

doi:10.3788/gzxb20184707.0714002

平行光注入多横模 1 550 nm 垂直腔面发射激光器的非线性动力学实验研究

杨文艳^{1,2}, 夏光琼¹, 侯玉双^{1,3}, 蒋再富¹, 邓涛¹, 吴正茂¹

(1 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2 重庆科技学院 数理学院, 重庆 401331)

(3 内蒙古科技大学 理学院, 内蒙古自治区 包头 014010)

摘 要: 实验研究了平行光注入下多横模 1 550 nm 垂直腔面发射激光器(1 550 nm-VCSEL)输出的非线性动力学特性. 对于一个在自由运行时腔内同时存在基横模和一阶横模(高阶模)的 1 550 nm-VCSEL, 其两横模的主激励模均为 Y 偏振模式(Y-LP), 当受到偏振方向沿自由运行时主激励模式偏振方向的外部光注入(即平行注入)时, 实验研究结果表明: 当平行注入光的频率 ν_{inj} 更临近基横模 Y-LP 频率 ν_{ly} 时(此时频率失谐 $\Delta\nu_f$ 定义为 $\Delta\nu_f = \nu_{inj} - \nu_{ly}$), 在注入光强度 P_{inj} 增加的过程中, 基横模 Y-LP 呈现多种动力学状态, 而高阶模 Y-LP 出现的动力学状态相对较少, 且能量逐渐减小. 当 P_{inj} 增加到一定值时, 高阶模 Y-LP 完全被抑制, 此时 1 550 nm-VCSEL 处于单模工作状态, 即实现了基横模 Y-LP 的模式选择. 随 $\Delta\nu_f$ 的逐渐增加, 实现基横模 Y-LP 模式选择所需的最小注入光强度 $P_{inj, min}$ 先减小, 达到一个最小值后再逐渐增加; 在给定的 $\Delta\nu_f$ 条件下, $P_{inj, min}$ 随偏置电流 I 增加而增大. 当平行注入光的频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 的频率 ν_{hy} 时(此时频率失谐 $\Delta\nu_h$ 定义为 $\Delta\nu_h = \nu_{inj} - \nu_{hy}$), 在 P_{inj} 增加的过程中, 高阶模 Y-LP 和基横模 Y-LP 均呈现出多种非线性动力学状态, 但实验过程中未观察到基横模 Y-LP 完全被抑制的现象, 即未实现高阶模 Y-LP 的模式选择.

关键词: 垂直腔面发射激光器; 多横模; 平行光注入; 非线性动力学; 模式选择

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0714002-9

Experimental Investigation on Nonlinear Dynamics of a Multi-transverse Mode 1 550 nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser Subject to Parallel Optical Injection

YANG Wen-yan^{1,2}, XIA Guang-qiong¹, HOU Yu-shuang^{1,3},
JIANG Zai-fu¹, DENG Tao¹, WU Zheng-mao¹

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

(2 School of Mathematics and Physics, Chongqing University of Science and Technology,
Chongqing 401331, China)

(3 School of Science, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou,
Inner Mongolia Autonomous Region 014010, China)

Abstract: The nonlinear dynamics of a multi-transverse mode 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (1550 nm-VCSEL) under parallel optical injection is experimentally investigated. For a free-running 1550 nm-VCSEL biased at a suitable current, the fundamental and high-order modes can oscillate simultaneously and dominantly operate at the Y Linear Polarizations (Y-LPs). After introducing a

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61475127, 61575163, 61674123, 61775184)资助

第一作者: 杨文艳(1978—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为垂直腔面发射激光器横模特性. Email: swyangwy@163.com

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

收稿日期: 2018-02-06; 录用日期: 2018-03-16

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

Continuous Wave (CW) injection with the polarized direction along Y-LP of the free-running 1 550 nm-VCSEL (named as parallel optical injection), two different scenarios have been investigated experimentally, namely the frequency of injected CW (ν_{inj}) is close to the fundamental transverse mode frequency (ν_{fy}) (the frequency detuning is defined as $\Delta\nu_f = \nu_{inj} - \nu_{fy}$) or the high-order transverse mode frequency (ν_{hy}) (the frequency detuning is defined as $\Delta\nu_h = \nu_{inj} - \nu_{hy}$). For the first case, the results show that, during the process of continuously increasing injection power (P_{inj}), the fundamental mode undergoes diverse dynamical states, but less dynamical states are observed for the high-order mode. With the increase of P_{inj} , the output power of the high-order mode is decreased gradually. For a strong enough P_{inj} , the high-order mode can be totally suppressed and therefore the laser operates at single transverse mode, i. e. the mode selection for the fundamental mode achieves. With the increase of $\Delta\nu_f$, the minimal injection power required for achieving the fundamental transverse mode selection ($P_{inj,min}$) decreases firstly, after reaches a minimum, and then increases. The larger the biased current, the larger the value of $P_{inj,min}$. For the second case, during the process of increasing P_{inj} , both high-order mode and fundamental transverse mode undergo multiple dynamical states. However, the phenomena that the fundamental transverse mode is suppressed has not been observed, i. e. the mode selection for high-order mode cannot be realized.

Key words: Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs); Multi-transverse mode; Parallel optical injection; Nonlinear dynamics; Mode selection

OCIS Codes: 140.7260; 190.4360; 190.4223; 130.4310

0 引言

外部扰动下半导体激光器的非线性动力学现象^[1-3]已被广泛研究,其中外部光注入因可实现半导体激光器的注入锁定、线宽压缩、频率啁啾抑制、混沌带宽增强以及抑制时延特性等多种功能而倍受关注^[4-5].特别地,光注入半导体激光器所呈现的单周期态、混沌、模式跳变、双稳^[6-8]等非线性动力行为已在光生微波、保密通信、物理随机数产生以及信息存储等技术领域展现应用前景^[9-13].

