

doi:10.3788/gzxb20184703.0314002

光注入弱谐振腔法布里-珀罗激光器非线性动力学特性的实验研究

王广娜¹, 林恭如², 钟祝强¹, 夏光琼¹, 起俊丰¹, 苏斌斌¹, 吴正茂¹

(1 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2 台湾大学 光子学与光电子学研究院, 台北 10617)

摘 要: 实验研究了弱谐振腔法布里-珀罗激光器在受到光注入扰动时的非线性动力学特性. 通过测定“−3 模”、“0 模”、“13 模”三个纵模输出的时间序列, 功率谱和光谱分布, 对其非线性动力学状态进行了判定. 研究表明: 引入光注入后, 通过改变注入强度及频率失谐, 这三个纵模均可呈现出四波混频、单周期态、准周期态、混沌态以及稳定的光注入锁定态等非线性动力学特性, 其动力学演化路径为经准周期分岔进入混沌态. 此外, 为实现对动力学状态的精确控制, 绘制了这三个纵模在光注入强度 $0 \mu\text{W}$ 到 $450 \mu\text{W}$ 和频率失谐 -16 GHz 到 16 GHz 构成的参量空间的动力学状态分布图. 结果显示: “0 模”与“13 模”在正、负频率失谐均可观察到混沌区域, 而“−3 模”在负频率失谐没有出现混沌区域; “0 模”存在两个分离的稳定的光注入锁定态区, 而在“−3 模”和“13 模”仅观测到一个稳定的光注入锁定态区.

关键词: 弱谐振腔; 法布里-珀罗; 激光器; 光注入; 非线性动力学; 混沌

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0314002-9

Experimental Investigation on the Nonlinear Dynamics of a Weak-resonant-cavity Fabry-Perot Laser Diode Subject to Optical Injection

WANG Guang-na¹, LIN Gong-ru², ZHONG Zhu-qiang¹, XIA Guang-qiong¹,
QI Jun-feng¹, SU Bin-bin¹, WU Zheng-mao¹

(1 School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics, National Taiwan University, Taipei 10617, China)

Abstract: The nonlinear dynamics of a weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode subject to optical injection was experimentally investigated. By recording the time series, power spectra and optical spectra of three longitudinal modes (“mode −3”, “mode 0”, and “mode 13”) in the weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode, the nonlinear dynamical states have been determined. The results show that, after introducing optical injection, through varying injection strength and frequency detuning, the three longitudinal modes can exhibit four-wave mixing, period one, quasi-period, chaos, and stable injection-locking, and the dynamical evolution route is from quasi-period to chaos. Moreover, in order to control the dynamical state accurately, we draw the dynamical state mappings of the three longitudinal modes in the parameter space of injection strength from $0 \mu\text{W}$ to $450 \mu\text{W}$ and frequency detuning from -16 GHz to 16 GHz . The results demonstrate that the chaotic region can be observed in the positive and negative frequency detuning for “mode 0” and “mode 13”, but cannot be observed in the negative frequency detuning region for “mode −3”. And there exist two separate stable injection-locking regions for “mode 0”, but there is only one stable injection-locking region for “mode −3” and “mode 13”.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61475127, 61575163, 61775184)资助

第一作者: 王广娜(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学. Email: wangguangna1994@163.com

导师(通讯作者): 吴正茂(1970—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学及相关应用. Email: zmwu@swu.edu.cn

收稿日期: 2017-10-07; 录用日期: 2017-12-13

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Weak-resonant-cavity; Fabry-Perot ; Laser diode; Optical injection; Nonlinear dynamics; Chaos

OCIS Codes: 140.5960; 120.2230; 140.3600; 190.3100; 190.4360

0 引言

弱谐振腔法布里-珀罗激光器(Weak-Resonant-Cavity Fabry-Perot Laser Diode, WRC-FPLD)是一种新型的多模半导体激光器^[1-2].与传统法布里-珀罗激光器(Fabry-Perot Laser Diode, FPLD)相比,WRC-FPLD具有更低的前端面反射率(约为1%~10%)和更长的腔长(约600 μm),因此 WRC-FPLD 的增益谱更宽、纵模间隔更小^[3-6].这些特性使得 WRC-FPLD 非常适合作为波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光通信系统中的光源使用^[7].

近年来,WDM光通信系统的安全性成为人们关注的焦点.基于半导体激光器非线性动力学的混沌保密通信技术也被应用到 WDM 光通信系统中.在理论研究方面,ZHANG 等数值模拟了混沌光通信和传统光纤通信 WDM 系统,并讨论了信道间的串扰问题^[8].JIANG 等通过将混沌光注入两个多模半导体激光器的方式,理论实现了两通信激光器各模式间高质量的混沌同步和双向保密通信^[9].实验方面,Paul 等通过使用两个光反馈半导体激光器产生双信道混沌载波,实验证实了双信道混沌光保密通信的可行性^[10].Matsuura 等使用两对单向耦合的 Nd:YVO₄ 激光器在注入锁定的条件下得到了双混沌同步,并实现了两个信道的光混沌保密通信^[11].在以上研究中,均是通过精确控制半导体激光器外部扰动参量,使之工作在混沌态,在达到较好混沌同步的条件下,将信号加载到两路或多路混沌载波上以实现光混沌加密 WDM 通信.因此,通过对 WDM 光通信系统中光源的非线性动力学特性进行研究,探明其非线性动力学演化路径,进而对其非线性动力学状态进行精确控制^[12-15],成为了基于光混沌加密 WDM 光通信系统的关键.

