束器 PBS 分成两束,其分束比可以通过调节半波片和偏振分束器的相对角度而加以改变.一束光由反射镜 M 反射并耦合进激光器,实现光反馈.另一束光作为输出光,其波形由 Newport 公司生产的带宽为 1.5 GHz 的光电探测器 PD 和 Tek 公司生产的型号为 TDS3052 的实时示波器 OSC 探测,其中实时示波器 OSC 的采样速率为 5×10^9 /s,测量带宽为 500 MHz.同时用 Agilent 公司生产的带宽为 26.5 GHz 的 E4407B 型频谱仪 SA 监测. LD 的工作温度通过温度控制器固定在 25 °C,光隔离器 OI 用来防止探测光返回激光器.

图 1 所示的实验装置中,耦合进 LD 的反馈光强度正比于图中 A 点的反馈光强度,因此实验中的反馈光强度可用 A 点的反馈光强度来表示.考虑到偏振态及器件损耗,A 点处反馈强度 k 可近似表示为

$$k = 10 \lg \{ R [(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \sin^2 2\alpha] \}, \quad (1)$$

其中 R 为反射镜 M 的反射率, η_1 为 PBS 的损耗, η_2 为 $\lambda/2$ 波片的损耗, α 为激光器偏振方向与 $\lambda/2$ 波片的光轴之间的夹角.在本文的实验条件下 $R = 93\%$, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_2 = 8\%$.

2.2. 实验结果

实验发现,当偏置电流接近于阈值电流,反馈强

度在 $-12.50 \sim -1.80$ dB 的范围内,激光器的输出能够出现低频起伏状态.图 2(a) 为激光器外腔长为 34 cm,反馈强度为 -4.58 dB,偏置电流 $I_b = 1.02 I_{th}$ 时低频起伏的时间序列.从图 2(a) 可以看出,激光器输出功率随时间突然下降,而后逐渐恢复,然后重复上述过程.图 2(b) 是与图 2(a) 对应的激光信号功率频谱图,箭头所指处为低频起伏的平均频率(低频起伏平均周期所对应的频率).从图 2(b) 可以看出,谱峰间隔为 442 MHz,而外腔长的谐振频率为 442 MHz,腔长的大小决定了低频起伏的谐振频率,即低频起伏功率谱的谐振峰间隔与外腔的谐振频率相等.

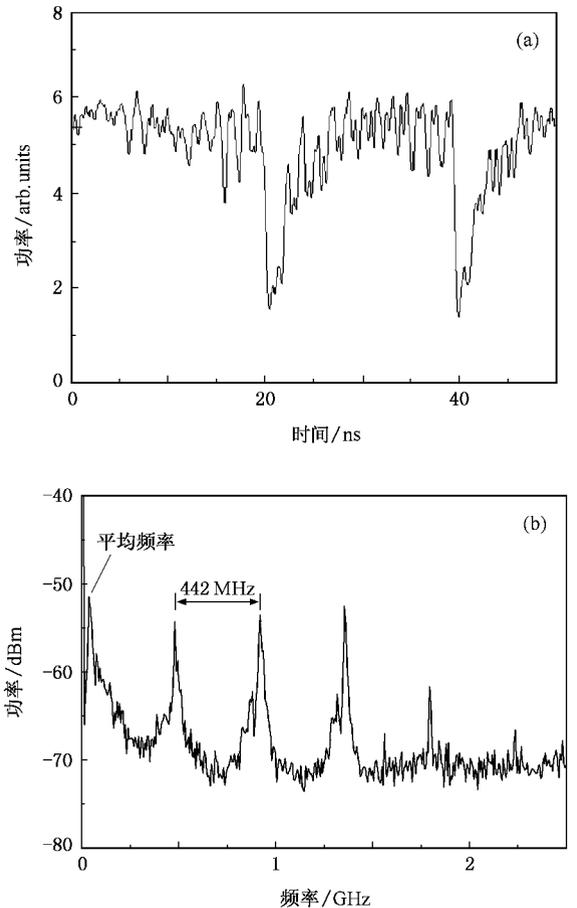


图 2 当反馈强度 $k = -4.75$ dB, $I_b = 1.02 I_{th}$ 时,LD 输出的低频起伏 (a) 时间序列 (b) 频谱

我们同时实验研究了偏置电流和反馈强度对低频起伏到混沌过程的影响.图 3 是偏置电流 $I_b = 1.02 I_{th}$,反馈强度分别为 -3.50 , -5.75 , -9.50 dB 时低频起伏的时间序列.从图 3 可以看出,在 200 ns 的时间序列内,当反馈强度为 -3.50 dB 时,低频起