根据半导体激光器有源区的特点可以分为边发射激光器(Edge-Emitting Lasers, EELs)和垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs).与 EELs 相比,VCSELs 具有低阈值电流、单纵模工作、圆形光束输出、制作成本低、易于二维集成^[14-15]等诸多优点,在光互联、光存储及光通信领域具有广阔的应用前景^[16-17].近年来,对偏置电流相对较低、自由运行工作在单横模(基横模)状态的 VCSELs 已开展了广泛的研究^[18-20].由于空间烧孔效应^[21],较高偏置电流下的 VCSELs 将激射高阶模,从而导致 VCSELs 工作在多横模状态^[22].目前,关于光注入多横模 VCSELs 的工作特性已有一些报道^[23-25].如:Hong 等人研究了连续光注入下的 850 nm-VCSEL 的工作特性,结果显示:对于自由运行工作在基横模和高阶模、且两模式偏振方向正交的 850 nm-VCSEL,通过采用偏振沿基横模(或者高阶模)方向的连续光注入,可实现基横模(或者高阶模)的模式选择,使激光器工作在单横模状态^[6];Quirce 等人研究了多横模 1550 nm-VCSEL 在光注入下的工作特性,所得结果显示:对于自由运行时腔内存在偏振方向一致的基横模与高阶模的多横模 1 550 nm-VCSEL,通过引入与两横模方向一致的连续光注入后,可实现基横模(或者高阶模)的模式选择^[25].我们注意到,上述相关研究大多集中在通过引入光注入以实现 1 550 nm-VCSEL 的单横模工作,然而很少关注各横模的输出动力学特性.基于此,本文将研究多横模工作下的 1 550 nm-VCSEL 在平行光注入下,输出的各模式动力学特性随注入参量条件的变化情况.

1 实验装置

研究平行光注入多横模 1 550 nm-VCSEL 非线性动力学的实验系统装置如图 1 所示.可调谐半导体激光器 T-SL (Santec TSL-710)输出的光经过可调衰减器(VA 1)、偏振控制器(Polarization Controller, PC)和环形器(Optical Circulator, OC)后被光纤耦合器 1 (Fiber Coupler 1, FC 1,分光比为 10:90)分为两部分:其中 10%的能量进入光功率计(Power Meter, PM),用于检测注入光强度;另外 90%的能量被注入多横模 1 550 nm-VCSEL,PC 用于调节注入光的偏振方向,使其与多横模 1 550 nm-VCSEL 自由运行时主激射模式偏振方向一致,即实现平行光注入.高精度温度电流控制源(ILX-Lightwave LDC-3724C)为多横模

1 550 nm-VCSEL提供低噪音偏置电流,并将其温度稳定在 21.20 °C.多横模 1 550 nm-VCSEL 输出的连续光经过 OC 后被 FC 2 再分成两部分:其中 10%的能量进入高分辨率(20 MHz)光谱分析仪(OSA, Aragon Photonics BOSA lite+);另外 90%的能量经过光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)滤波器、掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Application Amplifier, EDFA)后,由 FC 3 再分为两部分:80%的能量经过 VA 2,由 47 GHz 带宽的光电探测器(PD 1, U2T XPDV2150R)转成电信号后输入 26.5 GHz 带宽的电谱分析仪(ESA, Agilent E4407B),另外 20%的能量经过 VA 3,由 12 GHz 带宽的光电探测器(PD 2, New Focus 1544-B)转成电信号后输入 16 GHz 带宽的数字示波器(OSC, Agilent DSO-X91604A, 80 Gbit/s 采样速率).FBG 滤波器的中心波长可调谐范围是 1 544 nm~1 556 nm,滤波器的 3 dB 带宽为 0.28 nm,用于选择不同的模式进行探测.其中,VA 2、VA 3 用于将输入到 PD 的光强度控制在 PD 所要求的范围内.

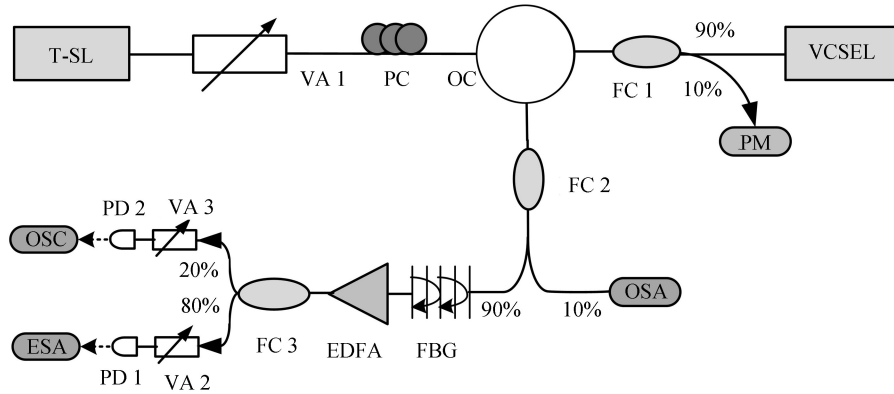


图 1 实验系统结构
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2 实验结果与分析

图 2 为实验测得的 1 550 nm-VCSEL 自由运行时的 $P-I$ 曲线及偏置电流 I 为 9.50 mA 时的光谱和横向模式分布图.由图 2(a)可知,该激光器的阈值电流 $I_{th}=3.52$ mA,此时基横模开始激射.实验中,随着偏置电流 I 增加,输出基横模功率逐渐增大,当 I 增加到 7.11 mA 时,一阶横模(高阶模)达到阈值条件而开始激射,两横模的主激射模均为 Y 偏振模式(Y Linear Polarization, Y-LP);图 2(b)中两个峰值分别对应 $I=9.50$ mA 时基横模 Y-LP(位于 1 548.241 nm)和高阶模 Y-LP(位于 1 547.473 nm),插图对应于基横模 Y-LP 和高阶模 Y-LP 的模式分布.由于两横模的偏振分量 X-LP 能量较低,在光谱中未观察到.

