

doi: 10.3788/gzxb20164508.0814004

光电负反馈下 1 550 nm 垂直腔表面发射激光器的动力学特性

杨欣, 陈建军, 吴正茂, 夏光琼, 黄守文, 邓涛

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 基于激光输出的时间序列、功率谱以及相图, 对 1 550 nm 垂直腔表面发射激光器(1 550 nm-VCSELs)在光电负反馈作用下的动力学特性进行了研究. 结果表明: 固定偏置电流, 在不同反馈强度下, 光电负反馈 1 550 nm-VCSEL 可呈现规则脉冲态、准周期态、混沌脉冲态等非线性动力学态; 固定反馈强度, 偏置电流取不同值时, 1 550 nm-VCSEL 也可呈现脉冲态、准周期态、混沌脉冲态等不同的非线性动力学状态. 给出了 1 550 nm-VCSEL 非线性动力学状态在偏置电流和反馈强度构成的参量空间分布. 分析了激光器的动态演化路径, 结果表明: 在较小偏置电流和弱光电反馈下, 激光器主要工作在稳态; 随着偏置电流增加, 激光器输出的动力学态通常随反馈强度的增加以规则脉冲态-准周期态-规则脉冲态的方式循环演化到混沌脉冲态; 当偏置电流增加到一定值后, 激光器输出的动力学态随反馈强度的增加主要以规则脉冲态-准周期态-混沌脉冲态的方式循环演化.

关键词: 非线性光学; 半导体激光物理; 1550 nm 垂直腔表面发射激光器; 负光电反馈; 非线性动力学

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0814004-7

Nonlinear Dynamics of 1 550 nm Vertical-cavity Surface-emitting Lasers Subject to Negative Optoelectronic Feedback

YANG Xin, CHEN Jian-jun, WU Zheng-mao, XIA Guang-qiong, HUANG Shou-wen, DENG Tao

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

Abstract: Based on the observed time series, power spectra, and phase portraits of the laser output, the nonlinear dynamics of 1 550 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (1 550 nm-VCSELs) under the negative optoelectronic feedback were investigated. The results show that, for a given bias current, 1 550 nm-VCSEL subject to negative optoelectronic feedback can exhibit rich nonlinear dynamic states such as Regular Pulsing (RP), Quasiperiodic Pulsing (QP), and Chaotic Pulsing (CP) under different feedback strength. On the other hand, for a fixed feedback strength, through adjusting the values of the bias current, diverse dynamical states can also be observed in 1 550 nm-VCSEL subject to negative optoelectronic feedback. Finally, a mapping of dynamical states was given in the parameter space of bias current and feedback strength, and the evolution routes of dynamic states were also analyzed. For the case of small bias current and weak optoelectronic feedback, the laser almost operates at stable state (S). For the case of higher bias current, the dynamical behaviors of the laser follow a repeated RP-QP-RP route to CP state. When the bias current is increased to a certain level, the dynamical behaviors of the laser follow a repeated RP-QP-CP evolution route with the increase of optoelectronic feedback strength.

Key words: Nonlinear optics; Semiconductor laser physics; 1550 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61275116, 61475127, 61575163), 重庆市自然科学基金(No. cstc2016jcyjA0082)和西南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. XDJK2014C168)资助

第一作者: 杨欣(1990-), 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: yangxin536@126.com

导师(通讯作者): 邓涛(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为基于半导体激光器的非线性动力学及其应用. Email: dengt@swu.edu.cn

收稿日期: 2016-02-24; **录用日期:** 2016-05-06

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

Lasers; Negative optoelectronic feedback; Nonlinear dynamics

OCIS Codes: 140.5960; 140.7260; 190.3100; 190.4360

0 引言

半导体激光器在光注入^[1-2]、光反馈^[3-4]和光电反馈^[5-6]等外部扰动下可呈现稳态(Stable State, S)、单周期态(Period One, P1)、二倍周期态(Period Two, P2)、规则脉冲态(Regular Pulsing, RP)、准周期脉冲态(Quasiperiodic Pulsing, QP)和混沌态(Chaotic Pulsing, CP)等丰富的非线性动力学状态.处于不同动力学状态的半导体激光器在光混沌保密通信^[7-8]、光生微波^[9-11]、激光雷达^[12]、光信号处理^[13]、光传感^[14]、测距^[15-17]和随机数产生^[18-21]等领域具有广泛的应用前景,因而半导体激光器在外部扰动下的非线性动力学特性成为相关领域的研究热点之一.研究人员已对边发射半导体激光器(Edge-Emitting Semiconductor Lasers, EELs)在光注入^[22-23]、光反馈^[24-25]和光电反馈^[26-27]等不同外部扰动下的非线性动力学特性进行了系统地研究.对垂直腔表面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs)而言,相关研究工作主要集中在光注入^[28-29]、光反馈^[30-31]这两种外部扰动作用下激光器的非线性动力学特性,而对于光电反馈作用下的VCSELs的动力学特性的研究大多基于理论研究^[32-34],相关的实验研究较少^[35].