伏周期数约为 3 ;反馈强度分别为 -5.75 和 -9.50 dB 时 ,低频起伏的周期数分别约为 6 和 9. 实验发现 随反馈强度的减小 ,低频起伏的周期数增加 (平均周期减小) ,直至进入稳定输出状态 ,但并不能进入混沌状态. 从图 3 还可看出 ,在不同反馈强度下低频起伏的幅度也不同. 从反馈强度分别为 -3.50 , -5.75 , -9.50 dB 时所对应的低频起伏的峰峰值可明显看出 ,低频起伏的峰峰值随反馈强度的减小先增大后减小. 结果表明 ,当偏置电流满足 $I_b < 1.03I_{th}$ 时 ,随着反馈强度逐渐减小 ,低频起伏的幅值先增大后减小 ,而周期一直减小 ,且激光器的输出不能进入混沌状态.

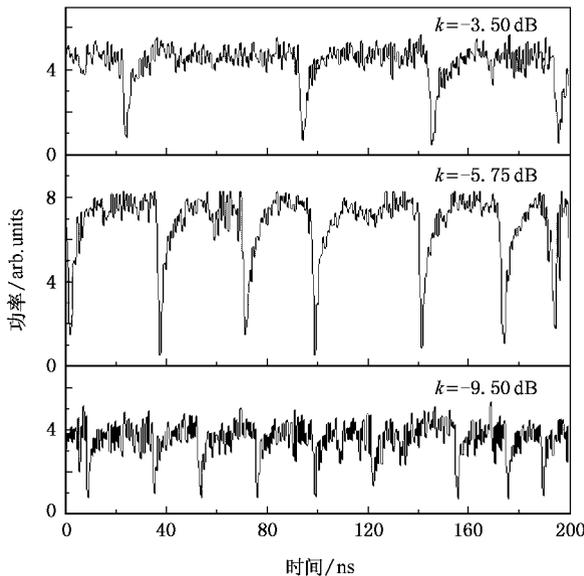


图 3 $I_b = 1.02I_{th}$ 时 ,不同反馈强度下低频起伏的时间序列

当偏置电流满足 $I_b > 1.03I_{th}$ 时 ,随着反馈强度的减小 ,低频起伏的峰峰值一直增大 ,其周期也随着逐渐减小 ,最后进入混沌状态. 图 4 表示偏置电流 $I_b = 1.08I_{th}$,当反馈强度逐渐减小时低频起伏到混沌的变化过程 ,其中反馈强度分别为 -3.50 , -5.75 , -9.50 dB. 由图 4 可以看出 ,在 200 ns 的时间序列内 ,当反馈强度由 -3.50 dB 减小到 -5.75 dB 时 ,对应的低频起伏的平均周期数由 8 增加到 12 ,低频起伏的平均频率逐渐增大 ;而当反馈强度增大为 -9.50 dB 时 ,激光器的输出不再具有周期性而是进入混沌状态. 同时 ,从图 4 还可以看出 ,低频起伏的峰峰值随反馈强度的减小一直增大 ,直至进入混

沌状态.