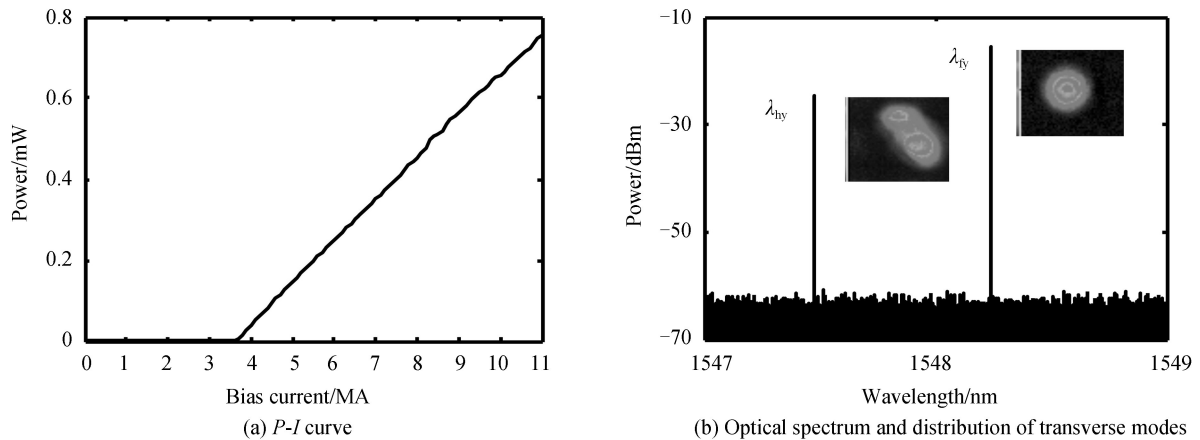


图 2 VCSEL 自由运行的 $P-I$ 曲线和偏置电流为 9.50 mA 时的光谱及模式分布图
Fig.2 $P-I$ curve of a free-running VCSEL, optical spectrum and distribution of transverse modes for $I=9.50$ mA

首先,讨论平行注入的连续光频率 ν_{inj} 更靠近基横模 Y-LP 频率 ν_{ly} 的情形,此时频率失谐 $\Delta\nu_f$ 定义为: $\nu_f = \nu_{inj} - \nu_{ly}$.图 3 给出了激光器偏置电流 I 为 9.50 mA,而 $\Delta\nu_f = -4$ GHz、注入强度 P_{inj} 取不同值时 1 550 nm-VCSEL 输出的光谱(第一列)、基横模 Y-LP 的功率谱(第二列)以及基横模 Y-LP 的时间序列(第

