

doi:10.3788/gzxb20174603.0314001

基于光电负反馈的光注入 1 550 nm 垂直腔面发射激光器产生窄线宽微波信号

梁卿,樊利,杨继云,吴正茂,夏光琼

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘 要:基于 1 550 nm 垂直腔面发射激光器在平行偏振光注入下呈现的单周期非线性动力学状态,进一步引入光电负反馈,得到了高质量的微波信号.实验研究表明:平行偏振光注入下,通过调节注入光的注入强度及频率,1 550 nm 垂直腔面发射激光器可呈现注入锁定、单周期、倍周期、混沌等多种非线性动力学状态;在合适的注入参量下,平行偏振光注入 1 550 nm 垂直腔面发射激光器可产生光谱具有单边带结构、频率超过 10 GHz 的光子微波信号,但该微波信号的线宽较宽(达 MHz 量级);进一步引入光电负反馈后,通过选取合适的光电反馈强度,可将该微波信号的线宽减小至一百多 kHz(减小两个量级以上);在选择优化的反馈强度条件下,仅通过简单调节注入光强度,可实现窄线宽光子微波信号的频率在一定范围内连续可调谐.

关键词:非线性光学;半导体激光非线性动力学;实验技术;垂直腔面发射激光器;光子微波;光注入;光电负反馈

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)03-0314001-7

Narrow-linewidth Photonic Microwave Acquisition Based on an Optically Injected 1 550 nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser under Optoelectronic Negative Feedback

LIANG Qing, FAN Li, YANG Ji-yun, WU Zheng-mao, XIA Guang-qiong

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

Abstract: Based on the period-one dynamical state emerging in a 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser with parallel optical injection, high-quality photonic microwave was acquired after further introducing optoelectronic negative feedback. The experimental results show that, under parallel polarized optically injection, 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser can exhibit rich nonlinear dynamics behaviors such as stable injection locking, period-one, period-two and chaos through adjusting injection strength and frequency detuning. Under suitable injection condition, a parallel polarized optically injected 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser can generate a photonic-microwave signal with a single sideband optical spectrum structure and a frequency over 10 GHz, but the linewidth of the microwave signal is relatively wide (on the order of MHz). After further introducing optoelectronic negative feedback, the linewidth of the microwave signal can be narrowed to about 100 kHz (reduced to more than two orders of magnitude) by choosing proper photoelectric feedback intensity. Furthermore, under the case that the feedback strength is set at the optimized value, the frequency of the narrow-linewidth microwave signal can be tuned continuously within a certain range through simply varying the injection strength.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61275116, 61475127, 61575163)资助

第一作者:梁卿(1991-),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:1304237249@qq.com

导师(通讯作者):夏光琼(1970-),女,教授,博导,主要研究方向为半导体激光器非线性动力学及其应用. Email:gqxia@swu.edu.cn

收稿日期:2016-10-21;录用日期:2016-12-08

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

Key words: Nonlinear optics; Nonlinear dynamics of semiconductor lasers; Experimental technique; Vertical-cavity surface-emitting laser; Photonic microwave; Optical injection; Optoelectronic negative feedback

OCIS Codes: 140.5960; 140.7260; 190.4360; 350.4010

0 引言

光载无线通信(Radio-over-Fiber, RoF)技术^[1-3]作为一种能够使光纤通信和无线微波通信有效结合起来的新兴技术,具有低传输损耗和不受电磁干扰的独特优势,在现代通信体系中展现了诱人的应用前景.作为支撑 RoF 通信的关键技术之一,光子微波的获取技术受到了业界的广泛关注^[4-22].目前,传统的产生光子微波的技术有直接调制法^[9]、外部光调制法^[10]、光外差法^[11]以及基于多段集成的双模激光器的双模拍频^[12]等.其中直接对激光器电流进行调制的直接调制法虽然简单易实现,但是由于受激光器调制带宽的限制无法获取高频微波信号;与直接调制法比较,外部调制法可以产生频率较高的微波信号,但外部调制器需要高的驱动电压同时会引入较大的损耗;由两个独立半导体激光器拍频获得微波信号的光外差法,虽然可以产生高频的微波信号,但其包含较高的相位噪声影响系统的传输性能;多段集成的双模激光器可产生低相噪的微波信号,但难以实现微波频率调谐.