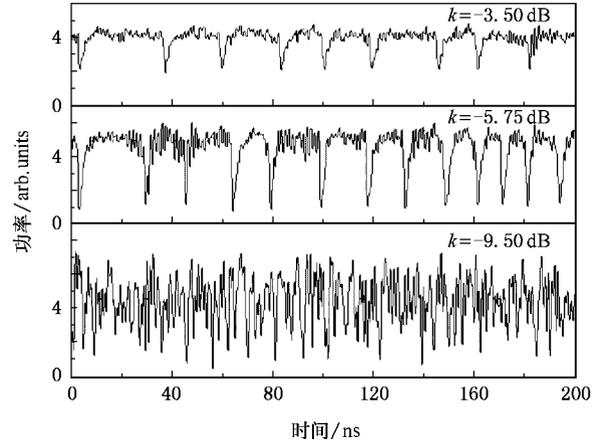


图 4 $I_b = 1.08I_{th}$ 时 ,不同反馈强度下低频起伏到混沌状态的时间序列

为了验证图 4 中当反馈强度 $k = -9.50$ dB 的混沌状态 ,采用图中所对应的实验数据 ,按照 G-P 算法^[17]求得混沌的维数为 12.2 ,同时 ,按照改进的最小数据量法^[18]得到最大 Lyapunov 指数为 $7.5 \times 10^6/s$. 由此可见 ,激光器输出已经为混沌状态 ,且维数较高. 同时还测量了它的功率谱 ,得到一平滑的频谱 (相对于低频起伏的多峰情况) ,如图 5 所示. 受光电探测器带宽 (1.5 GHz) 的限制 ,从图 5 中可以发现当频率超过 1.5 GHz 时 ,混沌信号功率谱的幅度陡然下降.

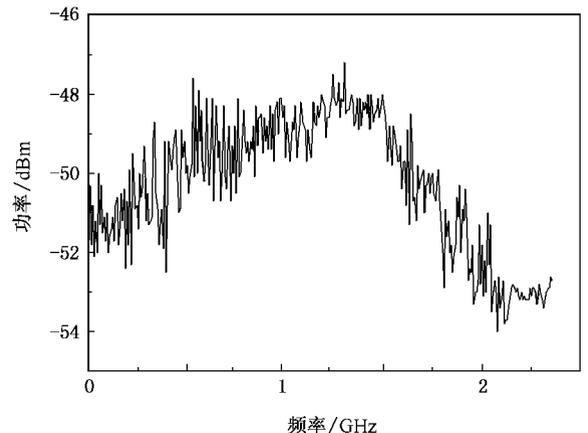


图 5 图 4 中混沌态所对应的频谱

在反馈强度及偏置电流的作用下 ,光反馈半导体激光器的输出可经历稳定输出、低频起伏和混沌三个状态 ,如图 6 所示. 当激光器的输出为低频

起伏状态时,如果偏置电流 $I_b < 1.03I_{th}$,降低反馈强度后激光器的输出会进入稳定状态,但不能进入混沌状态,而当偏置电流 $I_b > 1.03I_{th}$ 时,降低反馈强度后会使激光器的输出由低频起伏进入混沌状态.

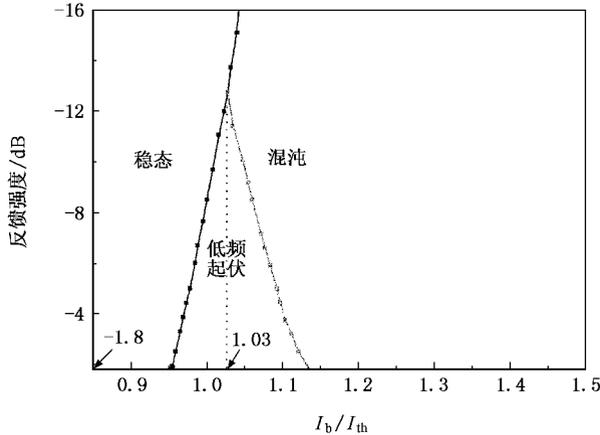


图6 反馈强度及偏置电流所决定的低频起伏和混沌产生的区域

图7中曲线a和曲线b分别表示偏置电流 $I_b = 1.02I_{th}$ 和 $I_b = 1.08I_{th}$ 时低频起伏和混沌信号的幅度随反馈强度的变化关系,其中 p 表示激光器有反馈时输出的峰峰值与无反馈时输出的峰峰值之比.从图7可看出:当偏置电流为 $1.02I_{th}$ 时,反馈强度达到 -12.50 dB时开始出现低频起伏,但还不明显.随着反馈强度的增大,峰峰值逐渐变大,并且反馈强度达到 -5.50 dB左右时,低频起伏的峰峰值达到最大.此后随着反馈强度的增大低频起伏的峰峰值逐渐减小,反馈强度达到 -1.90 dB时,低频起伏已变