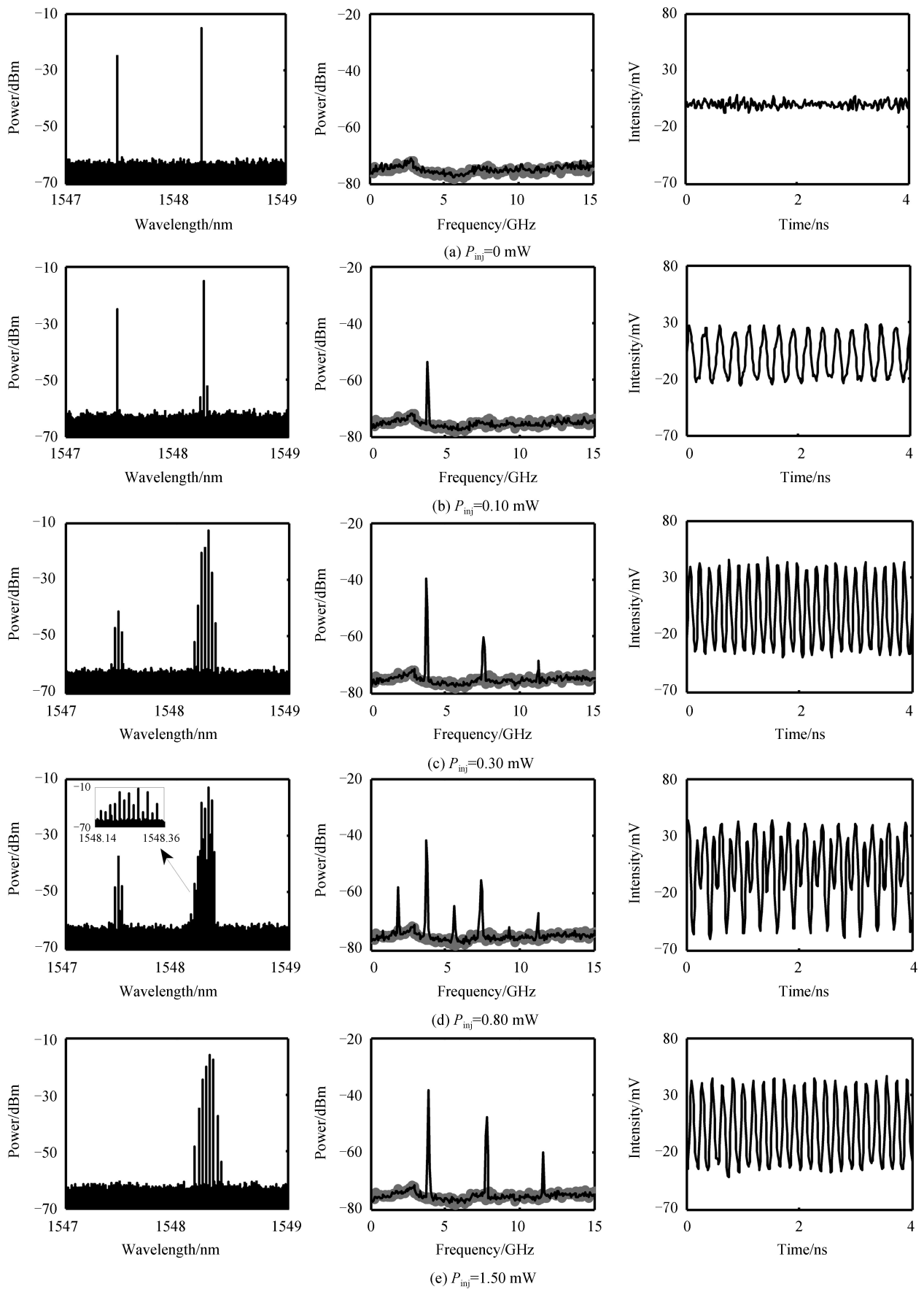


图3 不同注入强度下,VCSEL 输出的光谱、基横模 Y-LP 的功率谱与时间序列

Fig.3 Optical spectra, power spectra and time series of the VCSEL under different P_{inj}

三列)。图 3(a)为注入功率 $P_{inj} = 0$ (即自由运行)的情形,此时激光器工作在多横模状态,且基横模和高阶模均为稳态。当 $P_{inj} = 0.10$ mW (如图 3(b)所示),此时相对较弱的注入光与基横模 Y-LP 发生相互作用而产生四波混频(Four Wave Mixing, FWM)现象;而高阶模 Y-LP 频率与注入光频率失谐较大,因此高阶模 Y-LP 几乎不受注入光影响,依然工作在稳态。当 $P_{inj} = 0.30$ mW 时(如图 3(c)所示),基横模 Y-LP 的动态发生变化,光谱显示出基横模 Y-LP 的峰值波长被注入光锁定,且新增加一些间隔为 3.80 GHz 的谱线,结合功率谱和时间序列可以看出,功率谱的基频位于 3.80 GHz (对应激光器的弛豫振荡频率)处,时间序列的峰值呈现周期变化,此时基横模 Y-LP 呈现单周期(P1)态;由于高阶模和基横模共用载流子,受基横模的影响,高阶模 Y-LP 也呈现单周期振荡。当 $P_{inj} = 0.80$ mW (如图 3(d)所示),光谱中明显增加了新的谱线(与图 3(c)中的光谱相比)且相邻间隔为 1.90 GHz;同时,功率谱中也增加了周期性频率成分,在基频的一半处出现了次谐波频率;结合时间序列可判定基横模 Y-LP 呈倍周期(P2)态,但高阶模 Y-LP 仍然呈现 P1 态。当 $P_{inj} = 1.50$ mW 时(如图 3(e)所示),基横模 Y-LP 再次呈现 P1 态,而高阶模 Y-LP 被完全抑制,即 1 550 nm-VCSEL 处于单模工作状态,即实现了基横模 Y-LP 模式选择。继续增加注入强度,高阶模 Y-LP 一直处于被抑制状态。

对于频率失谐 $\Delta\nu_f = -4$ GHz 的情形,从光谱中未发现偏振方向与基横模 Y-LP 正交的基横模 X-LP。进一步的实验研究显示:当选取合适的 $\Delta\nu_f$,与基横模 Y-LP 平行的连续光注入将有可能激发基横模 X-LP。图 4 给出了偏置电流 I 为 9.50 mA,频率失谐 $\Delta\nu_f$ 为 -12 GHz 时,不同注入强度 P_{inj} 下多横模 1 550 nm-VCSEL 输出的光谱。当 $P_{inj} = 0.60$ mW (图 4(a)),此时基横模 Y-LP 呈现 P1 态,振荡频率为 13.13 GHz,而高阶模 Y-LP 依然呈现稳态,但强度有所降低;当 $P_{inj} = 1.00$ mW 时(图 4(b)),基横模 Y-LP 仍然处于 P1 态,但其频率增加到 14.25 GHz;当 $P_{inj} = 1.50$ mW 时(图 4(c)),基横模 Y-LP 仍然呈现 P1 态,频率为 14.50 GHz,此时在波长 1 548.515 nm 处可以观察到一个相对较弱的峰,通过分析,可以判定该谱线对应于基横模 X-LP;当 $P_{inj} = 3.00$ mW 时(图 4(d)),基横模 Y-LP 与 X-LP 强度相差不大,即出现共存现象;当注入光强度 $P_{inj} = 3.30$ mW 时(图 4(e)),基横模 Y-LP 被注入光锁定,同时 X-LP 具有较大的输出功率,即出现偏振开关注入锁定(PS+IL)现象;当 $P_{inj} = 3.90$ mW 时(图 4(f)),1 550 nm-VCSEL 中基模 Y-LP 被注入光完全锁定,高阶模 Y-LP、基模 X-LP 均被完全抑制,此时多横模 1 550 nm-VCSEL 在单模状态下工作,即实现了基横模 Y-LP 模式选择。