除此之外,基于外光注入半导体激光器(Semiconductor Lasers, SLs)呈现的单周期振荡获取光子微波信号的方案也吸引了相关领域学者的注意^[14-19].在较强的光注入下,被稳定锁定的 SLs 经历霍普分岔后,将处于单周期振荡.处于单周期振荡的 SLs 的输出光强度为一调制信号,且其调制频率处于微波波段范围内,从而可用于获取光子微波信号.该方案具有以下优势:首先,基于单周期振荡的外光注入 SLs 不仅可产生频率可调谐的微波信号,而且其频率可远高于激光器的弛豫振荡频率;其次,该方法有可能产生光谱具有单边带结构的光子微波信号,从而可避免传输系统中由光纤色散效应引起的色散致功率代价^[21];此外,外光注入 SLs 系统易于实现从调幅(Amplitude Modulation, AM)到调频(Frequency Modulation, FM)的调制转换,减少了 RoF 系统中 AM 调制所引起的衰退效应^[6,22].但外光注入 SLs 产生的微波信号的频率通常不够稳定、线宽较宽因而在某些应用领域可能达不到相关要求.为了获得高性能、窄线宽的微波信号,相关的频率锁定技术如双锁定、光锁相环、光反馈、光电反馈、光注入锁定等相继被提出^[23-27].1999年, Simpson 等利用双锁定及光锁相环两种频率锁定技术获得线宽小于 1 kHz 的微波信号^[23-24];2004年, Chan 等利用光电反馈频率稳定技术获得了线宽窄化了 3 个量级的微波信号^[25];2013年, Simpson 等利用偏振旋转光反馈的频率锁定技术获得了线宽为 15 kHz 的微波信号^[26].

上述基于外光注入 SLs 获取窄线宽的微波信号的实验研究中,所用的 SLs 主要是常规的边发射半导体激光器(Edge Emitting Lasers, EELs).与 EELs 相比,垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs)由于具有体积较小、阈值电流低、单纵模输出、与光纤易耦合、易集成等显著的优势^[28],在相关应用领域已占据重要位置,相应地基于光注入 VCSELs 获取微波信号的相关研究陆续被报道.2012年, Quirce 等理论分析了利用双光注入多横模 VCSEL 获取高频光子微波信号的可行性^[29];2015年, Perez 等理论和实验分析了两正交光注入 1 550 nm-VCSEL 获取光子微波信号的特性^[30],但其实验结果显示所产生的光子微波信号的线宽受限于两注入光的相位抖动.

最近,本课题组分别从理论和实验研究了光电反馈下 1 550 nm-VCSEL 输出的动力学特性^[31-32],并通过在单光注入 1 550 nm-VCSEL 中引入双光反馈获取了线宽低于 1 MHz、信噪比大于 40 dB 的微波信号^[33].在此基础上,考虑到光电反馈相比于光反馈具有对相位变化不敏感以及电控操作更灵活的优势,本文提出利用光电反馈对单周期振荡的平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 产生的微波信号进行线宽窄化,得到了线宽近 100 kHz、信噪比为 40.7 dB 的微波信号.在选取优化的反馈强度条件下,只改变注入光的注入功率即可获得频率可调谐的窄线宽微波信号.