基于以上考虑,本文对 WRC-FPLD 在受到连续光注入时的非线性动力学特性进行实验研究,着重考察了 WRC-FPLD 中不同的模式在光注入下的动力学演化路径,以及在由注入强度和频率失谐构成的参量空间的非线性动力学分布.

1 实验装置

实验研究光注入下 WRC-FPLD 的非线性动力学特性的系统装置如图 1,其中,实线表示光路,虚线表示电路.主激光器(Master Laser, ML)为可调谐激光源(Santec TSL-710,波长可调谐范围1480~1640 nm,输出功率最大值10 dBm,线宽为100 kHz),其输出的连续光经偏振控制器(Polarization controller, PC)、可变衰减器1(Variable Attenuator 1, VA1)后被光纤耦合器1(Fiber Coupler, FC1)(分光比为10:90)分成两部分,其中10%的光信号用于监测注入光功率(Power Meter, PM, Thorlabs PM100D),另外90%的光信号经过光环形器(Optical Circulator, OC)注入到带尾纤的 WRC-FPLD. PC 用于控制注入光的偏振态.高精度温度电流控制源(ILX-Lightwave, LDC-3724B)为 WRC-FPLD 提供超低噪声偏置电流,并将 WRC-FPLD 的温度控制在 22.25°C. WRC-FPLD 的输出光经过 OC、可调谐滤波器(Filter)、FC2(分光比为10:90)后进入测试系统,其中90%的光信号输入到光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, Ando AQ6317C)中

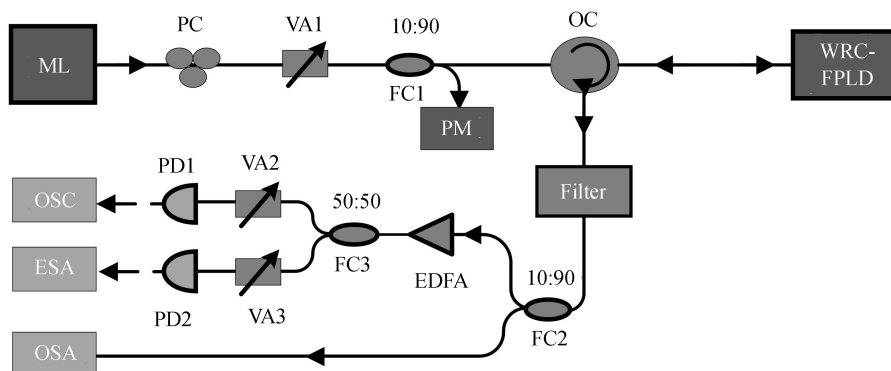


图 1 实验系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

对光谱进行检测,另外 10% 的光信号经过掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大后由 FC3 均分为两部分,然后分别经过可变衰减器调节合适的能量,经 47 GHz 带宽的光电探测器(Photo-Detector, PD, U2T XPDV2150R)将光信号转变为电信号,进而输入到 26.5 GHz 带宽的电谱分析仪(Electrical Spectrum Analyzer, ESA, Agilent E4407B)和 16 GHz 带宽的数字实时示波器(Oscilloscope, OSC, Agilent DSOX91604A)进行功率谱和时间序列检测.其中,可调谐滤波器 3 dB 带宽为 0.280 nm,其中中心波长可在 1 544.000~1 556.000 nm 范围内进行调谐.

2 实验结果与讨论

图 2(a)给出了 WRC-FPLD 在自由运行时的 $P-I$ 曲线. WRC-FPLD 的阈值电流 I_{th} 约为 31.50 mA.随着偏置电流 I 的增加, WRC-FPLD 的输出功率呈现线性增加的趋势.当偏置电流为 50.00 mA 时, WRC-FPLD 的输出功率为 0.766 mW,光谱分布如图 2(b)所示.在波长 1 515.000 ~ 1 575.000 nm 范围内,包含 100 多个纵模,模式间隔约为 0.560 nm,主激励模式的波长为 1 547.128 nm,能量为 -5.429 dBm.

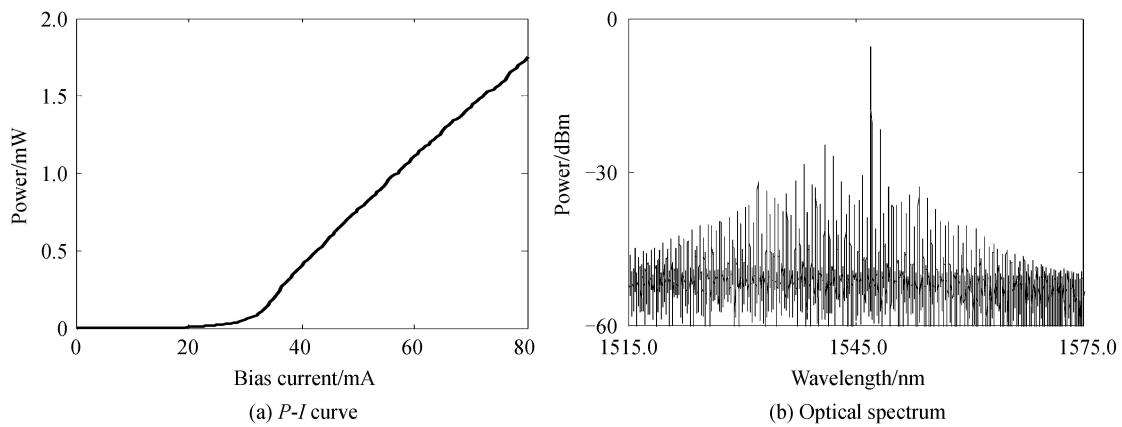


图 2 自由运行时 WRC-FPLD 的 $P-I$ 曲线和偏置电流 $I = 50.00$ mA 时的光谱分布

Fig.2 $P-I$ curve of free-running WRC-FPLD and optical spectrum of the laser biased at 50.00 mA