相对于光反馈,光电反馈由于其相位不敏感特性以及电控操作的便利性使系统更灵活且可靠.而对于VCSELs而言,受限于其极高的端面反射率,采用光反馈的扰动方式难以达到较强的反馈强度.因此,在VCSELs中采用光电反馈将比光反馈更合适.本课题组曾对光电正反馈下1550 nm-VCSELs的动力学特性进行了实验研究,包括稳态(S)、规则脉冲态(RP)、准周期脉冲态(QP)、混沌脉冲态(CP)和模式锁定(Mode Locking, ML)等多种非线性动力学状态^[35].对光电正、负反馈作用下EELs非线性动力学特性的研究表明,尽管光电正反馈和光电负反馈下EELs的动力学特性具有一定的相似性,但仍然存在一些差异^[5,26,36-37].本文研究了光电负反馈下1550 nm-VCSEL的动力学特性,并将相关结果与光电正反馈条件下所得结果进行比较与分析.

1 实验装置

光电负反馈下1550 nm-VCSEL动力学态系统装置如图1,图中实线代表光路,虚线代表电路.在一台高精度、低噪声半导体激光器电流源(ILX-Lightwave, LDC-3724B)的驱动下,1550 nm-VCSEL输出光经隔离器(Isolator, ISO, 隔离度 >55 dB)后被光纤耦合器(Optical Fiber Coupler, FC)FC₁(分光比

为20:80)分成两部分:其中80%的能量经可调衰减器(Variable Attenuator, VA)VA₁后,被FC₂(分光比为10:90)再分成两部分,其中一部分经光电探测器(Photo Detector, PD)PD₁(New Focus 1544-B, 带宽为12 GHz)转换成电信号后再经过电放大器(Electronic Amplifier, EA, Agilent 83006A)反馈回1550 nm-VCSEL,另一部分输入功率计(Power Meter, PM)中用于检测光电负反馈强度.系统中所用的PD₁具有负增益,从而导致该反馈为负光电反馈,反馈强度的大小可通过VA₁进行调节;FC₁分出的另外20%的能量经过光放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)、可调衰减器VA₂、光纤耦合器FC₃后进入测试系统. FC₃分出10%的能量输入到高分辨率光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, Ando AQ6317C)中对光谱进行检测,另外90%的能量经过带宽为47 GHz的光电探测器PD₂(U2T XPDV2150R)转成电信号后被微波功率分配器(Microwave Power Divider, MPD)分成两部分,其中一部分输入带宽为26.5 GHz的微波频谱分析仪中(Electronic Spectrum Analyzer, ESA, Agilent E4407B)进行功率谱检测,而另一部分输入到采样率达80 GSa/s、带宽为16 GHz的实时示波器(Oscilloscope, OS, Agilent DSO-X91604A)中对1550 nm-VCSEL输出的时间序列进行探测.在实验过程中采用高精度电流温度源(ILX-Lightwave, LDC-3724B)为1550 nm-VCSEL提供低噪声偏置电流,并将其温度稳定在20.28 °C.

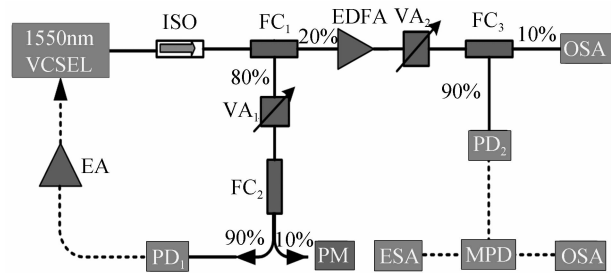


图1 实验系统

Fig.1 Experimental setup

2 实验结果与讨论

图2为实验测得的1550 nm-VCSEL自由运行时的偏振分辨 P - I 曲线和偏置电流 I 分别为5.00 mA、6.00 mA时的光谱图.图2(a)中1550 nm-VCSEL的阈值电流为1.60 mA,当 $1.60 \text{ mA} < I < 5.60 \text{ mA}$ 时,1550 nm-VCSEL中波长较短的线性偏振分量(定义 Y 偏振分量, Y -PC)振荡,而波长较长的线性偏振分量(定义 X 偏振分量, X -PC)被抑制, Y -PC与 X -PC相互正交.由于增益介质本身存在弱的各向异性,以及