1 实验装置

基于光电负反馈下的外光注入 1 550 nm-VCSEL 获取窄线宽微波信号的实验系统结构如图 1.该系统由注入模块、反馈模块和探测模块三部分构成.在注入模块中,可调激光源(Tunable Semiconductor Laser,

TSL, Santec TSL-710)输出的连续光经过可调衰减器(Variable Attenuator, VA) VA_1 、偏振控制器(Polarization Controller, PC)、光环行器(Optical Circulator, OC)和光纤耦合器(Fiber Coupler, FC) FC_1 后被分成两个部分,一部分输入到功率计(Power Meter, PM)用以监测注入功率大小,另一部分注入到单模1550 nm-VCSEL(Raycan)中,通过调节PC可实现平行偏振光注入. 1550 nm-VCSEL输出光经过 FC_1 、OC和 FC_2 后分成两部分,一部分用于形成光电反馈环路,另一部分用于探测. 光电反馈模块由 VA_2 、 FC_3 、具有反相功能的探测器(Photo Detector, PD, New Focus 1544-B) PD_1 以及电放大器(Electronic Amplifier, EA, Agilent 83006A)组成;而探测模块主要由光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, Ando AQ6317C)、频谱分析仪(Electronic Spectrum Analyzer, ESA, Agilent E4407B)和数字示波器(Oscilloscope, OSC, Agilent DSO-X91604A)组成,其中,准确度为0.015 nm的OSA用于光谱分析,而ESA和OSC则分别对其频谱和时序进行分析. 实验中光路通过单模光纤连接,高精度温度电流控制源(ILX-Lightwave, LDC-3724C)为1550 nm-VCSEL提供低噪声偏置电流,并将其温度稳定在20.28℃.

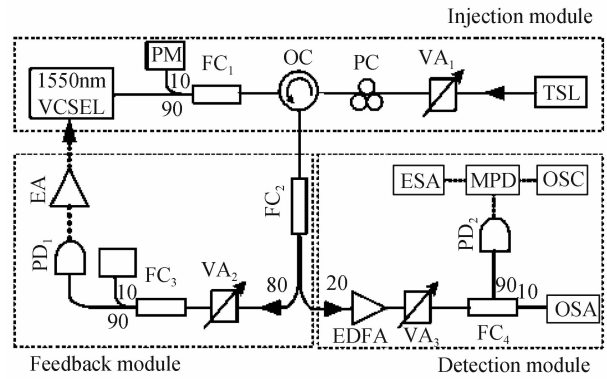


图1 实验系统
Fig.1 Experimental setup

2 实验结果与讨论

图2(a)给出了1550 nm-VCSEL自由运行时的偏振分解功率-电流($P-I$)曲线. 从图2(a)中可以看出,1550 nm-VCSEL的阈值电流为1.65 mA. 当偏置电流 I 位于1.65~6.85 mA范围内,激光器中波长较短的线性偏振分量(定义为Y-偏振分量,Y-PC)被激励,而波长较长的线性偏振分量(定义为X-偏振分量,X-PC)被抑制;当电流 I 增加到6.9 mA时,激光器输出的主导模式由Y-PC突然跳变为X-PC,即发生了I类偏振转换(Polarization Switching, PS)^[34];进一步增大 I 则X-PC始终占主导地位,而Y-PC被抑制. 图2(b)给出了自由运行1550 nm-VCSEL的弛豫振荡频率 f_r 随偏置电流 I 的变化曲线,其中实心点为实验数据,实线为拟合曲线. 从图中可以看出:随着偏置电流 I 的增加,自由运行1550 nm-VCSEL的弛豫振荡频率呈现先快速上升、再趋于平缓的趋势;偏置电流超过5 mA以后,自由运行VCSEL的弛豫振荡频率维持在2.52 GHz. 在接下来的讨论中,1550 nm-VCSEL的偏置电流 I 固定在5 mA,此时1550 nm-VCSEL工作在Y偏振模式,其输出光谱的线宽约为700 MHz.

