

文章编号: 0258-7025(2006)11-1490-06

外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学特性

孔慧君, 吴正茂, 吴加贵, 林晓东, 谢瑛珂, 夏光琼

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

摘要 实验研究了外部光注入分布反馈(DFB)激光器的非线性动力学行为,并给出了其输出特性随注入光强度和频率失谐量变化的动力学特征图。实验结果表明,激光器的动力学行为对外部的微扰十分敏感;在不同外部光注入条件下,激光器可以呈现出单周期、倍周期、多周期以及混沌等多种非线性动力学特征;在注入光强度和频率失谐量变化空间存在三个复杂动力学区域;激光器表现出的复杂动力学行为总是与周期行为有关;当激光器处于复杂动力学区域时,其频谱为连续谱,在连续谱上存在多个明显的峰,所对应的频率定义为特征频率,特征频率的大小不随注入光的强弱以及频率变化。

关键词 非线性光学;分布反馈半导体激光器;外部光注入;频率失谐量

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Experimental Investigation on the Nonlinear Dynamical Characteristics of Distributed Feedback Semiconductor Lasers Subjected to External Optical Injection

KONG Hui-jun, WU Zheng-mao, WU Jia-gui,

LIN Xiao-dong, XIE Ying-ke, XIA Guang-qiong

(School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract The nonlinear dynamic characteristics of distributed feedback (DFB) semiconductor lasers subjected to external optical injection have been investigated experimentally, and the output dynamical characteristics are mapped as a function of the power of optical injection and the frequency detuning between the injection frequency and free-running frequency of the unperturbed DFB semiconductor laser. Experimental results show that DFB semiconductor lasers are very sensitive to external perturbation and can exhibit periodic, chaos and other complex nonlinear dynamical characteristics when subjected to different external optical injection. There exist three regions of complex dynamics in the map. The complex dynamics is always related to the multi-periodic dynamics. When the laser exhibits complex dynamic, its spectrum is continuous spectrum, and there are several peaks in the spectrum. The magnitude of frequency that the peaks correspond to respectively has nothing with the power and the frequency of injection field.

Key words nonlinear optics; distributed feedback semiconductor laser; external optical injection; frequency detuning

1 引言

半导体激光器以其体积小、集成性强、价格便宜、电抽运驱动易于调制等优点,在光通信、光存储、

光谱学等领域得到广泛的应用,已经成为远程通信和光纤数据传输不可缺少的器件。但由于半导体材料的一些固有特性,使半导体激光器产生自相位调制和弛豫振荡^[1~4],对外部微扰十分敏感,易产生非

收稿日期:2006-03-07;收到修改稿日期:2006-06-20

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目。

作者简介:孔慧君(1980—),女,河南新乡人,西南大学物理学院硕士研究生,研究方向为激光与光纤通信。E-mail: akong@swu.edu.cn

导师简介:夏光琼(1970—),女,四川富顺人,西南大学教授,硕士生导师,主要从事半导体激光、光纤通信的研究。E-mail: gqxia@swu.edu.cn

线性动力学动态输出。近年来,半导体激光器的非线性输出特性的实用性引起人们的关注,并在一系列的应用领域得到广泛的研究。例如,基于全光激光混沌系统的大带宽、低衰减,动力学系统复杂以及对参数高度敏感的特性,光混沌安全保密通信非常适合应用于高速远程保密通信。混沌同步、混沌编码与解码等与保密相关的混沌通信技术相继被提出^[5~10];以微波混沌波形作为信号的混沌雷达相比,传统雷达具有不可比拟的优势,其拦截度低、电磁兼容性高、抗干扰性强、带宽大,正成为雷达研究的热点^[11,12]。另外,半导体激光器作为研究激光器的一些基本特性的非线性动力学系统也逐渐引起了人们的重视。