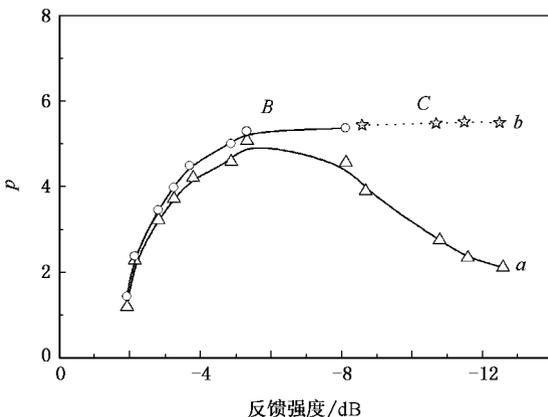


图7 有反馈时激光器输出的峰峰值与无反馈时激光器输出的峰峰值之比 p 随反馈强度的变化关系.曲线a: $I_b = 1.02I_{th}$; 曲线b: $I_b = 1.08I_{th}$,其中B段为混沌态,C段为低频起伏态

得不明显.可见低频起伏的峰峰值随反馈强度的增大先变大而后逐渐变小,且激光器进入稳定输出状态,而不会出现混沌状态.从图7曲线b可以看出,当偏置电流 $I_b = 1.08I_{th}$ 时,随反馈强度的减小,低频起伏的峰峰值一直增大,激光器的输出也由低频起伏状态进入混沌状态.曲线b的B段为混沌态,C段为低频起伏状态.

3. 理论分析

光反馈半导体激光器低频起伏到混沌的产生可采用下列包含反馈项和 Langevin 噪声项的单纵模速率方程^[19]来描述:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{1}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \alpha(N(t), S(t))S(t) + F_N(t), \quad (2)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{\beta\Gamma N(t)}{\tau_c} + \Gamma\alpha(N(t), S(t))S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + 2\frac{\kappa}{\tau_1} \sqrt{S(t)S(t-\tau)} \cos(\theta(t)) + F_S(t), \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left[\Gamma\alpha(N(t), S(t)) - \frac{1}{\tau_p} \right] - \frac{\kappa}{\tau_1} \sqrt{\frac{S(t-\tau)}{S(t)}} \sin(\theta(t)) + F_\phi(t). \quad (4)$$

这里

$$\alpha(N(t), S(t)) = \frac{G_N(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon S(t)},$$

其中 G_N 为微分增益, N_0 为透明载流子密度;

$$\theta(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau);$$

$F_N(t), F_S(t), F_\phi(t)$ 为 Langevin 噪声项;

$$\kappa = (1 - R_2) \sqrt{R_e/R_2}$$

表示反射光与输出端面处内反射光的电场幅度之比,用来衡量反射光的强弱,其中 R_2 和 R_e 分别为激光器输出端面强度反射率和外腔镜面强度反射率.因此反馈强度可用 $k = 10 \log(\kappa^2)$ 来表示; N 和 S 分别是激光器腔内载流子密度和光子密度; e 为电子电量; V 为有源区体积; τ_c 为载流子寿命; τ_p 为光子寿命; Γ 为限制因子; N_{th} 为阈值载流子密度; ϵ 为增益饱和系数; α 为线宽增强因子; β 为自发辐射因子; τ_1 为光在外谐振腔的往返时间.

光反馈半导体激光器的参数按照文献^[20]的方

法提取,取值如下: $V = 1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3$, $N_0 = 4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\alpha = 5.5$, $\beta = 10^{-5}$, $G = 2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$, $\tau_c = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$, $\tau_p = 2 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\Gamma = 0.4$, $R_2 = 0.3$, $\lambda = 780 \text{ nm}$.

下面模拟偏置电流及反馈强度对光反馈半导体激光器的低频起伏与混沌载波的影响. 通过模拟发现,当偏置电流约在 $0.97I_{th}$ — $1.10I_{th}$, 反馈强度 k 在 -23.60 — -18.00 dB 范围时,光反馈半导体激光器的输出可以出现低频起伏.