2.1 光子微波的产生

由于本文是基于1550 nm-VCSEL在平行偏振光注入下呈现的非线性动力学状态之一的单周期态获取微波信号的,因此首先需要确定平行光注入下1550 nm-VCSEL呈现单周期振荡所需的参量范围. 图3给出了1550 nm-VCSEL输出的动力学态在注入光功率 P_i 以及注入光频率(f_{ML})与1550 nm-VCSEL主导模频率(f_{sl})之间的失谐 $\Delta f(=f_{ML}-f_{sl})$ 所构成的参量空间的分布图谱. 从图中可以看出:平行偏振光注入下,通过调整注入光功率和频率失谐,1550 nm-VCSEL可呈现稳定注入锁定(SIL)、单周期(P_1)、倍周期(P_2)、混沌(CO)等多种非线性动力学状态. 在接下来的讨论中,我们固定频率失谐 $\Delta f=3.0$ GHz,此时在较大的注入功率范围1550 nm-VCSEL均呈现单周期振荡. 图4给出了 $\Delta f=3.0$ GHz、注入光功率 P_i 为1.5 mW

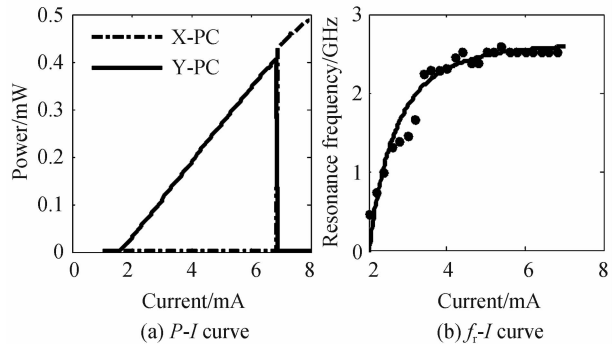


图2 1550 nm-VCSEL自由运行时的 $P-I$ 曲线以及 f_r-I 曲线
Fig.2 Polarization-resolved $P-I$ curve and f_r-I curve for a free-running 1550 nm-VCSEL

时 1 550 nm-VCSEL 输出的光谱(a)、功率谱(b)以及时间序列(c). 此时,激光器输出为单周期振荡,其光谱具有单边带结构特性,此类光子微波作为 RoF 的副载波时可以有效地抑制光纤色散引起的功率代价;但由于激光器中存在的固有位相噪声,导致所得到的微波信号谱线较宽,达到了几十 MHz 量级,需要采用相关技术对其线宽进行窄化.

2.2 光子微波的窄化

接下来,研究额外引入光电负反馈对光注入 1 550 nm-VCSEL 呈现单周期振荡时所产生的微波信号线宽的影响. 图 5 给出在平行偏振注入(注入光功率 $P_i=1.5$ mW,频率失谐 $\Delta f=3.0$ GHz)1 550 nm-VCSEL 中,通过引入不同光电反馈强度所获得的光生微波的功率谱. 图中微波信号的功率谱分布是以微波信号的峰值频率 f_0 作为参考频率. 这里定义反馈强度 ξ 为光电反馈环路中进入 PD 的光功率与自由运行的 1 550 nm-VCSEL 输出功率的比值. 在注入光功率 $P_i=1.5$ mW,频率失谐 $\Delta f=3.0$ GHz 的平行偏振光注入下,1 550 nm-VCSEL 输出的光谱中包含两个功率相近,波长差约为 0.058 nm 的光谱成分(如图 4(a)所示),其相应的功率谱如图 5(a)所示. 考虑到此时得到的功率谱具有不规则分布而无法采用传统的半极大全宽(FWHM)方法来标定微波线宽,因此我们采用功率谱分布的标准偏差 $\Delta\nu=[\langle\nu^2\rangle-\langle\nu\rangle^2]^{1/2}$ (ν 表

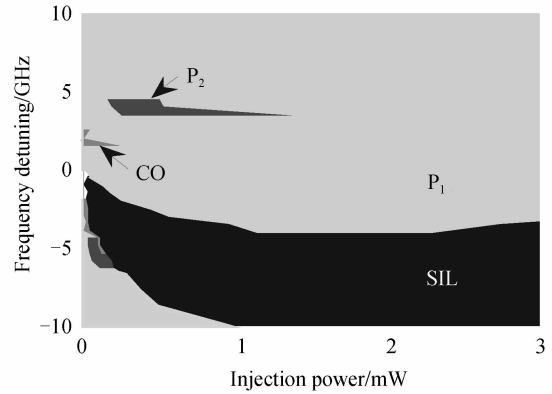


图 3 $I = 5$ mA 时,平行偏振光注入下 1 550 nm-VCSEL 在注入光功率 P_i 和频率失谐 Δf 构成的参量空间的输出图谱

Fig. 3 Stability map of the 1 550 nm-VCSEL subject to parallel polarized optical injection in the parameter space of injection power P_i and frequency detuning Δf for $I = 5$ mA