理论和实验都已经证明,各种各样的外部微扰(如外部光注入、抽运电流调制、光反馈以及光电反馈等^[13])都可能导致半导体激光器输出不稳定,产生振荡以及混沌等非线性动力学动态输出^[14~17]。光反馈是以自身的输出光作为微扰源,对激光器的微扰作用受到一定的限制。对电流调制和光电反馈来说,局限性在于激光器本身就是一个电器件,具有电容、电阻和电感。当增益介质接入电流回路中时,就会产生额外的电效应。而外部光注入是用一个独立的光源作为微扰,可以直接通过微扰机制最大程度地导致激光器输出不稳定,且微扰量易于控制。因此,外部光注入作为研究半导体激光器非线性特性的有效方法已成为近年来的一个研究热点。

在实际应用中,外部光注入技术被广泛应用于可调谐的波长转换、提高半导体激光器相干性、减小噪声、扩展调制带宽以及测量激光器的内部参数等方面^[18~28]。对于外部光注入分布反馈(DFB)激光器,当外部注入光的频率接近分布反馈激光器的自

由运转频率时,光注入可导致激光器产生注入锁定、倍周期振荡、多周期振荡、混沌和四波混频等复杂的非线性动力学行为。目前,多数对光注入分布反馈激光器的研究都是针对某一较具体的应用。而对不同注入条件下,分布反馈激光器的非线性动力学态的区域分布特征的系统实验研究比较少,而这种区域分布特征对进一步进行详细的实验和理论研究外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学特性均具有重要意义。另外,研究这种区域分布还可以为利用或避免复杂非线性动力学特性提供指导。本文着重从实验方面研究了外部光注入分布反馈激光器的动力学行为特征,系统地观察了外部注入条件变化时,外部光注入激光器产生的各种非线性动力学现象,并绘制出了其输出特性随注入光强度和频率失谐量变化的动力学特征图。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,边模抑制比(SMSR)大于 50 dB 的可调谐激光器输出的单色激光经耦合透镜耦合进单模光纤中,经过光纤耦合器 1(分光比为 20:80)分出 80% 的能量进入光功率计 1,其余 20% 的能量通过拉锥处理的单模尾纤注入分布反馈激光器。为了保证分布反馈激光器工作状态的稳定性,减小电流噪声和温度漂移对实验的影响,使用了噪声小于 $0.1 \mu\text{A}$ 的低噪声电流源(ILX-Lightwave LDX-3620)和控制精度达到 $\pm 0.01 \text{ K}$ 的高精度温控源(ILX-Lightwave LDT-5412),从分布反馈激光器输出的光通过拉锥尾纤再次耦合进入单模光纤中。然后通过光纤耦合器 1 使 80% 能量经过隔离度大于 50 dB 的光隔离器 2 后进入监测分析系统。其中光隔离器可以防止光纤接口的反馈光影响激光器的

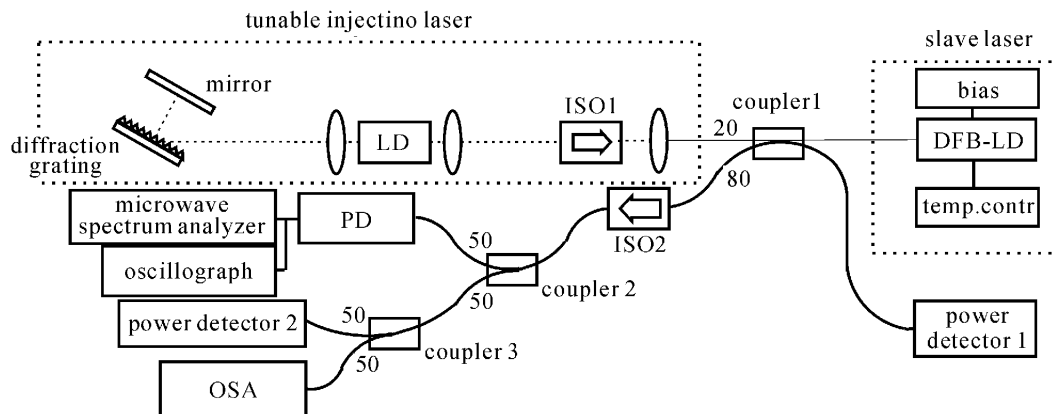


图 1 外部光注入分布反馈激光器动力学性能研究的实验装置图

Fig. 1 Experimental investigation setup of the nonlinear dynamical characteristics of DFB semiconductor lasers subjected to external optical injection