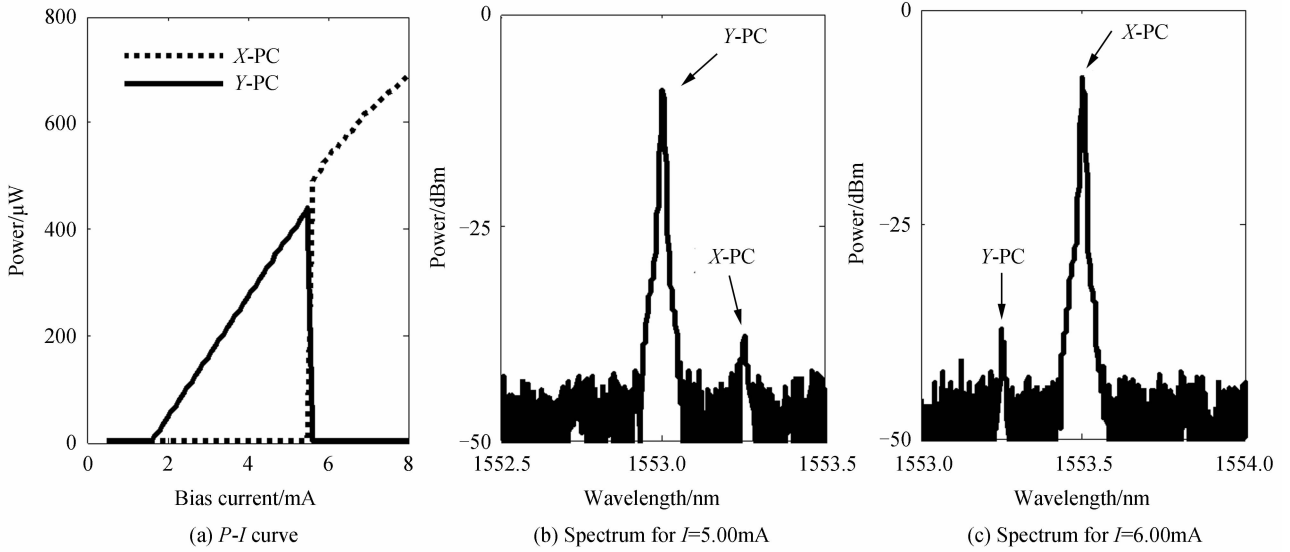

 图 2 自由运行时 1 550 nm-VCSEL 的偏振分辨 $P-I$ 曲线以及不同电流下的光谱

 Fig. 2 Polarization-resolved $P-I$ curve, and optical spectra under different biased current for a free-running 1 550 nm-VCSEL

在制作和封装过程中引入的应力,导致这两个正交的偏振分量具有不同的谐振波长^[37].在考察的电流范围内,Y-PC与X-PC的激射波长相差约为0.25 nm.当电流达到5.60 mA时,Y-PC的输出能量突然减小而X-PC的输出能量突然增加,即产生了偏振开关.继续增加激光器的偏置电流,在5.60 mA < I < 8.00 mA范围内,X-PC一直处于激射状态,而Y-PC则处于抑制状态.如图2(b),当电流 $I=5.00$ mA时,激光器输出的Y-PC功率为-8.895 dBm而X-PC的功率为-38.01 dBm,此时Y-PC占主导.而当偏置电流为6.00 mA时(如图2(c)),1550 nm-VCSEL中Y-PC的功率为-37.45 dBm和X-PC的功率为-7.839 dBm,此时X-PC起主导作用.偏置电流变化所引起的偏振开关的原因为:随着电流的增加,增益曲线以及两个偏振分量的谐振波长都会发生红移,但由于增益曲线移动更快,因此当电流增加到一定值时,位于长波端的X-PC所获得的增益将超过位于短波端的Y-PC而成为主导模式,而Y-PC则因为所获得的增益相对较小而受到抑制^[39].

在研究光电反馈1550 nm-VCSEL的动力学特性的实验系统中可控外部参量有偏置电流 I 、反馈延迟时间 τ 以及反馈强度.其中偏置电流由高准确度电流源控制,反馈延迟时间由光电反馈环路的长度决定,实验中光电反馈环路的长度保持不变,光电负反馈延迟时间约为40 ns.借鉴文献[26,35],光电反馈强度定义为进入光电反馈环路中PD₁的光功率(通过功率计PM的测定值进行估计)与自由运行1550 nm-VCSEL

输出功率的比值,其大小可通过调节VA₁进行控制.通过调节偏置电流以及反馈强度的大小,激光器可呈现不同的动力学特性.值得指出的是,由于该实验系统中所使用的光电转换器PD₁具有负增益,因此该系统为光电负反馈实验系统,为了方便,在接下来的讨论中用 ξ 表征光电负反馈的反馈强度的大小,其值为正.