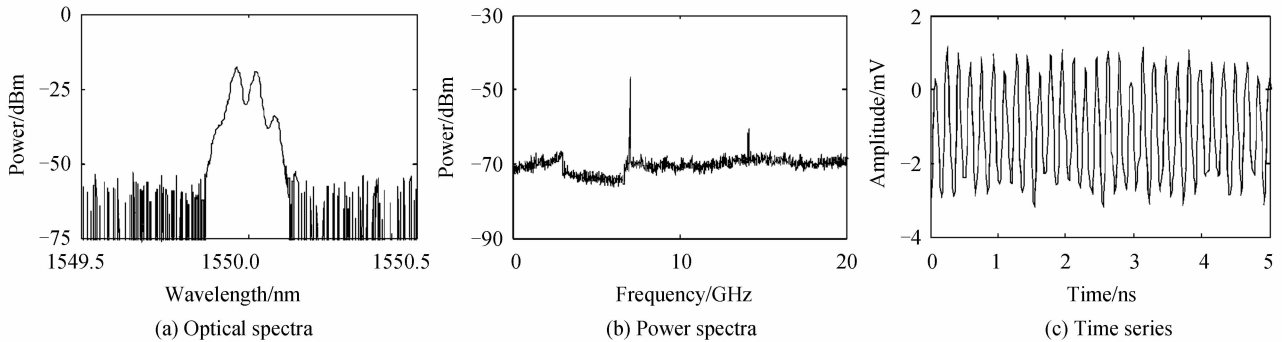


图 4 $P_i = 1.5$ mW, $\Delta f = 3.0$ GHz 时,平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 输出的光谱、功率谱、以及时间序列

Fig. 4 Optical spectra, power spectra and time series of period-one dynamical state output from 1 550 nm-VCSEL subject to parallel polarized optical injection under $P_i = 1.5$ mw and $\Delta f = 3.0$ GHz

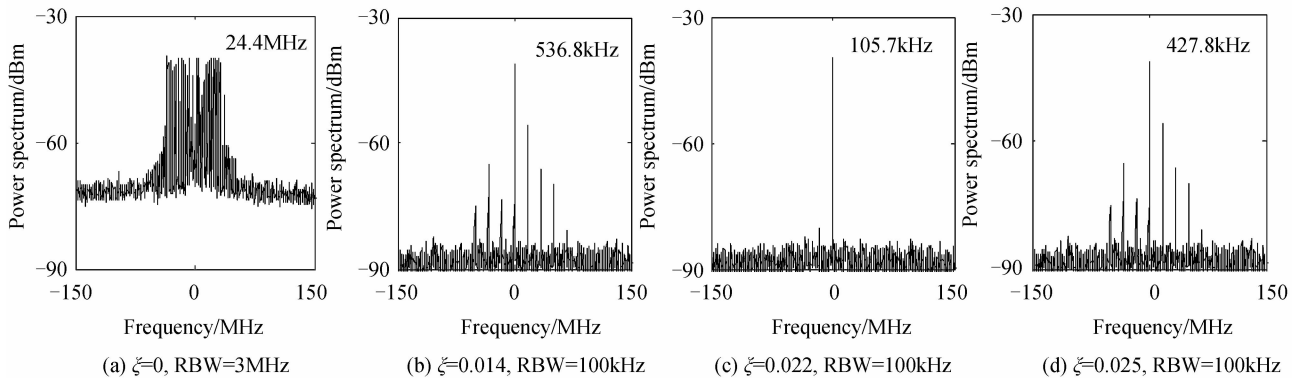


图 5 平行偏振光注入($P_i=1.5$ mW, $\Delta f=3.0$ GHz) 1 550 nm-VCSEL 在不同的光电反馈强度 ξ 下所得到的微波信号的功率谱分布