由于实验中所用可调谐滤波器的调谐范围为 1 544.000~1 556.000 nm,因此主要观察在这一范围内 WRC-FPLD 的纵模在外部光注入下的非线性动力学特性.电流偏置在 50.00 mA 的自由运行 WRC-FPLD 输出波长位于 1 544.000~1 556.000 nm 范围内的各纵模如图 3.为方便描述,将输出的纵模的主激励模式定义为“0 模”,短波长方向的模式依次定义为“-1 模”、“-2 模”、“-3 模”、“-4 模”、“-5 模”,依次类推,而长波长方向的模式分别定义为“1 模”、“2 模”、“3 模”一直到“15 模”.实验中所用的滤波器的 3 dB 带宽为 0.280 nm,而相邻两纵模的间隔为 0.560 nm,因此利用该滤波器可选择出波长位于滤波器带宽范围内某一纵模进行测试.接下来,着重观测“0 模”、“-3 模”和“13 模”在外部光注入下的非线性动力学特性.

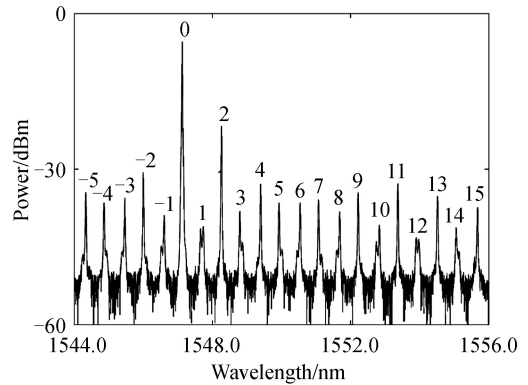


图 3 滤波器可调范围内的 WRC-FPLD 自由运行时的光谱
Fig.3 Optical spectrum of the solitary WRC-FPLD within the tunable range of the filter

首先,研究 WRC-FPLD 中“0 模”在外部光注入下的非线性动力学行为.图 4 给出了“0 模”在光注入频率失谐 $\Delta\nu = 4$ GHz,注入强度 η 取不同值时输出的时间序列、光谱、功率谱.当 $\eta = 0 \mu\text{W}$ 时(如图 4(a)),即在没有光注入的情况下,其时间序列除了由噪声引起的微小的起伏外基本保持不变,结合其光谱和功率谱,可以确定此时“0 模”的动力学状态为稳态(Stable State, S).当 $\eta = 1.448 \mu\text{W}$ 时(如图 4(b)),激光器输出的时间序列呈现出具有调制包络的周期性振荡,在功率谱中出现了多个互质的频率成分,由此可以判断此时的“0 模”工作在准周期态(Quasi-Period, QP).当 $\eta = 5.480 \mu\text{W}$ 时(如图 4(c)),激光器输出的时间序列表现为类