图3给出了 $I=5.00$ mA、反馈强度 ξ 取不同值时光电负反馈1550 nm-VCSEL输出的时间序列(第1列)、功率谱(第2列)、和相图(第3列),功率谱中灰色线代表本征噪声.如图3(a),反馈强度 $\xi=0.1$,此时光电反馈较弱,其对1550 nm-VCSEL输出特性的影响较小,激光器仍然维持在稳态(S),其时间序列只有很小的类似噪声的波动,功率谱几乎与本征噪声谱重合,相图为聚集在0值附近的紧凑点.当反馈强度 $\xi=0.18$ 时,如图3(b),1550 nm-VCSEL输出的时间序列为一系列连续的具有近似相等峰值强度的周期脉冲,相应的功率谱显示其基频为2.66 GHz,相图呈现为相对于S态更为分散的斑点,表明此时激光器表现为规则脉冲态(RP).当反馈强度 $\xi=0.27$ 时,如图3(c),激光器输出的时间序列呈现一个明显的慢变包络,在功率谱中出现了多个互质的频率成分,相应的相图呈一个类似环状的分布,说明此时1550 nm-VCSEL处于准周期脉冲态(QP).继续增大反馈强度,当反馈强度 $\xi=0.4$ 时,如图3(d),激光器输出类似噪声的时间序列、功率谱变得连续且明显展宽、同时相图呈现弥散的斑,上述现象显示激光器此时输出为混沌脉冲态(CP).

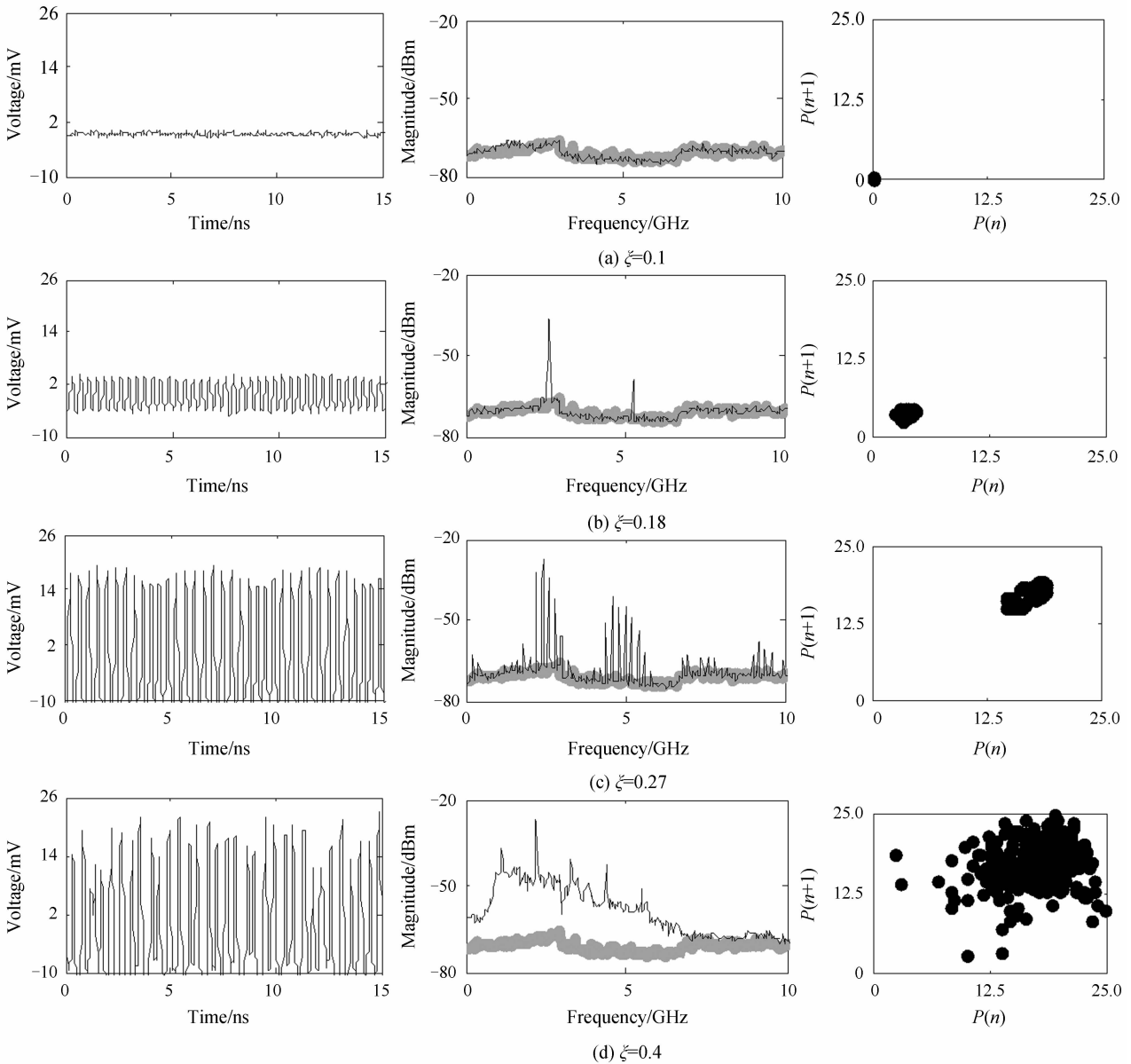


图3 $I = 5.00 \text{ mA}$, ξ 取不同值时1550 nm-VCSEL输出的时间序列、功率谱和相图

Fig. 3 Time series, power spectra, phase portraits of 1550 nm-VCSEL under the fixed bias current of 5.00 mA and different ξ