Fig. 5 Power spectra of the parallel polarized optically injected 1 550 nm-VCSEL with $P_i = 1.5$ mw and $\Delta f = 3.0$ GHz subject to optoelectronic feedback with different feedback strength ξ

示频率值)来标定微波线宽^[19].在 $\xi=0$ 时(如图 5(a)所示),即无光电反馈时,通过计算此时功率谱曲线对应的线宽 $\Delta\nu$ 约为 24.4 MHz;当反馈强度 $\xi=0.014$ (如图 5(b)所示),功率谱上出现一些等间隔的较窄的细线,它们之间的频率间隔为 17 MHz,对应于光电反馈环延迟反馈时间 58.8 ns 的倒数,说明此时光电反馈强度下还不足以抑制反馈环路中其它边模实现对微波频率的锁定,此时微波线宽 $\Delta\nu=536.8$ kHz;当 $\xi=0.022$ (如图 5(c)所示),此时光电反馈外腔模式中的其它边模得到很好抑制微波信号被锁定,微波信号的线宽下降到 105.7 kHz,且微波信号的信噪比为 40.7 dB;当光电反馈强度 $\xi=0.025$ (如图 5(d)所示),此时反馈环路中又出现了其它边模导致微波线宽 $\Delta\nu=427.8$ kHz.通过以上的实验结果可以看出,光电反馈的引入可使光子微波信号的线宽得到窄化,其原因是由于光电反馈环中延时重复的微波信号对单周期振荡的锁定作用^[25].当然,与光注入 DFB-SLs 在光电反馈作用下获取光子微波相同^[25],在过大的光电反馈强度下,反馈环路中的其它模式将不能得到很好抑制,从而导致线宽窄化效果变差.因此,需要选择合适的光电反馈强度,以获取高质量的光子微波.

图 6 进一步给出了平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 下产生的微波信号的线宽随光电反馈强度的演化趋势.从图中可以看出,随着反馈强度的增加,微波信号的线宽从无反馈时的 24.4 MHz 逐渐减小,当 ξ 增加到 0.022 时,微波信号线宽减小到最小值 105.7 kHz,继续增加 ξ ,此时微波信号的线宽将呈现逐渐增加的趋势.因此,为了得到窄线宽的微波信号,光电反馈强度需要精细调节.

上述结果显示:对于注入功率 $P_i=1.5$ mW,频率失谐 $\Delta f=3.0$ GHz 时,当反馈强度 $\xi=0.022$ 时,可得到线宽最小的微波信号.进一步的研究还发现,当固定 ξ 为 0.022,并保持其它参量不变,仅通过改变注入光的注入功率时,可得到线宽维持在 360 kHz 以下、频率在(6.23 GHz,8.14 GHz)范围内连续可调的微波信号,相应实验结果如图 7 所示.图中实心点和空心点分别代表有无光电反馈环路时光子微波信号的线宽,而星号代表微波信号的频率.值得注意的是:上述结果是在频率失谐 $\Delta f=3$ GHz 的条件下得到的,如果采用更大的频率失谐,线宽满足相同条件的微波信号的频率可调谐范围将更大.