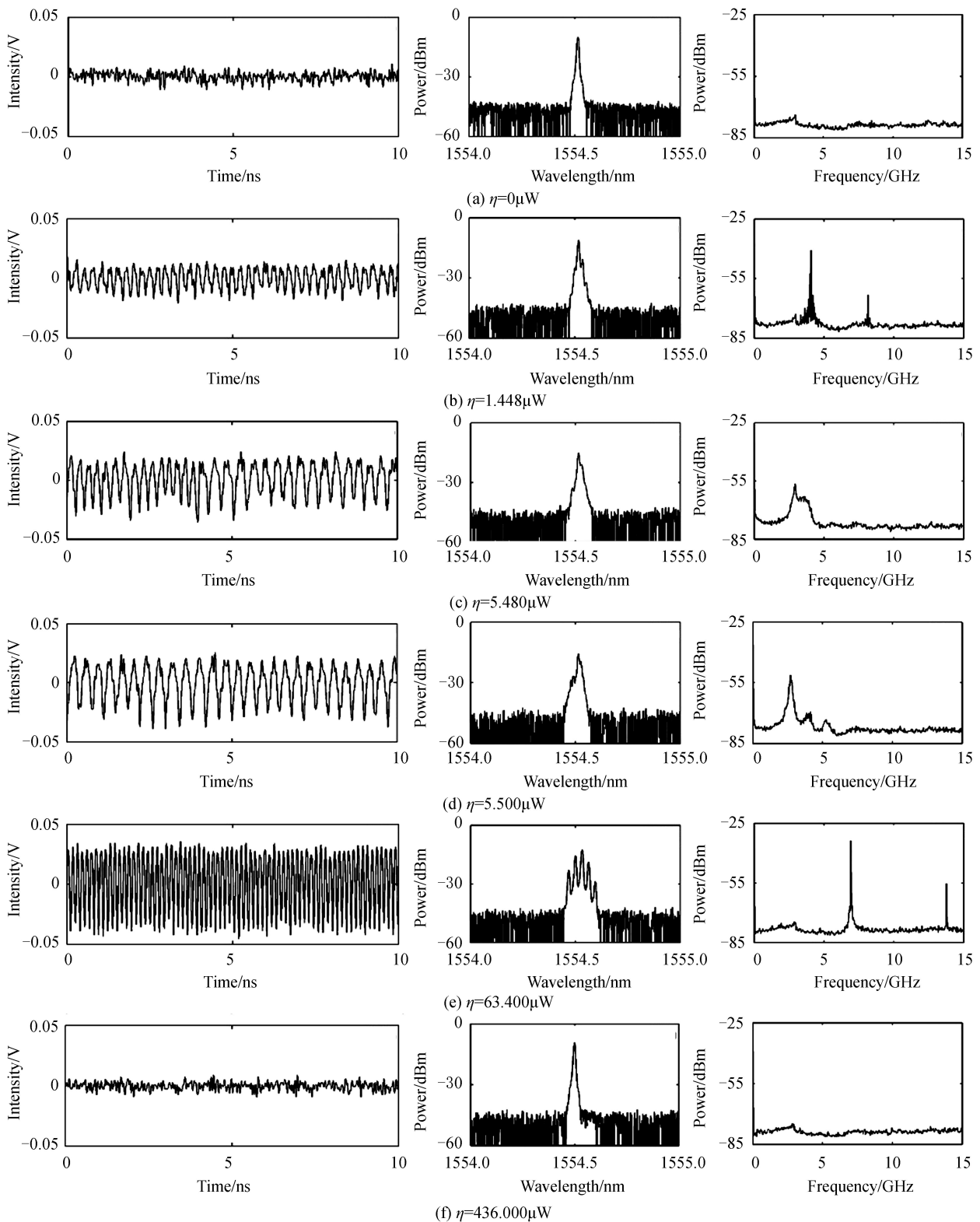


图4 $\Delta\nu = 4$ GHz, η 取不同值时, WRC-FPLD 中“0 模”输出的时间序列、光谱、功率谱

Fig.4 Time series, optical spectra and power spectra of the “mode 0” of the WRC-FPLD under $\Delta\nu = 4$ GHz and different η 似噪声的振荡, 光谱和功率谱都有明显的展宽, 结合这些特征, 我们可以确定此时的“0 模”工作在混沌态 (Chaos, C). 当 $\eta = 5.500 \mu\text{W}$ 时 (如图 4(d)), 功率谱中有多个频率成分, 并且光谱和自由运行相比也有一定的展宽, 由此可以判断此时的“0 模”工作在 QP. 当 $\eta = 63.400 \mu\text{W}$ 时 (如图 4(e)), 此时时间序列呈现出周期性的振荡, 功率谱在基频 6.920 GHz、及其倍频处可观测到极强的振荡峰, 可以判断此时“0 模”工作在单周期态 (Period-One, P1). 继续增加注入强度, 当 $\eta = 436.000 \mu\text{W}$ 时 (如图 4(f)), 激光器输出的时间序列和功

率谱与“0 模”在 WRC-FPLD 自由运行状态下的时间序列和功率谱相似,但此时的光谱显示,“0 模”的峰值波长被推至 ML 的振荡波长处,此时,激光器处于一种稳定的光注入锁定态(Stable and Injection Locking, S&IL).因此,在 $\Delta\nu = 4$ GHz 的条件下,逐渐增加光注入强度,WRC-FPLD 中“0 模”呈现出由 S 经过 QP、C、QP、P1 到 S&IL.

上面结果是在注入光的频率失谐固定在 4 GHz 的条件下得到的,当频率失谐取不同值时,所得的结果会有差异.图 5 给出了 WRC-FPLD“0 模”的动力学态在由 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间动力学状态分布图,不同的灰度对应不同的动力学态.P1 区域只出现在 0 频率失谐处和正频率失谐处.当输出时间序列振荡频率等于主副激光器频率失谐时,副激光器处于四波混频态(Four-Wave Mixing, FWM),并且此时注入强度较小,与文献[16]的结果相符.S&IL 区域比较大,而 C 和 QP 区域比较小.

接下来,研究 WRC-FPLD 中“−3 模”在外部光注入下的非线性动力学行为.图 6 给出了“−3 模”在 $\Delta\nu = 4$ GHz, η 取不同值时输出的时间序列、光谱、功率谱.当 $\eta = 0 \mu\text{W}$ 时(如图 6(a)),光谱的中心波长为 1 545.464 nm,与图 4(a)相似,WRC-FPLD 自由运行时“−3 模”的动力学状态为 S.当 $\eta = 6.570 \mu\text{W}$ 时(如图 6(b)),结合光谱和功率谱可以判断此时 WRC-FPLD“−3 模”的动力学状态为 P1,该周期振荡的基频为 4.451 GHz.当 $\eta = 8.410 \mu\text{W}$ 时(如图 6(c)),激光器输出的时间序列呈现出具有调制 envelopes 的周期性振荡,光谱与自由运行相比也有一定的展宽,说明此时 WRC-FPLD“−3 模”处在 QP.当 $\eta = 8.830 \mu\text{W}$ 时(如图 6(d)),激光器输出的时间序列表现为类似噪声的无规则振荡,光谱和功率谱也有明显的展宽,此时 WRC-FPLD“−3 模”处在 C.当 $\eta = 16.110 \mu\text{W}$ 时(如图 6(e)),在功率谱中有多个频率峰值,光谱也有展宽,此时 WRC-FPLD“−3 模”的动力学状态为 QP.当 $\eta = 100.100 \mu\text{W}$ 时(如图 6(f)),WRC-FPLD“−3 模”的动力学行为与图 4(e)相似,因此,可以确定 WRC-FPLD