由图4可知,固定1550 nm-VCSEL偏置电流,通过调节反馈强度,可使激光器工作在不同的非线性动力学状态.图4给出了反馈强度 $\xi=0.37$,偏置电流取不同值时1550 nm-VCSEL呈现的几种典型的动力学状态,图4中功率谱里的灰色线代表本征噪声.当 $I=2.50 \text{ mA}$ 时,如图4(a),激光器的输出与图3(a)相似,此时1550 nm-VCSEL处于稳态(S).当偏置电流 $I=3.10 \text{ mA}$ 时,如图4(b),1550 nm-VCSEL处于规则脉冲态(RP),激光器输出幅值和时间间隔基本相同的脉冲,功率谱上显示此时其基频约为2.24 GHz,相图也

呈现较密集的斑点.当 $I=3.30 \text{ mA}$ 时,1550 nm-VCSEL的输出动态如图4(c),激光器输出的时间序列脉冲峰值强度受到调制,在功率谱上也观察到除基频外的多个互质的频率成分,相应相图表征为一个环状密集点分布,即激光器此时处于准周期脉冲态(QP).当电流增加到 $I=6.00 \text{ mA}$ 时,如图4(d),1550 nm-VCSEL输出为混沌脉冲态(CP),其时间序列具有混乱的幅值强度,功率谱连续且明显展宽,相应的相图呈现混乱的弥散斑.