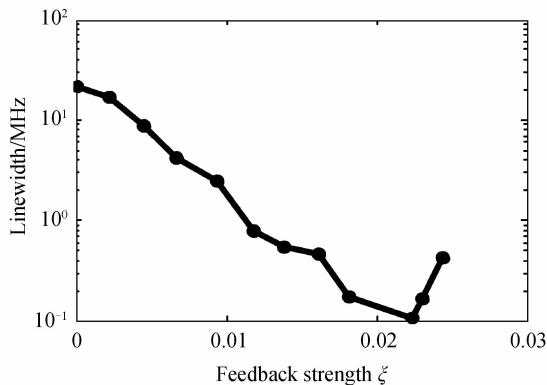


图 6 $P_i=1.5$ mW, $\Delta f=3.0$ GHz 时,微波信号线宽随光电反馈强度的变化趋势

Fig. 6 Linewidth of microwave signal as a function of optoelectronic feedback strength ξ when $P_i = 1.5$ mW and $\Delta f=3.0$ GHz

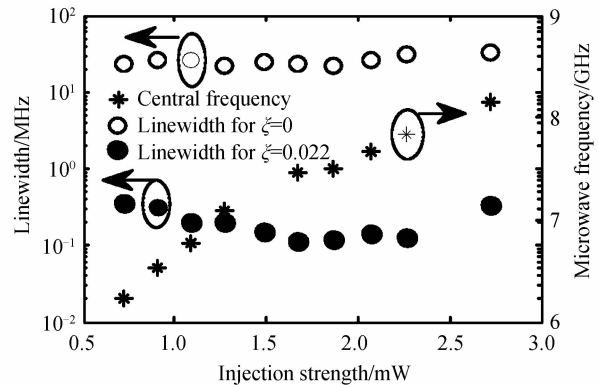


图 7 微波中心频率以及微波线宽随注入功率的变化趋势

Fig. 7 Central frequencies and linewidth of the photonic microwave signal as a function of injection strength

3 结论

本文实验研究了在平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 中引入光电负反馈后所产生的光子微波信号的特性.实验研究结果表明:通过改变注入光强度和频率失谐,平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 可呈现 SIL、 P_1 、 P_2 、CO 等非线性动力学状态;通过选取合适的频率失谐和注入光强度,平行偏振光注入 1 550 nm-VCSEL 可输出光谱具有单边带结构的光子微波,但该微波信号的线宽较宽(MHz 量级);再进一步引入光电反馈之后,微波信号的线宽从无反馈时的 24.4 MHz 可以压缩至 105.7 kHz,且微波信号的信噪比为 40.7 dB;在固定反馈强度以及其它的系统参量,仅通过简单调节注入光功率,可实现窄线宽光子微波的频率在一定范围内连续可调谐.