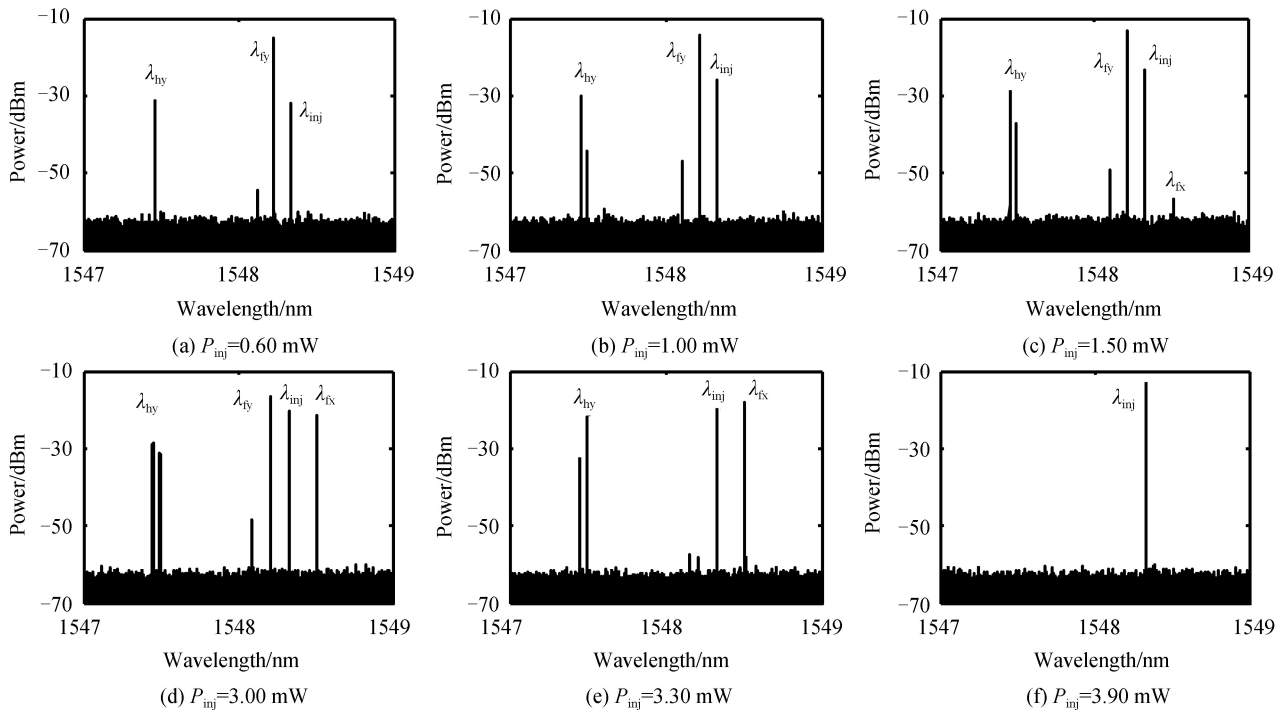


图 4 不同注入强度下,VCSEL 输出的光谱
Fig.4 Optical spectra of the VCSEL under different P_{inj}

以上结果显示:频率失谐 $\Delta\nu_f$ 取不同值时,平行光注入 1 550 nm-VCSEL 的动力学特性随注入强度的变化规律不同,实现基横模 Y-LP 模式选择所需最小注入光强度 $P_{inj, min}$ 也存在差异.图 5 给出了不同偏置电流 I 下,平行光注入实现基横模 Y-LP 模式选择所需最小注入光强度 $P_{inj, min}$ 随 $\Delta\nu_f$ 的变化关系.从图中可以看出:对于给定的偏置电流,随着频率失谐 $\Delta\nu_f$ 从 -15 GHz 逐渐增加到 10 GHz, $P_{inj, min}$ 呈现先减小,在达到一个最小值后再逐渐增加的趋势; $P_{inj, min}$ 达到最小值均出现在负频率失谐区域.究其原因,频率失谐越小 $P_{inj, min}$ 越小是很好理解的,而之所以 $P_{inj, min}$ 达到最小值均出现在负频率失谐区域是由于注入光会导致激光器激射波长发生红移所引起的.由于注入光所引起的效应取决于注入光强度与自由运行的激光器的输出光强度的相对比值的大小,而自由运行的 VCSELs 的输出强度随着偏置电流的增加而增加,导致相同强度的注入光所引起的注入效应随着偏置电流的增加而逐渐减弱.因此,偏置电流越大,注入引起激光器激射波长的红移量越小,从而 $P_{inj, min}$ 的最小值对应的失谐频率也越小.另外,随偏置电流 I 增加,高阶横模的输出功率增大,因此在相同的频率失谐下,偏置电流 I 越大 $P_{inj, min}$ 也越大.