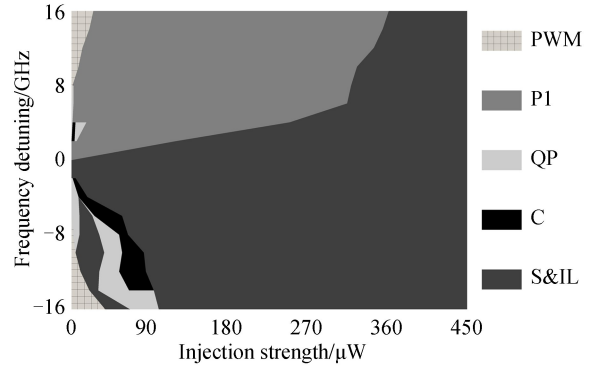
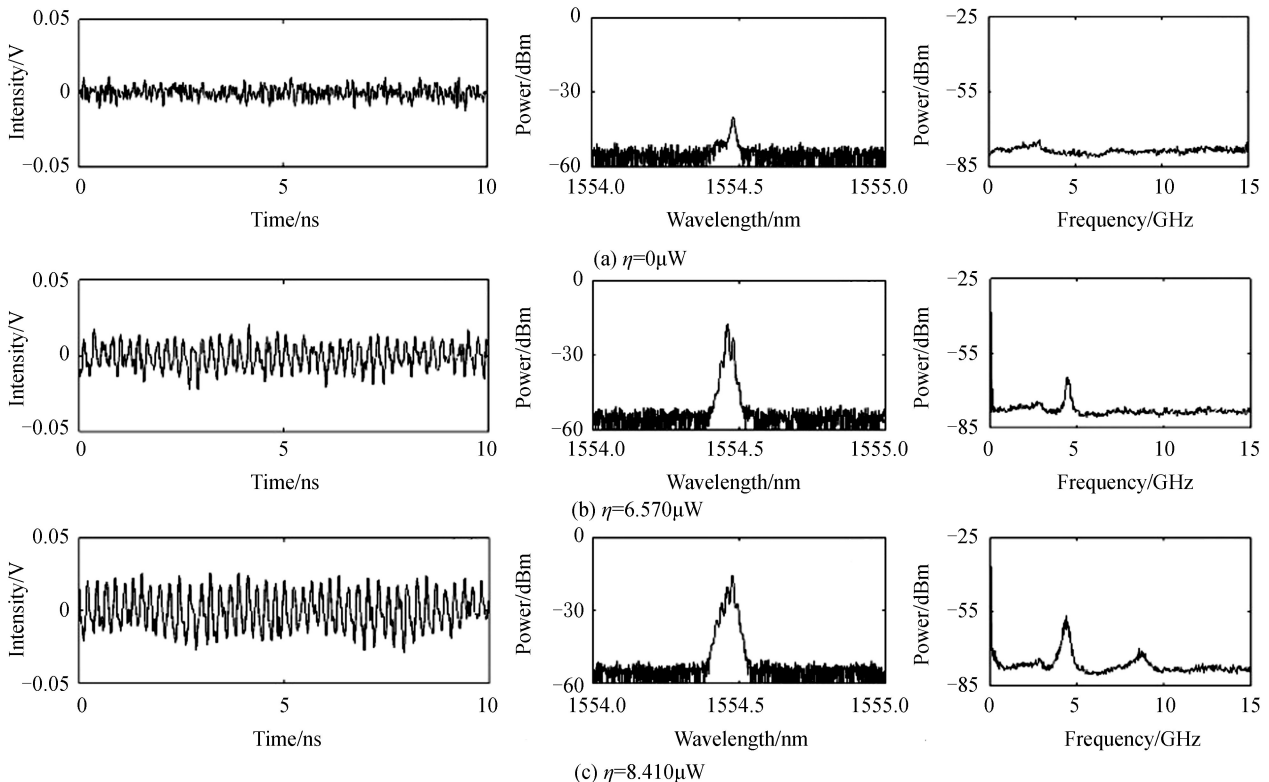


图 5 WRC-FPLD“0 模”在 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间的动力学状态分布

Fig.5 Mapping of dynamical states of “mode 0” in the WRC-FPLD in the parameter space of η and $\Delta\nu$