参考文献

- [1] CHEN Lin, WEN Hong, WEN Shuang-chun. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for Up-Link connection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(19): 2056-2058.
- [2] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319-330.
- [3] WANG Dong, DAI Bo, REN Li-qing, *et al.* A modulation scheme to generate 24-GHz-band millimeter-wave-band ultra-wideband signal by using machzehnder modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0906001.
汪东, 戴博, 任栋亲, 等. 基于马赫曾德调制器产生 24 GHz 波段超宽带信号毫米波[J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0906001.
- [4] PAN Shi-long, ZHANG Ya-mei. Tunable and wideband microwave photonic phase shifter based on a single-sideband polarization modulator and a polarizer[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(21): 4483-4485.
- [5] JUAN Yu-shan, LIN Fan-yi. Photonic generation of broadly tunable microwave signals utilizing a dual-beam optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **3**(4): 644-650.
- [6] 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.
- [7] LIU Yu-ping, QI Xiao-qiong, XIE Liang. Dual-beam optically injected semiconductor laser for radio-over-fiber downlink transmission with tunable microwave subcarrier frequency[J]. *Optics Communications*, 2012, **292**(4): 117-122.
- [8] GUENNEC Y L, MAURY G, YAO J, *et al.* New optical microwave up-conversion solution in radio-over-fiber networks for 60-GHz wireless applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1277-1282.
- [9] RYU H S, SEO Y K, CHOI W Y. Dispersion-tolerant transmission of 155-Mb/s data at 17 GHz using a 2.5-Gb/s-grade DFB laser with wavelength-selective gain from an FP laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(8): 1942-1944.
- [10] HAN J, SEO B J, HAN Y, *et al.* Reduction of fiber chromatic dispersion effects in fiber-wireless and photonic time-stretching system using polymer modulators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(6): 1504-1509.
- [11] HYODO M, ABEDIN K S, ONODERA N. Generation of millimeter-wave signals up to 70.5 GHz by heterodyning of two extended-cavity semiconductor lasers with an intracavity electro-optic crystal[J]. *Optics Communications*, 1999, **171**(1-3): 159-169.
- [12] PAN Bi-wei, LU Dan, SUN Yu, *et al.* Tunable optical microwave generation using self-injection locked monolithic dual-wavelength amplified feedback laser[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(22): 6395-6398.
- [13] CHEN Guo-jie, HUANG De-xiu, ZHANG Xin-liang, *et al.* Photonic generation of a microwave signal by incorporating a delay interferometer and a saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(6): 554-556.
- [14] HWANG Sheng-kwang, LIU Jia-ming, WHITE J K. Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 974-981.
- [15] 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.
- [16] LIAO Yi-huan, LIN Fan-yi. Dynamical characteristics and their applications of semiconductor lasers subject to both optical injection and optical feedback[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(20): 23568-23578.
- [17] LO Kai-hung, HWANG Sheng-kwang, DONATI Silvano, *et al.* Optical feedback stabilization of photonic microwave generation using period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 18648-18661.
- [18] CHAN Sze-chun. Analysis of an optically injected semiconductor laser for microwave generation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(3): 421-428.
- [19] FAN Li, WU Zheng-mao, DENG Tao, *et al.* Subharmonic microwave modulation stabilization of tunable photonic microwave generated by period-one nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(23): 4058-4064.
- [20] ZANOLA M, STRAIN M J, GIULIANI G, *et al.* Monolithically integrated DFB lasers for tunable and narrow linewidth millimeter-wave generation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(19): 1500406.
- [21] KASZUBOWSKA A, ANANDARAJAH P, BARRY L P. Improved performance of a hybrid radio/fiber system using a directly modulated laser transmitter with external injection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(2): 233-235.
- [22] QI Xiao-qiong, LIU Jia-ming. Photonic microwave applications of the dynamics of semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(5): 1198-1211.
- [23] SIMPSON T B, DOFT F. Double-locked laser diode for microwave photonics applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(11): 1476-1478.
- [24] SIMPSON T B. Phase-locked microwave-frequency modulations in optically-injected laser diodes [J]. *Optics*

- Communications, 1999, **170**(1-3): 93-98.
- [25] CHAN Sze-chun, LIU Jia-ming. Tunable narrow-linewidth photonic microwave generation using semiconductor laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 1025-1032.
- [26] SIMPSON T B, LIU Jia-ming, ALMULLA M, *et al.* Linewidth sharpening via polarization-rotated feedback in optically injected semiconductor laser oscillators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1500807.
- [27] GOLDBERG L, TAYLOR H F, WELLER J F, *et al.* Microwave signal generation with injection-locked laser diodes [J]. *Electronics Letters*, 1983, **19**(13): 491-493.
- [28] KOYAMA F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4502-4513.
- [29] QUIRCE A, VALLE A. High-frequency microwave signal generation using multi-transverse mode VCSELs subject to two-frequency optical injection[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13390-13401.
- [30] PEREZ P, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Photonic generation of microwave signals using a single-mode VCSEL subject to dual-beam orthogonal optical injection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 1-14.
- [31] 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.
- [32] YANG Xin, WU Zheng-mao, DENG Tao, *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, 邓涛, 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.
- [33] SUN Bo, WU Jia-gui, WANG Shun-tian, *et al.* Theoretical and experimental investigation on the narrow-linewidth photonic microwave generation based on parallel polarized optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(1): 014207.
孙波, 吴加贵, 王顺天, 等. 基于平行偏振光注入的 1550nm 波段垂直腔表面发射激光器获取窄线宽光子微波的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2016, **65**(1): 014207.
- [34] WANG Xia-fa, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Theoretical investigations on the polarization performances of current-modulated VCSELs subject to weak optical feedback[J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2009, **26**(1): 160-168.