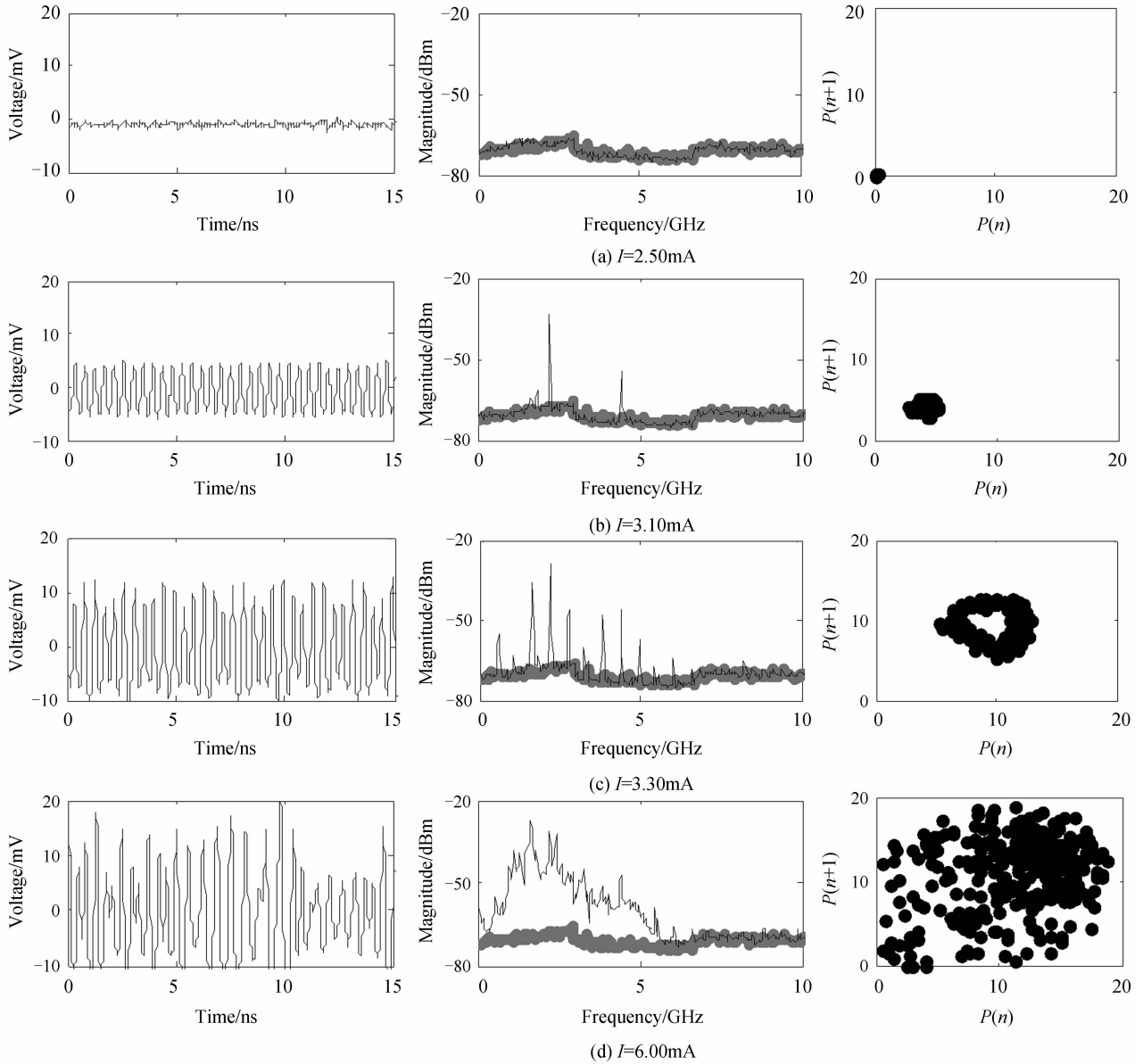


图 4 $\xi=0.37$, I 取不同值时,1550 nm-VCSEL 输出的时间序列、功率谱和相图

Fig. 4 Time series, power spectra, phase portraits of 1550 nm-VCSEL under the fixed negative optoelectronic feedback of 0.37 and different bias current I

为了更加全面地呈现反馈强度和偏置电流的大小对光电负反馈 1 550 nm-VCSEL 的动力学特性的影响,图 5 给出了实验测得的 1550 nm-VCSEL 动力学状态在由反馈强度 ξ 与偏置电流 I 所构成的参量空间的分布,图中 S 代表稳态,RP 代表规则脉冲态,QP 代表准周期脉冲态,CP 代表混沌脉冲态.由图 5 可知,在弱光电负反馈和小偏置电流下,激光器仍处于稳态(S).当 $3.52 \text{ mA} < I < 4.40 \text{ mA}$ 时,随着 ξ 的增加,1 550 nm-VCSEL 的动力学态演化路径为: S-RP-QP-RP-QP-CP.当 $4.40 \text{ mA} < I < 5.34 \text{ mA}$ 时,增加 ξ ,激光器的动力学态演化路径为: S-RP-QP-RP-QP-RP-QP-CP.当 $5.34 \text{ mA} < I < 6.09 \text{ mA}$ 时,同样增加 ξ ,激光器的动力学态演化路径为: S-RP-QP-RP-QP-CP.当 $6.09 \text{ mA} < I < 7.32 \text{ mA}$ 时,随着 ξ 的改变,1 550 nm-

VCSEL 此时的动力学态演化路径为: S-RP-QP-CP-QP-RP-QP-CP.当 $7.32 \text{ mA} < I < 8.00 \text{ mA}$ 时,此时增大 ξ ,激光器的动力学态演化路径为: S-RP-QP-CP-RP-QP-CP.由此可以看出,在偏置电流不是太大的情况下,如果所给的反馈强度不足以激发 1 550 nm-VCSEL 的混沌脉冲态(CP),它输出的动力学态通常将以 RP-QP-RP 的方式循环演化直到能够激发出混沌脉冲态(CP).当偏置电流较大时,在较小反馈强度下就能激发出激光器的混沌脉冲态(CP),且在较大的偏置电流和较大的反馈强度构成的参量空间分布中有大量的混沌脉冲态(CP)分布.上述在光电负反馈条件下所得的实验研究结果与已报道的在光电正反馈下所得的结果^[33]相比,可以看出:这两种扰动作用下,1 550nm-VCSEL 均可呈现稳态(S)、规则脉冲态(RP)、准周期

脉冲态(QP)、及混沌脉冲态(CP),但在光电负反馈实验中并没有观察到光电正反馈时模式锁定(ML)下的短脉冲状态.这是因为在光电正反馈时,反馈的电流与偏置电流相加后加载到激光器上,从而导致正的光电反馈由于增益开关效应易于驱使激光器进入脉冲状态,而输出短脉冲;而负光电反馈作用时,偏置电流与反馈电流相减后加载到激光器上,从而对激光器弛豫振荡的后续起到抑制作用,因此未观测到短脉冲输出状态.这与EELs在正、负光电反馈作用下所体现的非线性动力学特性差异是相似的^[5,26].另外,在光电正反馈作用下1550 nm-VCSEL动力学态存在一个特殊的区域——不确定区域,在该区域系统输出特性不稳定,而在光电负反馈条件下未观测到.这可能是因为正光电反馈相对于负光电反馈而言激光器被加载了更大的电流而导致激光器中高阶模式得到激发而引起模式竞争,但深入的原因还需做进一步探索.