图 8 表示激光器偏置电流 $I_b = 1.02I_{th}$ 时激光器输出功率随反馈强度变化的时间序列. 从图 8 可以看出,此时激光器输出为低频起伏状态,且当反馈强度 k 分别为 -19.50 , -20.50 , -22.53 dB 时,600 ns 时间序列内低频起伏的周期数分别为 3, 4, 6. 模拟表明,当偏置电流为 $1.02I_{th}$ 时,低频起伏平均周期数随反馈强度的减小而减小,但却没到达混沌状态.

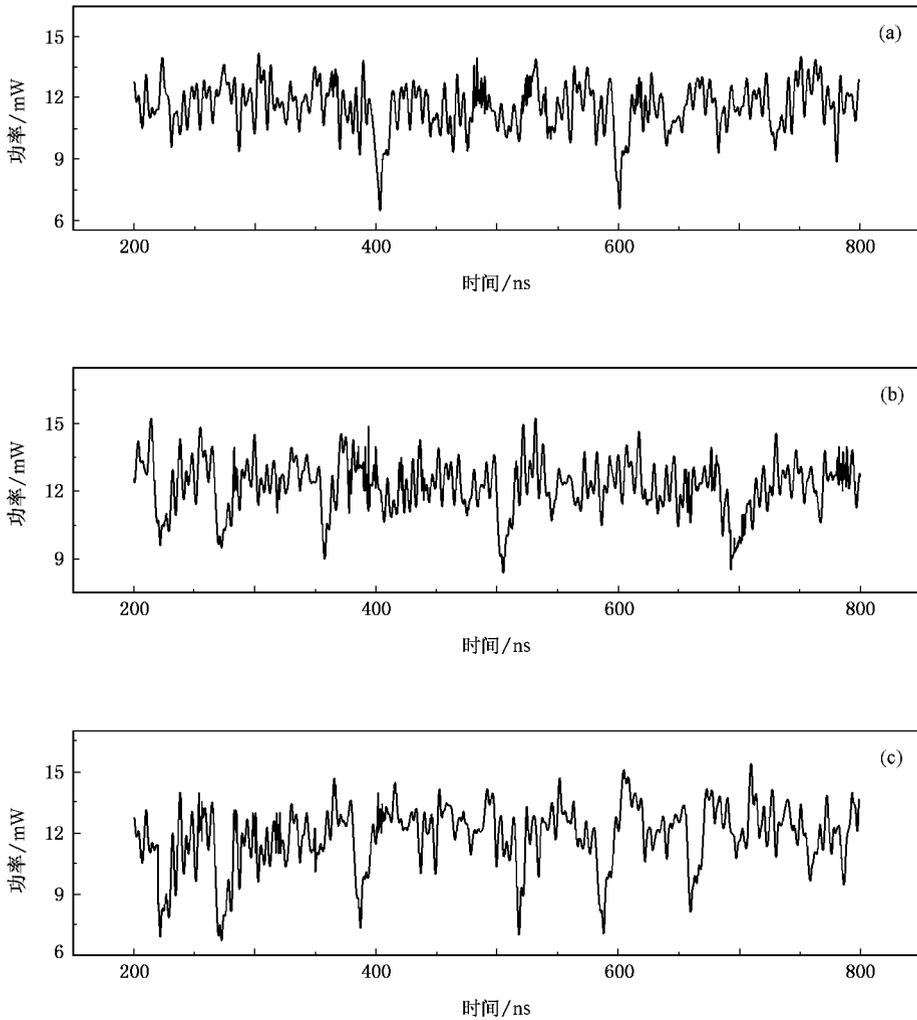


图 8 当偏置电流 $I_b = 1.02I_{th}$ 时,不同反馈强度下低频起伏的时间序列 (a) $k = -19.50 \text{ dB}$, (b) $k = -20.50 \text{ dB}$ (c) $k = -22.53 \text{ dB}$

当偏置电流较高且超过 $1.03I_{th}$ 时,模拟显示了与上述不同的结果. 图 9 表示激光器的偏置电流 $I_b = 1.08I_{th}$ 时不同反馈强度下低频起伏到混沌的时间序列. 从图 8 (a) (b) 可以看出,当反馈强度 $k = -19.50 \text{ dB}$ 和 $k = -20.50 \text{ dB}$ 时,低频起伏在 600 ns 时间序列内的周期数分别约为 3 和 7. 从图 8 (c) 可

以看出,当反馈强度 $k = -22.53 \text{ dB}$ 时,激光器的输出不再具有周期性,而是进入混沌状态. 同时,在不同的偏置电流下,通过改变反馈强度进行了一系列的数值模拟. 结果表明:只有当偏置电流 $I_b > 1.03I_{th}$ 时,降低反馈强度可使激光器从低频起伏进入混沌状态. 模拟结果与实验结果相符.