动力学行为。利用光纤耦合器 2(分光比为 50:50)使其中 50%的光输入分辨率达 0.01 nm 的高分辨率光谱仪(ANDO AQ6137C)和光功率计 2 中。通过光谱仪可以实时观察激光器输出的频谱变化情况;另外 50%的光经过带宽达 15GHz 的宽带光电探测器输入到微波频谱分析仪(Agilent ESA E4407B 带宽 26.5 GHz)和取样率达 20 GSa/s 的示波器(Agilent 54855A 带宽 6 GHz)中,以即时观测分布反馈激光器输出功率谱的分布和功率的时域特征。通过整个实验构架,能够系统地观察和记录外部光注入下激光器输出的动力学特征的动态变化情况,并根据实验记录准确地判断激光器的动力学行为,可对外部光注入激光器的动力学特性进行全面的研

究。在保持分布反馈激光器偏置电流不变的情况下,频率失谐量 $\Delta f (= f_m - f_0)$,其中 f_0 为分布反馈激光器的自由运转频率, f_m 为注入光的频率)和注入光功率 P 决定了激光器的动力学行为。在实验中,通过改变注入激光器的反射光栅的反射角度来得到不同的注入波长,即达到改变频率失谐量的目的。同时,通过改变注入激光器的偏置电流和改变拉锥尾纤与分布反馈激光器的耦合率,可实现注入功率在较大的范围内变化。

3 实验结果与讨论

使用武汉光迅公司提供的分布反馈激光器芯片,该激光器的阈值电流为 19.3 mA。在没有外部光注入时,固定分布反馈激光器的工作参量使之处于稳定的输出状态(偏置电流 $I_b = 28.37$ mA,温度 16.5 °C,输出功率约为 3 mW),其光谱如图 2 所示,中心波长为 1549.80 nm。在实验中,保持分布反馈激光器的偏置电流和温度不变,光纤与激光器的耦

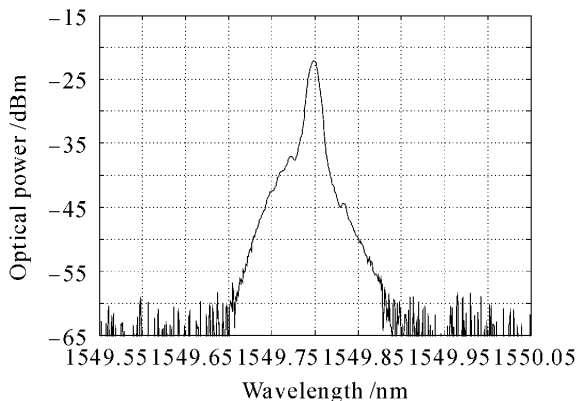


图 2 激光器自由运转时输出的光谱

Fig. 2 Optical spectrum of the laser at free running

合率约为 20%。

3.1 光注入分布反馈激光器的几种动力学行为

在外部光注入条件下,激光器的动力学行为会随着注入光功率和频率失谐量的改变发生变化。不断改变这两个参数,观察到了丰富的非线性动力学现象。

3.1.1 四波混频

当注入功率约为 38 μ W,频率失谐量为 16.3 GHz 时,在光谱图上有新的频率成分出现(如图 3 所示),即由四波混频机制产生的入射波的共轭波。注入光功率不变,继续减小频率失谐量,共轭波的强度随着频率失谐量的减小而增加。另外,通过对比不同注入条件下的光谱图,发现激光器的中心频率会随着注入条件的改变发生变化。这是由于外部注入光场将引起有源区内载流子密度发生改变,而载流子密度的变化又使介质的折射率和增益发生变化的缘故。