接下来,讨论平行注入光的频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 频率 ν_{hy} 的情形,此时频率失谐为 $\Delta\nu_h$,其定义为 $\Delta\nu_h = \nu_{inj} - \nu_{hy}$.图 6 给出了电流偏置 I 为 9.50 mA 的多横模 1 550 nm-VCSEL 在 $\Delta\nu_h = -4$ GHz 的连续光平行注入下, P_{inj} 取不同值时输出的光谱.图 6(a) 对应 $P_{inj} = 0.60$ mW 的情形,此时高阶模 Y-LP 呈现单周期

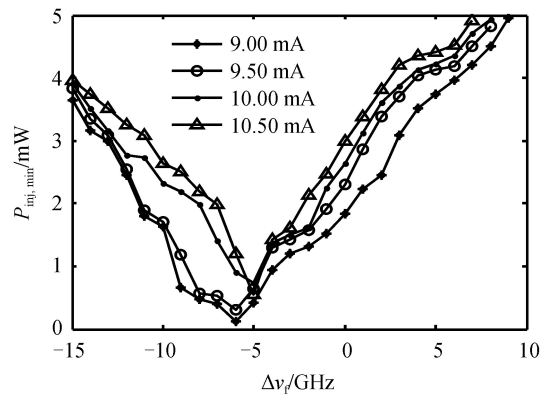


图 5 基横模 Y-LP 模式选择所需最小注入光强度 $P_{inj, min}$ 随 $\Delta\nu_f$ 的变化曲线

Fig.5 Variation of the $P_{inj, min}$ for the fundamental transverse mode Y-LP selection as a function of $\Delta\nu_f$