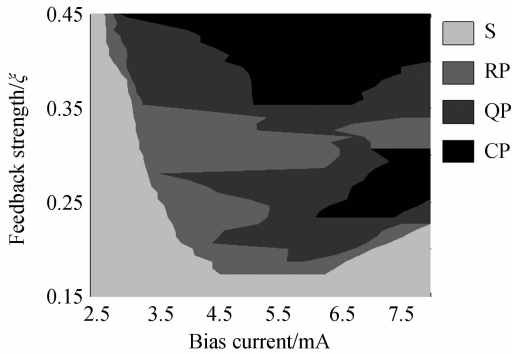


图5 光电负反馈1550 nm-VCSEL非线性动力学状态在由偏置电流与反馈强度构成的参量空间的分布

Fig. 5 Mapping of the dynamical state of 1550 nm-VCSEL in the parameter space of negative optoelectronic feedback and bias current

3 结论

基于实验测得的不同参量条件下光电负反馈1550 nm-VCSEL输出的时间序列、功率谱、以及相图,对1550 nm-VCSEL的动力学状态进行了研究.结果表明:在光电负反馈条件下,通过改变反馈强度和偏置电流,1550 nm-VCSEL可呈现出规则脉冲(RP)、准周期(QP)、以及混沌脉冲(CP)等非线性动力学状态.基于实验结果,绘制了光电负反馈1550 nm-VCSEL输出动力学态在反馈强度与偏置电流构成的参量空间的分布图谱,确定了各动力学状态所需的参量范围.在偏置电流不是太大的情况下,如果所给的反馈强度不足以激发1550 nm-VCSEL的混沌脉冲态(CP),它输出的动力学态通常将以RP-QP-RP的方式循环演化直到能够激发出混沌脉冲态(CP).当偏置电流较大时,在较小反馈强度下就能激发出激光器的混沌脉冲态(CP),且在较大的偏置电流和较大的反馈强度构成的

参量空间分布中有大量的混沌脉冲态(CP)分布.最后,将所得结果与正光电反馈条件下所得的相关结果进行了比较,并分析了存在差异的物理原因.本文的研究结果对准确控制光电负反馈1550 nm-VCSELs的动力学状态及其在相关领域的应用具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] HWANG Sheng-kwang, LIU Jia-ming. Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser[J]. *Optics Communication*, 2000, **183**(1): 195-205.
- [2] AL-SEYAB R, SCHIRES K, HURTADO A, *et al.* Dynamics of VCSELs subject to optical injection of arbitrary polarization [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1700512.
- [3] MORK J, TROMBORG B, MARK J. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: Theory and experiment [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(1): 93-108.
- [4] QADER A A, HONG Yan-hua, SHORE K A. Circularly polarized optical feedback effects on the polarization of VCSEL emission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(14): 1200-1202.
- [5] TANG Shuo, LIU Jia-ming. Chaotic pulsing and quasi-periodic route to chaos in a semiconductor laser with delayed optoelectronic feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, **37**(3): 329-336.
- [6] LIAO Jian-fei, SUN Jun-qiang. Polarization dynamics and chaotic synchronization in unidirectionally coupled VCSELs subjected to optoelectronic feedback[J]. *Optics Communications*, 2013, **295**: 188-196.
- [7] DENG Tao, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao, *et al.* Chaos synchronization in mutually coupled semiconductor lasers with asymmetrical bias currents[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 8762-8773.
- [8] LIU Ying-ying, PAN Wei, JIANG Ning, *et al.* Properties of isochronal chaos synchronization of semiconductor lasers with multiple mutual time-delayed couplings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1023-1027.
刘莹莹, 潘炜, 江宁, 等. 多延时互耦合半导体激光器的实时混沌同步特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1023-1027.
- [9] ZHANG Ming-jiang, LIU Tie-gen, LI Jing-xia, *et al.* Effects of linewidth enhancement factor on the nonlinear period-one oscillation of a semiconductor laser with external optical injection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 542-546.
张明江, 刘铁根, 李静霞, 等. 线宽增强因子对外光注入半导体激光器非线性单周期振荡特性的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 542-546.
- [10] CHAN Sze-chun, HWANG Sheng-kwang, LIU Jia-ming. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14921-14935.
- [11] JUAN Yu-shan, LIN Fan-yi. Microwave-frequency-comb generation utilizing a semiconductor laser subject to optical pulse injection from an optoelectronic feedback laser[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(11): 1636-1638.
- [12] WU Wen-ting, LIAO Yi-huan, LIN Fan-yi. Noise suppressions in synchronized chaos lidars[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26155-26162.
- [13] HURTADO A, HENNING I D, ADAMS M J. Optical neuron using polarisation switching in a 1550nm-VCSEL[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(24): 25170-25176.