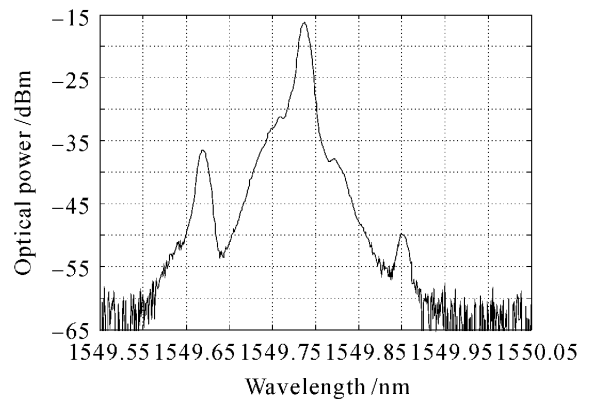


图 3 注入功率约为 38 μ W,频率失谐量为 16.3 GHz 时激光器输出的光谱

Fig. 3 Optical spectrum of the laser at $\Delta f = 16.3$ GHz and $P \approx 38 \mu$ W

3.1.2 单周期

图 4(a),(b),(c)分别为注入功率约为 27 μ W,频率失谐量为 -3.4 GHz 情况下,激光器输出的光谱、功率谱和相图。从功率谱上可以看出在 6.7 GHz 处有明显的峰,且峰的基座很小。根据功率谱和相图可以确定激光器此时处于单周期输出状态。

3.1.3 倍周期

图 5(a),(b)分别为注入功率约为 31 μ W,频率失谐量为 8.8 GHz 时的光谱和功率谱。从光谱图可以看出,激光器输出的光谱扩展得比较宽,光谱中包含非常多的频率成分,各频率成分之间的频率间隔几乎相等。从功率谱来看,在 6.5 GHz 以及 13 GHz

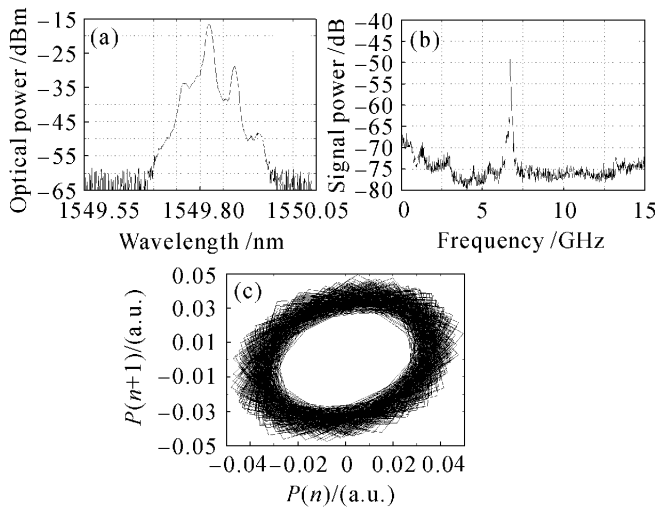


图4 注入功率约为 $27 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 -3.4GHz 时激光器的光谱(a), 功率谱(b)和相图(c)

Fig. 4 Optical spectrum (a), power spectrum (b), and phase diagram (c) of the laser at $\Delta f = -3.4 \text{GHz}$ and $P \approx 27 \mu\text{W}$

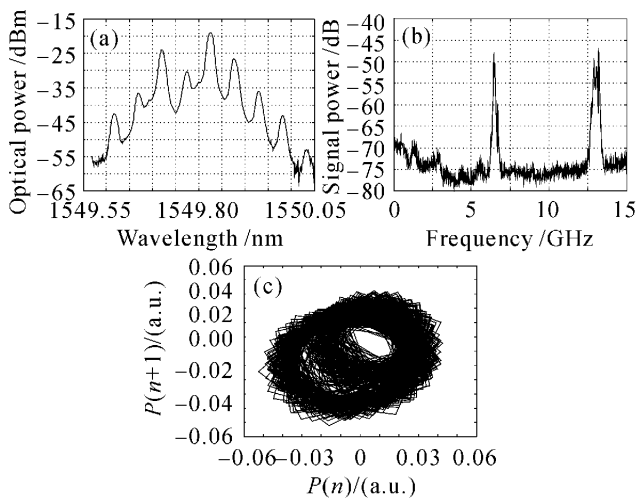


图5 注入功率约为 $31 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 8.8GHz 时激光器的光谱(a), 功率谱(b)和相图(c)