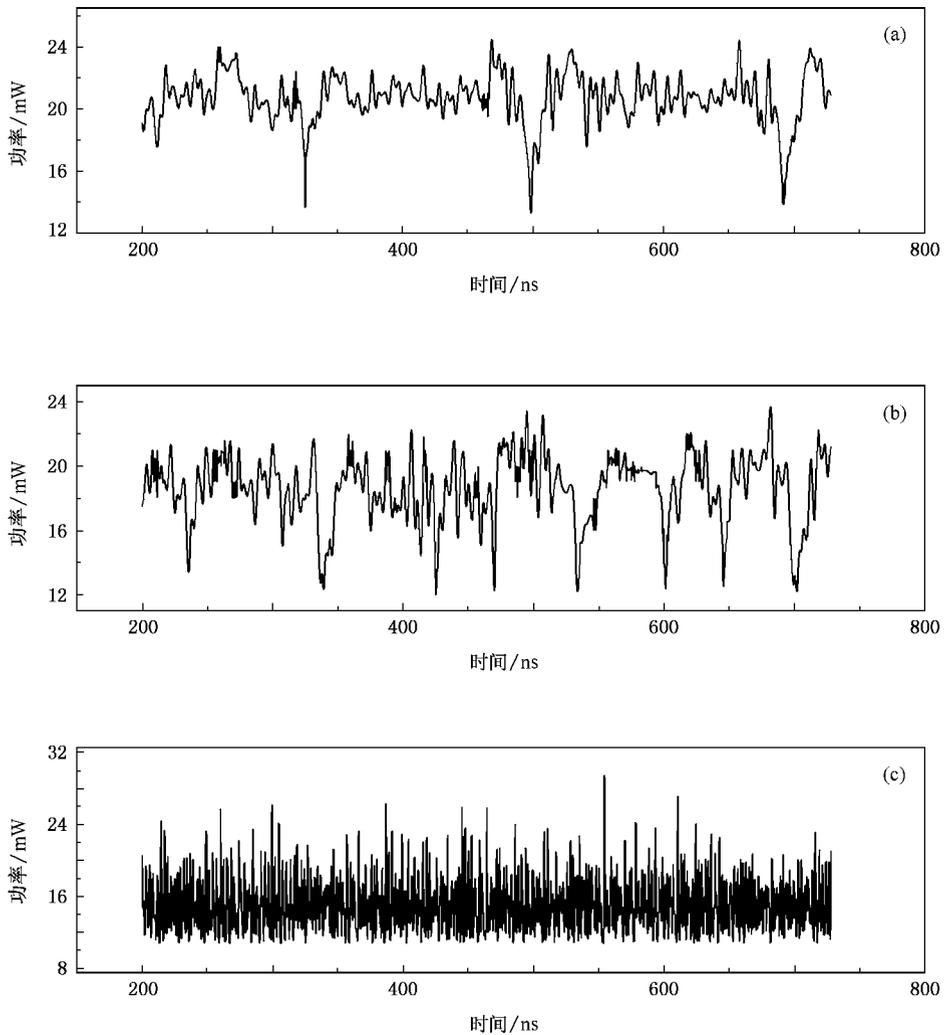


图9 当偏置电流 $I_b = 1.08 I_{th}$ 时,不同反馈强度下低频起伏到混沌的时间序列 (a) $k = -19.50$ dB (b) $k = -20.50$ dB (c) $k = -22.53$ dB

4. 结 论

本文利用光反馈半导体激光器实验产生了低频起伏及高维混沌载波,同时深入研究了反馈强度和偏置电流在低频起伏到混沌过程中的制约关系.实验表明,只有偏置电流 $I_b > 1.03 I_{th}$ 时,低频起伏才能通过降低反馈强度进入无周期的高维混沌状态.采

用半导体激光器的速率方程,通过数值模拟研究了偏置电流和反馈强度对低频起伏和混沌载波的制约关系.结果表明,光反馈半导体激光器在产生低频起伏的基础上继续增大偏置电流或降低反馈强度可使低频起伏的平均周期减小,从而进入混沌状态.模拟结果与实验结果相符.本文的研究工作对半导体激光器的动态特性、混沌及混沌同步的产生及混沌保密通信的进一步研究是非常有益的.