- [14] YAN Sen-lin. Period-one characteristic in an optoelectronic delayed feedback semiconductor laser and its application in sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(4): 040401-040401.
- [15] WANG Zi-nan, FAN Meng-qiu, ZHANG Lei, *et al.* Long-range and high-precision correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all-fiber chaotic source[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(12): 15514-15520.
- [16] WANG Yun-cai, WANG Bing-jie, WANG An-bang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1636-1638.
- [17] ZHANG Ming-jiang, JI Yong-ning, ZHANG Yong-ning, *et al.* Remote radar based on chaos generation and radio over fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(5): 1-12.
- [18] UCHIDA A, AMANO K, INOUE M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(12): 728-732.
- [19] WANG An-bang, LI Pu, ZHANG Jian-zhong, *et al.* 4.5 Gbps high-speed real-time physical random bit generator[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 20452-20462.
- [20] TANG Xi, WU Zheng-mao, WU Jia-gui, *et al.* Tbits/s physical random bit generation based on mutually coupled semiconductor laser chaotic entropy source [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(26): 33130-33141.
- [21] WANG Li-jun, NING Yong-qiang, QIN Li, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, **36**(1): 1-19.
- [22] SIMPSON T B. Mapping the nonlinear dynamics of a distributed feedback semiconductor laser subject to external optical injection[J]. *Optics Communications*, 2003, **215**(1): 135-151.
- [23] KONG Hui-jun, WU Zheng-mao, WU Jia-gui, *et al.* Experimental observations on the nonlinear behaviors of DFB semiconductor lasers under external optical injection [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2008, **36**(1): 18-24.
- [24] HEIL T, FISCHER I, ELSÄSSER W, *et al.* Delay dynamics of semiconductor lasers with short external cavities: Bifurcation scenarios and mechanisms[J]. *Physical Review E*, 2003, **67**(6): 066214.
- [25] WU Jia-gui, XIA Guang-qiong, TANG Xi, *et al.* Time delay signature concealment of optical feedback induced chaos in an external cavity semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(7): 6661-6666.
- [26] LIN Fan-yi, LIU Jia-ming. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(4): 562-568.
- [27] XIA Guang-qiong, CHAN Sze-chun, LIU Jia-ming. Multistability in a semiconductor laser with optoelectronic feedback[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 572-576.
- [28] AL-SEYAB R, SCHIRES K, KHAN N A, *et al.* Dynamics of polarized optical injection in 1550-nm VCSELs: theory and experiments [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(5): 1242-1249.
- [29] HURTADO A, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Nonlinear dynamics induced by parallel and orthogonal optical injection in 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9423-9428.
- [30] PANAJOTOV K, SCIAMANNA M, ARTEAGA M A, *et al.* Optical feedback in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1700312-1700312.
- [31] TAN Jian-feng, ZHANG Sheng-hai, WANG Wei, *et al.* Chaotic dynamic behaviors of vertical cavity surface emitting laser with delayed optical feedback [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 272-276.
谭建锋, 张胜海, 王伟, 等. 延迟光反馈 VCSEL 的混沌动力学特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 272-276.
- [32] ZHANG Wei-li, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Theoretical study on polarization dynamics of VCSELs with negative optoelectronic feedback[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(29): 7262-7266.
- [33] HE Yang, DENG Tao, QIU Hai-ying, *et al.* Nonlinear dynamics of optical injected VCSELs subject to optoelectronic feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0114002.
何洋, 邓涛, 邱海英, 等. 光电反馈下光注入 VCSELs 的动力学特性[J]. *光子学报*, 2016, **45**(1): 0114002.
- [33] LI Xiu-shan, NING Yong-qiang, CUI Jin-jiang, *et al.* Vertical external cavity surface emitting laser with dielectric film integrated on substrate [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 572-576.
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 介质膜集成衬底垂直外腔面发射激光器[J]. *发光学报* 2015, **36**(5): 572-576.
- [34] LI Xiu-shan, NING Yong-qiang, CUI Jin-jiang, *et al.* Vertical external cavity surface emitting laser with dielectric film integrated on substrate [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 572-576.
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 介质膜集成衬底垂直外腔面发射激光器[J]. *发光学报* 2015, **36**(5): 572-576.
- [35] XIE Yi-yuan, WU Zheng-mao, DENG Tao, *et al.* Nonlinear dynamics of 1550-nm VCSELs subject to positive optoelectronic feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(16): 1605-1608.
- [36] DAMEN T C, DUGUAY M A. Optoelectronic regenerative pulser[J]. *Electronics Letters*, 1980, **16**(5): 166-167.
- [37] LEE C H, SHIN S Y, LEE S Y. Optical short-pulse generation using diode lasers with negative optoelectronic feedback[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(6): 464-466.
- [38] DENG Tao, WU Zheng-mao, XIE Yi-yuan, *et al.* Impact of optical feedback on current-induced polarization behavior of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(16): 3833-3837.
- [39] DANCKAERT J, NAGLER B, ALBERT J, *et al.* Minimal rate equations describing polarization switching in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Optics Communications*, 2002, **201**(1): 129-137.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(Nos. 61275116, 61475127, 61575163), the Natural Science Foundation of Chongqing City(No. cstc2016jcyjA0082) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. XDJK2014C168)