Fig. 5 Optical spectrum (a), power spectrum (b), and phase diagram (c) of the laser at $\Delta f = 8.8 \text{GHz}$ and $P \approx 31 \mu\text{W}$

处, 峰的强度非常强, 基座很小, 可以明显地从噪声中显现出来, 这个特征充分说明此时激光器处于倍周期输出状态。对应的相图(图 5(c))更加印证了判断的正确性。

3.1.4 多周期及复杂动力学

图 6 给出了注入功率约为 $27 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 2.9GHz 时激光器的光谱(a), 功率谱(b)以及时域图(c)。从激光器输出的光谱图(6(a))中可以看出, 光谱明显展宽, 整个观测到的光谱几乎连接成一体。这个特征表明激光器的非线性动力学行为可能向混沌转变。功率谱(图 6(b))更清晰地显示激光

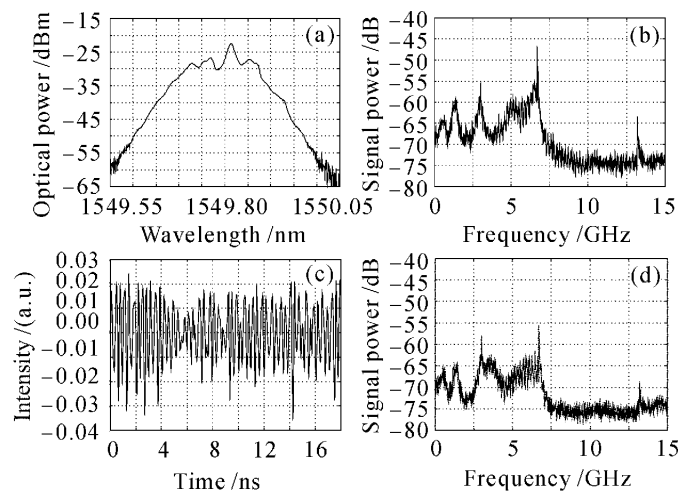


图6 注入功率约为 $27 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 2.9GHz 时激光器的光谱(a), 功率谱(b)以及时域图(c); 注入功率约为 $38 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 6.4GHz 时激光器的功率谱(d)

Fig. 6 Optical spectrum (a), power spectrum (b), and time series (c) of the laser at $\Delta f = 2.9 \text{GHz}$ and $P \approx 27 \mu\text{W}$; power spectrum (d) of the laser at $\Delta f = 6.4 \text{GHz}$ and $P \approx 38 \mu\text{W}$

器复杂动力学态的超宽频谱特性, 激光器的输出在 $0 \sim 7 \text{GHz}$ 的很大频率范围内均有很强的信号。这是国内较早观察到激光器处于复杂动力学态输出时的光谱和功率谱。仔细观察, 进一步发现这种超宽频谱还存在明显的多周期特征。其中, 在 0.6GHz , 1.3GHz , 3GHz , 6.7GHz , 13.2GHz 五个频率处峰非常明显。对比不同注入条件下(注入功率约为 $38 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 6.4GHz), 激光器处于其他复杂动力学态区域时的功率谱(图 6(d))可以发现, 这些峰值依然存在。因此, 可以判断这些峰对应的频率位置不随注入光的强弱以及频率变化, 可将峰对应的频率定义为特征频率。对于这种结构特征的研究还尚少见报道。经过分析推断, 认为这些频率峰对应着复杂动力学态吸引子的某些相轨迹, 而这些频率峰在不同复杂动力学区域的存在表明这些不同的吸引子包含着相似的相轨迹。另外, 利用高速宽带示波器观察了激光器处于复杂动力学态时的时域特征(图 6(c))。从图中可以看出, 当激光器处于复杂动力学态时, 其输出是一系列复杂变化的亚纳秒脉冲序列, 具有类噪声的特征。