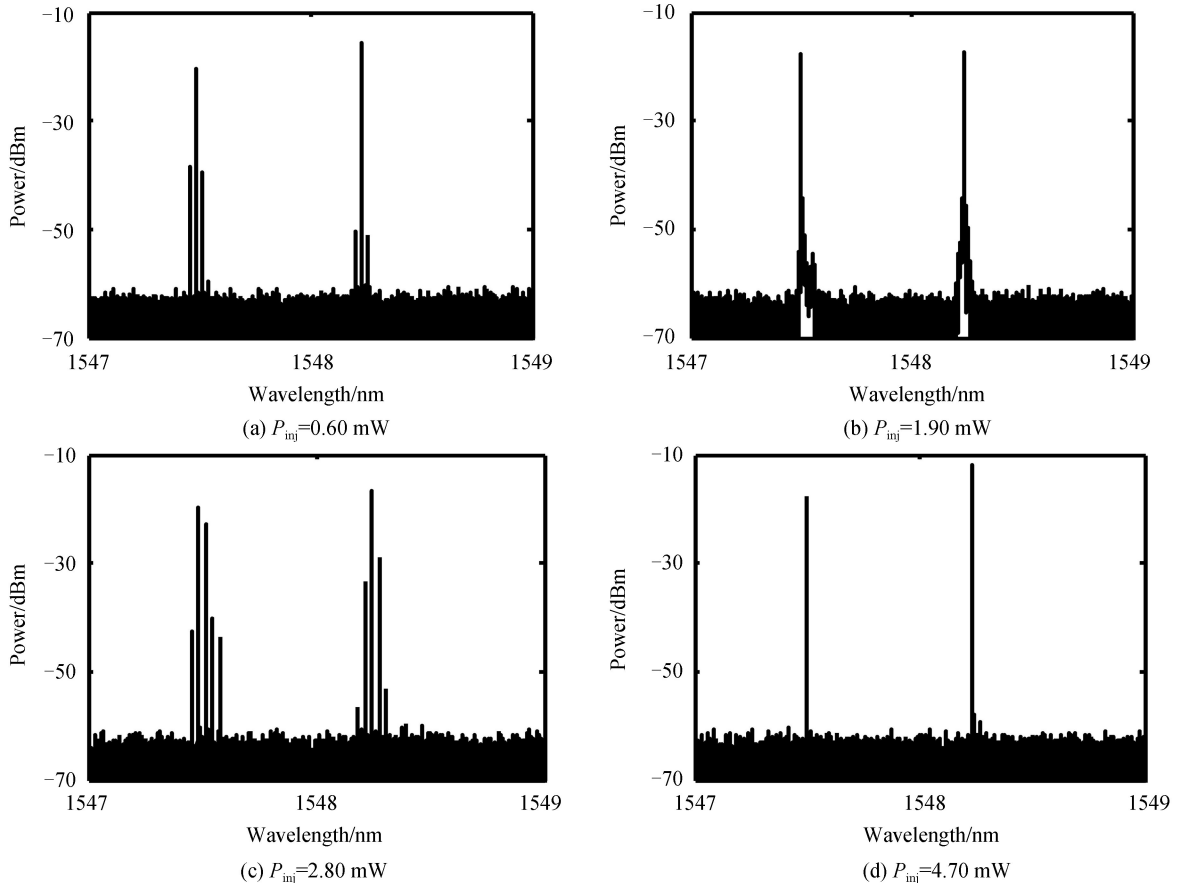


图 6 不同注入强度下,VCSEL 输出的光谱图

Fig.6 Optical spectra of the VCSEL under different P_{inj}

振荡,振荡频率为 3.50 GHz,由于受到高阶模 Y-LP 的影响,基横模 Y-LP 的动力学态也产生了变化,呈现与高阶模相同振荡频率的 P1 态;当 $P_{inj}=1.90$ mW 时(图 6(b)),此时高阶模 Y-LP 与基横模 Y-LP 的光谱均得到明显的展宽而呈现混沌态(Chaotic Oscillation, Stability, CO);而当 $P_{inj}=2.80$ mW 时(图 6(c)),高阶模 Y-LP 与基横模 Y-LP 均呈现 P1 态,振荡频率为 3.81 GHz;当注入光强度 $P_{inj}=4.70$ mW 时(图 6(d)),高阶模 Y-LP 出现 IL 现象,此时基横模 Y-LP 处于稳态(S),继续增加注入光强度,在注入功率 P_{inj} 小于 5.00 mW 的实验条件下,基横模 Y-LP 没有出现被抑制现象,即未实现高阶模 Y-LP 模式选择.通过比较图(4)与图(6)可以看出:平行注入的连续光频率 ν_{inj} 更靠近基横模 Y-LP 频率 ν_{fy} 的情形(如图 4 所示),在较大的注入光强度下,可实现基横模注入锁定且高阶模完全被抑制;但对于平行注入光的频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 频率 ν_{hy} 的情形,仅观测到高阶模 Y-LP 模式被锁定,而基横模 Y-LP 完全被抑制现象(即高阶模 Y-LP 模式选择)没有观测到.其原因是:如图 2(b)所示,激光器自由运行时,基横模 Y-LP 具有比高阶模 Y-LP 更强的输出功率,即基横模 Y-LP 在腔内获得的增益大于高阶模 Y-LP 在腔内获得的增益.考虑到两个模式在腔内共用载流子所导致的模式竞争效应,当其中一个模式的增益远大于另外一个模式的增益时,将会使获得较小增益的模式被完全抑制.很显然,当平行注入的连续光频率 ν_{inj} 更靠近基横模 Y-LP 频率 ν_{fy} 时,在腔内能获得较大增益的横模 Y-LP 在该注入光的作用下,容易实现对高阶横模 Y-LP 的完全抑制;相反,当平行注入光的频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 频率 ν_{hy} 时,为了将具有较大增益的基模 Y-LP 完全抑制,可以预计所需的注光强度将会非常大.介于实验过程中能提供的注入光强度有限,同时考虑到过大的注入光强度有可能导致激光器被损坏,因此在本实验中未能观测到实现高阶模 Y-LP 模式选择.

为了更系统地描述在平行光注入下多横模 1 550 nm-VCSEL 输出的动力学演化过程,图 7 给出了偏置电流 $I=9.50$ mA 的 1 550 nm-VCSEL 在注入强度及频率失谐构成的参量空间内输出基横模 Y-LP 的非线性动力学分布.图 7(a)对应于 ν_{inj} 更靠近 ν_{fy} 情形,而图 7(b)对应于 ν_{inj} 更靠近 ν_{hy} 的情形.通过比较图 7(a)和图 7(b)可以得到:当平行注入的连续光频率 ν_{inj} 更靠近基横模的频率 ν_{fy} 时,通过变化频率失谐 $\Delta\nu_f$ 以及注入强度 P_{inj} ,基横模 Y-LP 可呈现出 FWM、IL、P1、P2、多周期(Multi-Periodic, MP)、CO 等多种非线性动力学态;而当平行注入的连续光频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 频率 ν_{hy} 时,通过改变 $\Delta\nu_h$ 以及 P_{inj} ,基横模 Y-LP 只呈现 S、P1、MP、CO 等动力学状态.

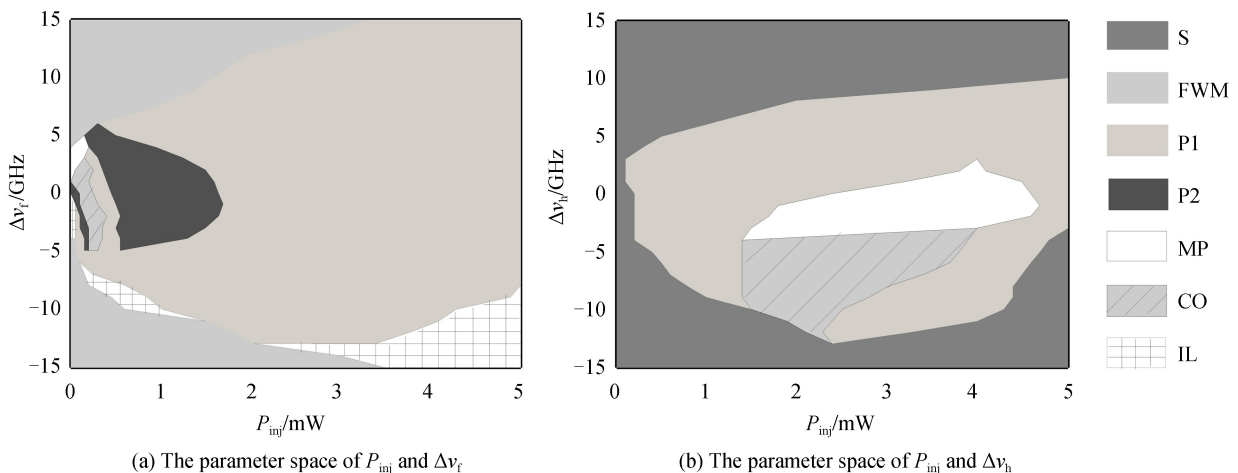


图 7 在注入强度及频率失谐构成的参量空间内,VCSEL 输出基横模 Y-LP 的非线性动力学分布

Fig.7 Maps of nonlinear dynamics for the fundamental transverse mode Y-LP of the VCSEL in the parameter space of P_{inj} and $\Delta\nu_f$ ($\Delta\nu_h$)

3 结论

实验研究了多横模 1 550 nm-VCSEL 在平行光注入下输出模式的非线性动力学行为.研究表明:当注入光的频率 ν_{inj} 更靠近基横模 Y-LP 频率 ν_{fy} 时,通过改变频率失谐 $\Delta\nu_f$ 以及注入强度 P_{inj} ,基横模 Y-LP 能够呈现出 FWM、IL、P1、P2、MP、CO 等多种动力学状态.在注入光强度 P_{inj} 增加的过程中,高阶模 Y-LP 的能