- [1] Tkach R W, Chraplyvy A R 1986 *IEEE J. Lightwave Technol.* **4** 1655
 [2] Liu C, Ge J H, Chen J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5211 (in Chinese)
 [刘 崇、葛剑虹、陈 军 2006 物理学报 **55** 5211]

- [3] Heil T, Fischer I, Elsaesser W 1998 *Phys. Rev. A* **58** 2672
 [4] Murakami A, Shore K A 2006 *Phys. Rev. A* **73** 043804
 [5] Sukow D W, Gardner J R, Gauthier D J 1997 *Phys. Rev. A* **56** R3370

- [6] 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]
- [7] Dong R F , Zhang J X , Zhang T C , Zhang J , Xie C D , Peng K C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 462 (in Chinese) [董瑞芳、张俊香、张天才、张 靖、谢常德、彭堃堃 2001 物理学报 **50** 462]
- [8] Risch C , Voumard C 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 2083
- [9] Heil T , Fischer I , Elsaesser W , Mulet J , Mirasso C R 1999 *Opt. Lett.* **24** 1275
- [10] Hohl A , Linden H J C , Roy R 1995 *Opt. Lett.* **20** 2396
- [11] Sano T 1994 *Phys. Rev.* **50** 2719
- [12] Wang C L , Wu J , Lin J T 2003 *Acta Photon. Sin.* **32** 917 (in Chinese) [王春林、伍 剑、林金桐 2003 光子学报 **32** 917]
- [13] Huang L Y , Luo X S , Fang J Q , Zhao Y B , Tang G N 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 543 (in Chinese) [黄良玉、罗晓曙、方锦清、赵益波、唐国宁 2005 物理学报 **54** 543]
- [14] Vicente R , Perez T , Mirasso C R 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 9
- [15] Lin F Y , Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 991
- [16] Peil M , Fischer I , Elsässer W , Bakic S , Damaschke N , Tropea C , Stry S , Sacher J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 091106
- [17] Grassberger P , Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [18] Kim H S , Eykholt R , Salas J D 1999 *Physica D* **127** 48
- [19] Langley L N , Shore K A 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 434
- [20] Cartledge J C , Srinivasan R C 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 852

Dynamics of semiconductor laser with optical feedback : Evolution from low-frequency fluctuations to chaos^{*}

Kong Ling-Qin Wang An-Bang Wang Hai-Hong Wang Yun-Cai[†]
 (Department of Physics , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China)
 (Received 6 July 2007 ; revised manuscript received 18 September 2007)

Abstract

The low-frequency fluctuations and high-dimensional chaos with 12.2 correlation dimensions were generated experimentally by a semiconductor laser with optical feedback. Extensive experimental and numerical studies were performed to reveal the evolution process from low-frequency fluctuations to chaos. Our results showed that there exists a obvious critical point for the semiconductor laser's bias current. When the bias current I_b is set below $1.03I_{th}$, the peak-to-peak value of the low-frequency fluctuations increases at first and then decreases with the feedback strength decreasing, while its average period keeps decreasing. In this process, the output of the semiconductor laser never goes chaos. However, when the bias current I_b is set beyond $1.03I_{th}$, chaos appears and is persistent in this range. Moreover, the peak-to-peak value of the low-frequency fluctuations increases continuously and its duration decreases with the decrease of the feedback strength. Three stages experienced in the process leading from stable emission and low-frequency fluctuation to chaos are established. Numerical simulations are well consistent with the experimental results.

Keywords : low-frequency fluctuation , chaos , semiconductor laser , feedback

PACC : 4265T , 4255 , 4260

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60577019 , 60777041).

† E-mail : wangyc@tyut.edu.cn