另外, 当注入功率约为 $27 \mu\text{W}$, 频率失谐量为 -4.3GHz 时, 激光器的输出处于稳定的锁定状态。处于锁定状态时, 分布反馈激光器的工作波长被锁定在外部注入光的频率上, 其输出能量主要集中在

外部注入光频率处。

3.2 光注入分布反馈激光器的动力学特征分布

通过仔细改变外部注入条件,绘制了倍周期、锁定以及复杂动力学发生区域的动力学状态分布图(图7)。图中正方形、三角形和圆点分别对应激光器的输出处于注入锁定状态、复杂动力学状态和倍周期状态,其中注入锁定区域与其他动力学行为区域用虚线隔开,倍周期输出状态区域和复杂动力学行为区域分别用浅灰和深灰表示。从图7中可以看出,激光器的动力学特性对注入强度和频率失谐量两个参数的变化非常敏感。复杂的动力学行为出现在低功率注入区域,其中一个区域位于负失谐区域,另外两个分布在正失谐区域。在正失谐区域,靠近零失谐的复杂动力学区域较大。另外,复杂动力学区域的周围往往环绕着倍周期。需要说明的是,由于激光器放大自发辐射的影响,不同的动力学行为之间的变化边界比较模糊。

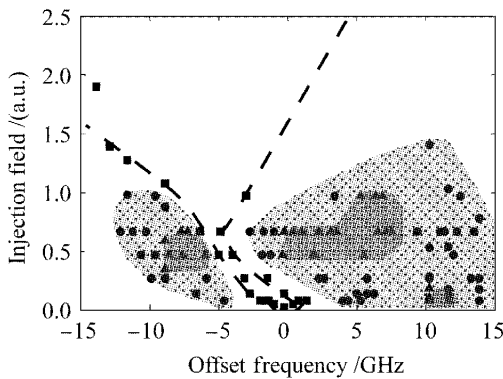


图7 外部光注入下分布反馈激光器非线性动力学状态分布图

Fig.7 Mapping of the nonlinear dynamics characteristics of DFB semiconductor lasers subjected to external optical injection

尽管只给出了分布反馈激光器偏置电流 $I_b = 28.37 \text{ mA}$, 温度 $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 输出功率约为 3 mW 时外部光注入下的非线性动力学状态分布图, 而实际上在实验中已观察到, 在不同注入电流(对应不同的输出功率)下上述的动力学状态都存在, 只是分布区域的大小和位置会发生变化。

4 结 论

实验研究了外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学行为, 通过改变外部注入光的强度以及频率, 实验观测了不同外部光注入条件下分布反馈激光器丰富的非线性动力学现象。根据实验数据, 绘

制出了分布反馈激光器在外部光注入情况下的非线性动力学特征图。从图中可以清楚看出, 复杂的动力学行为总是与倍周期以及多周期行为相关。激光器处于复杂动力学状态时, 其频谱为连续谱, 在连续谱上存在多个峰, 这些峰对应的频率的大小不随注入光的强度和频率发生变化。实验中没有明显观测到倍周期以上的多周期性振荡, 这主要是由于半导体激光器的自发辐射噪声已经使多周期性振荡和更加复杂的动力学区域边界变得非常模糊, 以至难以区分。需要指出的是, 实验采用分布反馈激光器主要是考虑其良好的单模特性, 实验实现相对便于控制; 而实际上采用普通的 F-P 型半导体激光器同样存在相似的非线性动力学行为而且更为复杂。

外部光注入半导体激光器是一个复杂的非线性动力学系统。通过改变外部注入光参数, 可以得到各种复杂的非线性动力学输出, 这对半导体激光器非线性动力学特性的研究和应用有一定的价值。