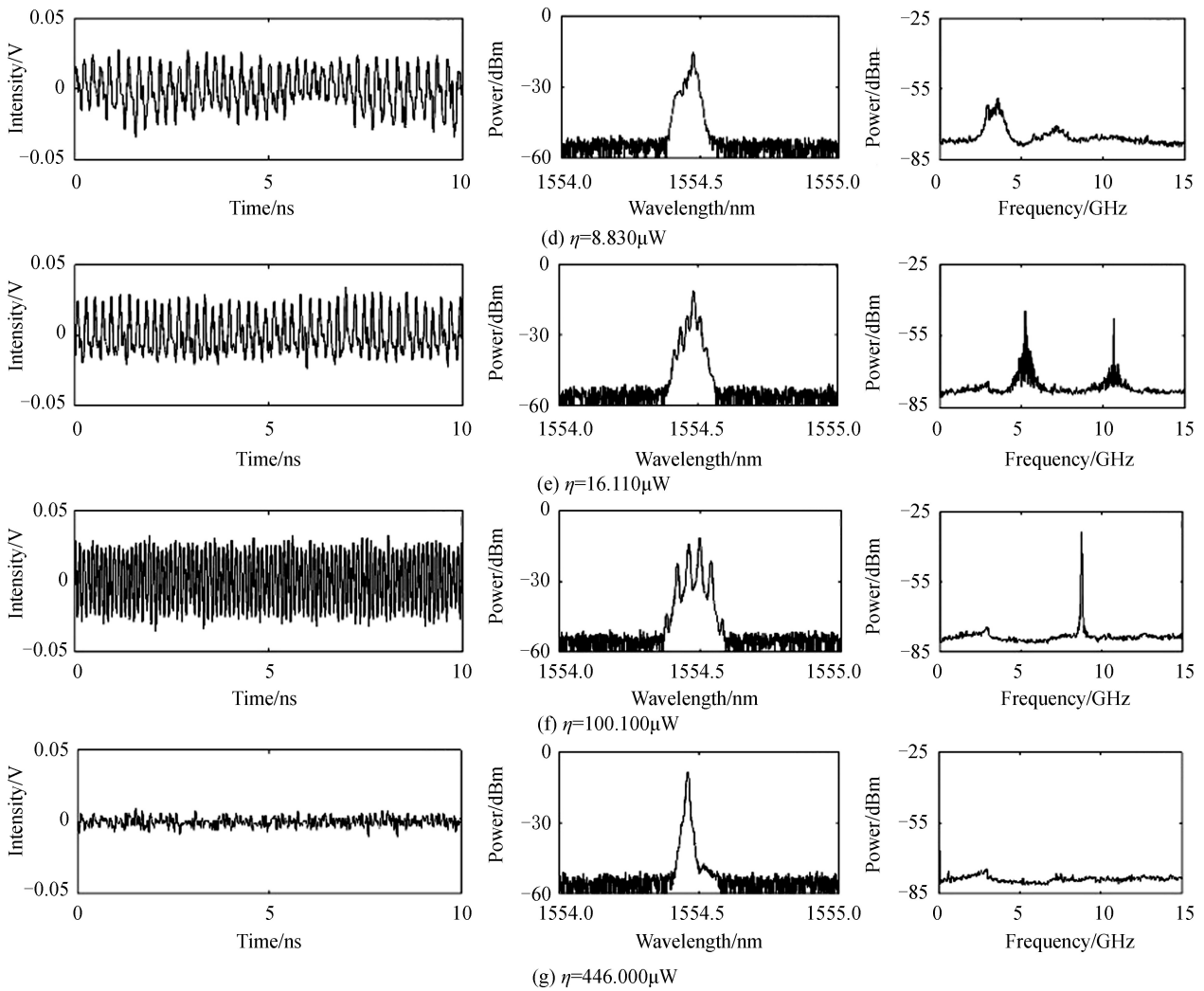


图 6 $\Delta\nu = 4$ GHz, η 取不同值时, WRC-FPLD 中“-3 模”的时间序列、光谱、功率谱

Fig.6 Time series, optical spectra and power spectra of the “mode -3” in the WRC-FPLD under $\Delta\nu = 4$ GHz and different η “-3 模”的动力学状态为单周期态(P1), 振荡基频为 8.753 GHz. 继续增加注入强度, 当 $\eta = 446.000 \mu\text{W}$ 时(如图 6(g)), 与图 4(f)相似, “-3 模”的峰值波长被推至 ML 的振荡波长处, 此时, 激光器处于一种 S&IL. 因此, “-3 模”在 $\Delta\nu = 4$ GHz 时, 通过逐渐增加光注入强度, WRC-FPLD 呈现出由 S 经过 P1、QP、C、QP、P1 再到 S&IL.

图 7 给出了 WRC-FPLD “-3 模”的动力学态在由 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间的分布图. FWM 只出现光注入强度弱的时候, 且负频率失谐区域要大于正频率失谐区域, 在正频率失谐处的 P1 区域要大于负频率失谐处的 P1 区域, C 区域很小只出现在 0 频率失谐和正频率失谐处, QP 区域比较小, S&IL 区域较大.

最后, 研究 WRC-FPLD 中“13 模”在外部光注入下的非线性动力学行为. 图 8 给出了“13 模”在 $\Delta\nu = 4$ GHz, η 取不同值时输出的时间序列、光谱、功率谱. 当 $\eta = 0 \mu\text{W}$ 时(如图 8(a)), 光谱的中心波长为

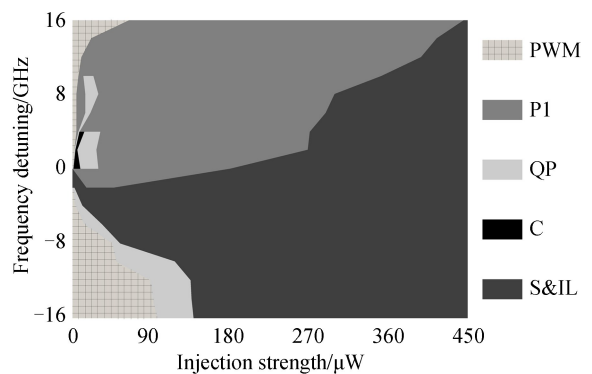


图 7 WRC-FPLD“-3 模”在 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间的动力学状态分布
Fig.7 Mapping of the dynamical states of the “mode -3” of the WRC-FPLD in the parameter space of η and $\Delta\nu$