量逐渐减小至完全被抑制, 1 550 nm-VCSEL 能够处于单模工作状态, 即实现了基横模 Y-LP 模式选择. 在频率失谐 $\Delta\nu_f$ 逐渐增加的过程中, 实现基横模 Y-LP 模式选择所需的最小注入光强度 $P_{inj, min}$ 呈现先减小再增加的趋势; 而在给定 $\Delta\nu_f$ 的情况下, $P_{inj, min}$ 随偏置电流 I 增加而增大. 当注入光的频率 ν_{inj} 更靠近高阶模 Y-LP 的频率 ν_{hy} 时, 通过改变频率失谐 $\Delta\nu_h$ 以及注入强度 P_{inj} , 基横模 Y-LP 在高阶模 Y-LP 的影响下, 能够呈现出 S、P1、MP、CO 等多种非线性动力学状态, 但没有观察到基横模 Y-LP 完全被抑制的现象. 综上所述, 多横模 1 550 nm-VCSEL 在平行光注入下, 通过控制注入参量, 可使 VCSEL 输出的各模式呈现多种动力学状态, 不同的动力学状态在光子微波产生、多信道混沌保密通信以及多路随机数获取等方面均有相关应用潜力.

参考文献

- [1] 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.
- [2] HAO Ge-yang, WU Guo-jun, LÜ Pei, *et al.* Characteristics of external optical feedback in distributed feedback fiber lasers array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0414001.
郝歌扬, 吴国俊, 吕沛, 等. 分布反馈光纤激光器阵列中外腔反馈特性研究[J]. 光子学报, 2017, **46**(4): 0414001.
- [3] 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, 潘伟, 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.
- [4] CHANG C H, CHROSTOWSKI L, CHANG H C J. Injection locking of VCSELs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, **9**(5): 1386-1393.
- [5] HONG Yan-hau, SPENCER P S, SHORE K A. Wideband chaos with time-delay concealment in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical feedback and injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(4): 236-242.
- [6] HONG Yan-hau, SPENCER P S, REES P, *et al.* Optical injection dynamics of two-mode vertical cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(3): 274-278.
- [7] 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.
- [8] GUO Peng, YANG Wei-jian, PAREKH D, *et al.* Experimental and theoretical study of wide hysteresis cycles in 1550 nm VCSELs under optical injection[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3125-3132.
- [9] SAKAGUCHI J, KATAYAMA T, KAWAGUCHI H. All-optical memory operation of 980-nm polarization bistable VCSEL for 20-Gb/s PRBS RZ and 40-Gb/s NRZ data signals[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12362-12370.
- [10] LIANG Qing, FAN Li, YANG Ji-yun, *et al.* Narrow-linewidth photonic microwave acquisition based on an optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under optoelectronic negative feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0314001.
梁卿, 樊利, 杨继云, 等. 基于光电负反馈的光注入 1550 nm 垂直腔面发射激光器产生窄线宽微波信号[J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 0314001.
- [11] ONISHI Y, NSHIYAMA N, CANEAU C, *et al.* All-optical inverter based on long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(5): 999-1005.
- [12] HOU T T, YI L L, YANG X L, *et al.* Maximizing the security of chaotic optical communications [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(20): 23439-23449.
- [13] TANG Xi, WU Zheng-mao, WU Jia-gui, *et al.* Tbits physical random bit generation based on mutually coupled semiconductor laser chaotic entropy source[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(26): 33130-33141.
- [14] REGALADO J M, PRATI F, MIGUEL M S, *et al.* Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(5): 765-783.
- [15] KOYAMA F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4502-4513.
- [16] LIU Jiao, WU Zheng-mao, XIA Guang-qiong. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12619-12626.
- [17] ZHONG Dong-zhou, XU Ge-liang, LUO Wei, *et al.* Real-time multi-target ranging based on chaotic polarization laser radars in the driveresponse VCSELs[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(18): 21684-21704.
- [18] CHEN Jian-jun, WU Zheng-mao, FAN Li, *et al.* Polarization bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to variable polarization optical injection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 1502309.
- [19] XIANG Shui-ying, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Influence of variable-polarization optical feedback on polarization

- switching properties of mutually coupled VCSELs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1700108.
- [20] HURTADO A, HENNING I D, ADAMS M J. Two-wavelength switching with a 1550 nm VCSEL under single orthogonal optical injection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **14**(3): 911-917.
- [21] VALLE A, SARMA J, SHORE K A. Spatial hole burning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, **31**(8): 1423-1431.
- [22] GUAN Bao-lu, LIU Xin, JIANG Xiao-wei, *et al.* Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(16): 164203.
关宝璐, 刘欣, 江孝伟, 等. 多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性[J]. *物理学报*, 2015, **64**(16): 164203.
- [23] LIN H, ZHANG Y, PIERCE D W, *et al.* Polarization dynamics of a multimode vertical-cavity surface-emitting laser subject to orthogonal optical injection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, **29**(4): 867-873.
- [24] JIANG Guo-qing, XU Chen, XIE Yi-yang, *et al.* Fabrication of proton-implanted photonic crystal vertical cavity surface emitting laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1205001.
蒋国庆, 徐晨, 解意洋, 等. 质子注入型光子晶体垂直腔面发射激光器制备[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(12): 1205001.
- [25] QUIRCE A, VALLE A, HURTADO A, *et al.* Experimental study of transverse mode selection in VCSELs induced by parallel polarized optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(4): 467-473.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61475127, 61575163, 61674123, 61775184)

引用格式: YANG Wen-yan, XIA Guang-qiong, HOU Yu-shuang, *et al.* Experimental Investigation on Nonlinear Dynamics of a Multi-transverse Mode 1550 nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser Subject to Parallel Optical Injection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0714002

杨文艳, 夏光琼, 侯玉双, 等. 平行光注入多横模 1550 nm 垂直腔面发射激光器的非线性动力学实验研究[J]. *光子学报*, 2018, **47**(7): 0714002