参 考 文 献

- 1 G. Makhov, C. Kikuchi, J. Lambe *et al.*. Maser action in ruby [J]. *Phys. Rev.*, 1958, **109**(4):1399~1400
- 2 E. R. Buley, F. W. Cummings. Dynamics of a system of N atoms interacting with a radiation field [J]. *Phys. Rev. A*, 1964, **134**(6A):1454~1460
- 3 N. B. Abraham, L. A. Lugiato, L. M. Narducci. Overview of instabilities in laser systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(1):7~15
- 4 H. Haken, H. Sauermann. Frequency shifts of laser modes in solid state and gaseous systems [J]. *Z. Phys.*, 1963, **176**(1):47~62
- 5 Apostolos Argyris, Dimitris Syvridis. Performance of open-loop all-optical chaotic communication systems under strong injection condition [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(5):1272~1279
- 6 Yun Liu, Peter Davis, Yoshiro Takiguchi *et al.*. Injection locking and synchronization of periodic and chaotic signals in semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(2):269~278
- 7 Shuo Tang, Jia-ming Liu. Effects of message encoding and decoding on synchronized chaotic optical communications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(11):1468~1474
- 8 Yan Senlin. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual-directional secure communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1503~1509
颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1503~1509
- 9 Tilmann Heil, Josep Mulet, Ingo Fischer *et al.*. ON/OFF phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1162~1170
- 10 Wu Jiagui, Wu Zhengmao, Lin Xiaodong *et al.*. Theoretical model and characteristics investigations of dual-channel optical chaotic communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(9):4169~4175
吴加贵, 吴正茂, 林晓东 等. 双信道光混沌通信系统的理论模型及性能研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(9):4169~4175

- 11 H. Leung, T. Lo. Chaotic radar signal processing over the sea [J]. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1993, **18**(3):287~293
- 12 Fanyi Lin, Jia-ming Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6):815~820
- 13 Joachim Sacher, Dieter Baums, Peter Panknin *et al.*. Intensity instabilities of semiconductor lasers under current modulation, external light injection, and delayed feedback [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(3):1893~1905
- 14 V. Annovazzi-Lodi, S. Donati, M. Manna. Chaos and locking in a semiconductor laser due to external injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7):1537~1541
- 15 T. B. Simpson, J. M. Liu, K. F. Huang *et al.*. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers [J]. *Quantum Semiclass Opt.*, 1997, **9**(5):765~784
- 16 Atsushi Murakami. Phase locking and chaos synchronization in injection-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(3):438~447
- 17 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1450~1454
李孝峰,潘 炜,罗 斌等. 多次光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1450~1454
- 18 S. K. Hwang, J. M. Liu, J. K. White. 35-GHz intrinsic bandwidth for direct modulation in 1.3- μm semiconductor lasers subject to strong injection locking [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4):972~974
- 19 Finn Mogensen, Henning Olesen, Gunnar Jacobsen. Locking condition and stability of properties for a semiconductor laser with external light injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(7):784~793
- 20 C. H. Henry, N. A. Olsson, N. K. Dutta. Locking range and stability of injection locked 1.54 μm InGaAsP semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8):1152~1156
- 21 Isabelle Petitbon, Philippe Gallion, Guy Debarge *et al.*. Locking bandwidth and relaxation oscillations of an injection-locked semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):148~154
- 22 L. Goldberg, M. K. Chun. Injection locking characteristics of a 1 W broad stripe laser diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(14):1900~1902
- 23 Sze-Chun Chan, Jiaming Liu. Microwave frequency division and multiplication using an optically injected semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(9):1142~1147
- 24 Gnitabouré Yabre, Huug de Waardt, Henricus P. A. van den Boom *et al.*. Noise characteristics of single-mode semiconductor lasers under external light injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(3):385~391
- 25 T. B. Simpson, J. M. Liu, A. Gavrielides. Bandwidth enhancement and broadband noise reduction in injection-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(7):709~711
- 26 J. M. Liu, H. F. Chen, X. J. Meng *et al.*. Modulation bandwidth, noise, and stability of a semiconductor laser subject to strong injection locking [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10):1325~1327
- 27 Taraprasad Chattopadhyay, Madhumiea Bhattacharya. Submillimeter wave generation through optical four-wave mixing using injection-locked semiconductor lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3):502~506
- 28 J. Minch, Shun Lieu Chuang, Chih-Sheng Chang *et al.*. Theory and experiment on the amplified spontaneous emission from distributed-feedback lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(5):815~823