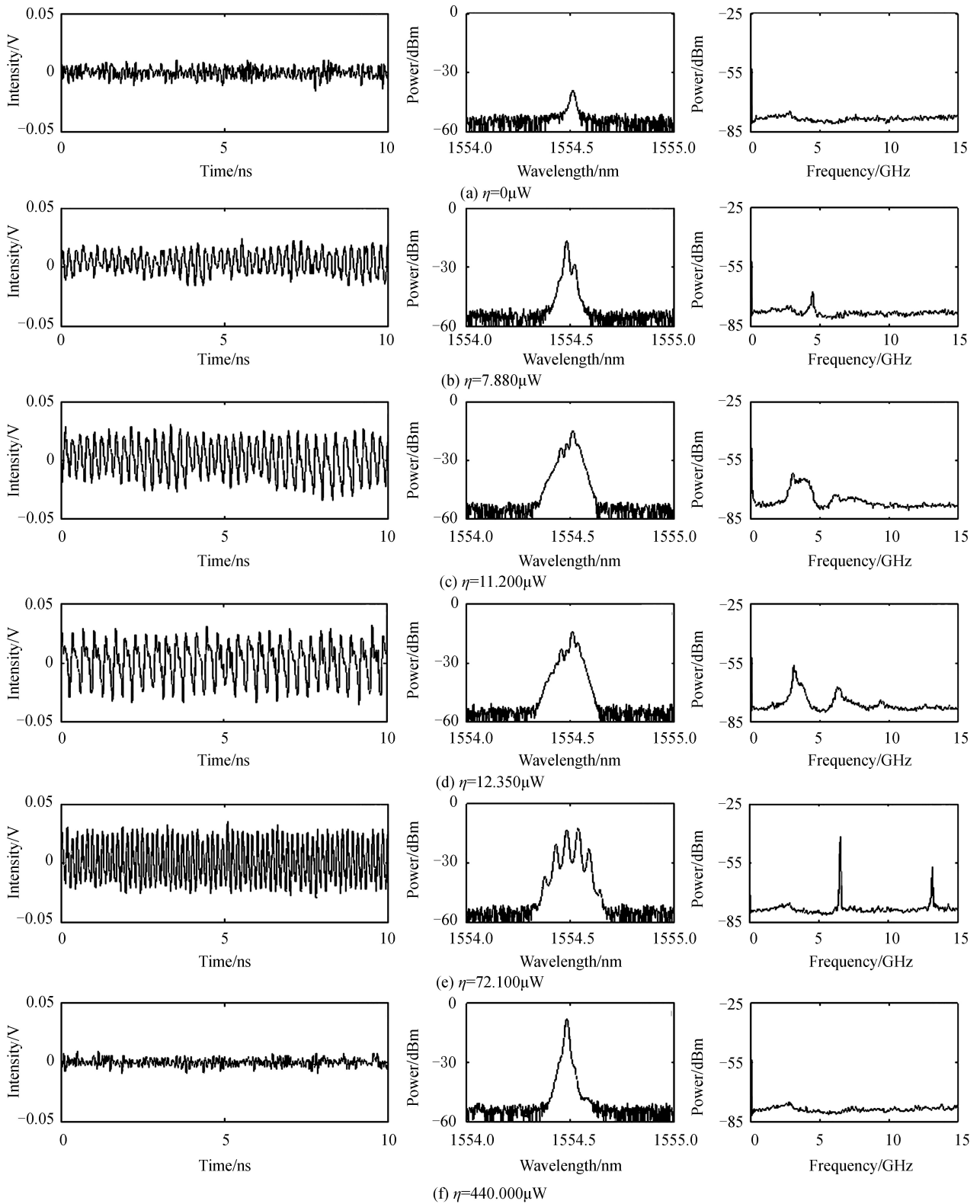


图 8 $\Delta\nu = 4$ GHz, η 取不同值时, WRC-FPLD“13 模”的时间序列、光谱、功率谱

Fig.8 Time series, optical spectra and power spectra of the “mode 13” of the WRC-FPLD under optical injection with frequency detuning $\Delta\nu=4$ GHz and different η

1 554.512 nm, 自由运行时的 WRC-FPLD“13 模”的动力学状态为 S.当 $\eta = 7.880 \mu\text{W}$ 时(如图 8(b)),该周期振荡的基频为 4.494 GHz,结合光谱可以判断此时 WRC-FPLD“13 模”的动力学状态为 P1.当 $\eta = 11.200 \mu\text{W}$ 时(如图 8(c)),此时的时间序列表现为类似噪声强度的振荡,功率谱连续且平滑,光谱被展宽,以上现象说明 WRC-FPLD“13 模”已经进入了 C.当 $\eta = 12.350 \mu\text{W}$ 时(如图 8(d)),光谱有一定的展宽,在功率谱中,基

频和它的谐波周围出现了多个互质的频率成分,说明此时 WRC-FPLD“13 模”处于 QP.当 $\eta = 72.100 \mu\text{W}$ 时(如图8(e)),激光器输出幅值和时间间隔基本相同,功率谱上显示此时振荡基频为 6.542 GHz,此时 WRC-FPLD“13 模”处于 P1.当注入强度增加到 $\eta = 440.000 \mu\text{W}$ 时(如图 8(f)),激光器输出特征与 $\eta = 0 \mu\text{W}$ 时的类似,但此时的峰值波长为 1 554.484 nm,激光器处于一种 S&IL.所以,“13 模”在 $\Delta\nu = 4 \text{ GHz}$ 时,通过逐渐增加光注入强度, WRC-FPLD 呈现出由 S 经过 P1、C、QP、P1 再到 S&IL.

图 9 给出了 WRC-FPLD“13 模”的动力学态在由 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间的分布图.负频率失谐区域的 FWM 要大于正频率失谐区域,且出现在光注入强度弱的区域,P1 区域出现在 0 频率失谐处和正频率失谐处,QP 与 C 区域的面积比较小,而 S&IL 区域非常大.

4 结论

通过测量 WRC-FPLD 中不同模式在外部光注入下所输出的时间序列、光谱、以及功率谱,对不同模式所呈现的非线性动力学状态进行了判定,在此基础上对注入强度以及频率失谐对模式的非线性动力学的影响进行了研究.研究表明:通过调节注入光的强度以及频率失谐,不同模式均可以呈现出 FWM、P1、QP、C 以及 S&IL 等丰富的非线性动力学状态.但对于 WRC-FPLD 中不同的模式而言,不同动力学态所需的参量条件存在差别:“0 模”与“13 模”在正、负频率失谐区域均可观察到混沌区,而“−3 模”在负的频率失谐区域没有出现混沌区;“0 模”存在两个分离的 S&IL 区,而在“−3 模”和“13 模”仅观测到一个 S&IL 区.因此,针对 WRC-FPLD 中的不同模式,通过改变外部光注入强度以及频率失谐,可以控制 WRC-FPLD 不同模式呈现的非线性动力学状态,以满足不同应用需求.

参考文献

- [1] LIN Gong-ru, CHENG Tzu-kang, LIN Yi-hung, *et al.* A weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode with injection-locking mode number-dependent transmission and noise performances[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(9): 1349-1355.
- [2] CHENG Min-chi, CHI Yu-chieh, LI Yi-cheng, *et al.* Suppressing the relaxation oscillation noise of injection-locked WRC-FPLD for directly modulated OFDM transmission[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 15724-15736.
- [3] PENG Guo-hsuan, CHI Yu-chieh, LIN Gong-ru, *et al.* DWDM channel spacing tunable optical TDM carrier from a mode-locked weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode based fiber ring[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 13405-13413.
- [4] LIN Gong-ru, WANG Hai-lin, LIN Gong-cheng, *et al.* Comparison on injection-locked Fabry - Perot laser diode with front-facet reflectivity of 1% and 30% for optical data transmission in WDM-PON system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(14): 2779-2785.
- [5] LIN Gong-ru, LIN Yi-hung, LIN Chun-ju, *et al.* Reusing a data-erased ASE carrier in a weak-resonant-cavity laser diode for noise-suppressed error-free transmission[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, **47**(5): 676-685.
- [6] CHI Yu-chieh, LI Yi-cheng, WANG Huai-yung, *et al.* Optical 16-QAM-52-OFDM transmission at 4 Gbit/s by directly modulating a coherently injection-locked colorless laser diode[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20071-20077.
- [7] LIN Shih-ying, CHI Yu-chieh, SU Yu-chuan, *et al.* An injection-locked weak-resonant-cavity laser diode for beyond-bandwidth encoded 10-Gb/s OOK transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 7200309.
- [8] ZHANG Jian-zhong, WANG An-bang, WANG Juan-fen, *et al.* Wavelength division multiplexing of chaotic secure and fiber-optic communications[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(8): 6357-6367.
- [9] JIANG Ning, XUE Chen-peng, LV Yun-xin, *et al.* Physically enhanced secure wavelength division multiplexing chaos communication using multimode semiconductor lasers[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, **86**(3): 1937-1949.
- [10] PAUL J, SIVAPRAKASAM S, SHORE K A. Dual-channel chaotic optical communications using external-cavity

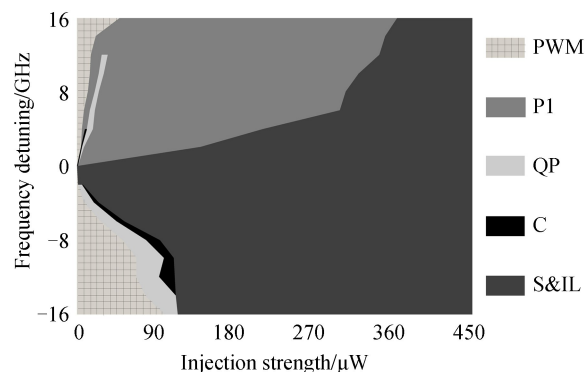


图 9 WRC-FPLD“13 模”在 η 和 $\Delta\nu$ 构成的参量空间的动力学状态分布

Fig.9 Mapping of the dynamical states of the “mode 13” of the WRC-FPLD in the parameter space of η and $\Delta\nu$

- semiconductor lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(3): 514-521.
- [11] MATSUURA T, UCHIDA A, YOSHIMORI S. Chaotic wavelength division multiplexing for optical communication [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(23): 2731-2733.
- [12] JIANG Ning, ZHANG Chong-fu, QIU Kun, *et al.* Secure passive optical network based on chaos synchronization[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(21): 4501-4503.
- [13] REGISTER F, LOCQUET A, PIEROUX D, *et al.* Secure communication scheme using chaotic laser diodes subject to incoherent optical feedback and incoherent optical injection[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(19): 1486-1488.
- [14] ABARBANEL H D I, KENNEL M B, ILLING L *et al.* Synchronization and communication using semiconductor lasers with optoelectronic feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, **37**(10): 1301-1311.
- [15] YANG Xin, CHEN Jian-jun, WU Zheng-mao, *et al.* Nonlinear dynamics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers subject to negative optoelectronic feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0814004.
杨欣, 陈建军, 吴正茂, 等. 光电负反馈下 1550 nm 垂直腔表面发射激光器的动力学特性[J]. 光子学报, 2016, **45**(8): 0814004.
- [16] LIU Jia-ming, SIMPSON T B. Four-wave mixing and optical modulation in a semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, **30**(4): 957-965.