

doi:10.3788/gzxb20184701.0114003

结合光注入半导体激光器与光电环路产生频率 大范围可调、窄线宽微波信号

庞海越, 林晓东, 吴正茂, 邓涛, 夏光琼

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘 要:结合光注入半导体激光器的单周期动力学态与光电环路,提出了一种可获得频率大范围可调、窄线宽的光子微波信号的方案并进行了实验研究.结果表明,光注入半导体激光器在一定条件下能够实现单周期振荡,且光子微波信号的频率在 8~67 GHz 范围内连续可调;在合适的注入参数下,获得了频率为 24.3 GHz 且光谱具有单边带结构的光子微波信号;通过引入光电环路结构,能够有效地将该光子微波的线宽由 8.6 MHz 压缩至 30 kHz,并获得了 40 dB 以上的信噪比.

关键词:非线性光学;微波光子学;光注入;半导体激光器;单周期振荡;光子微波;光电环路;窄线宽;可调谐

中图分类号:TN248.4; TN725.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0114003-7

Widely Tunable Narrow-linewidth Photonic Microwave Generation Using Optically Injected Semiconductor Laser Combined with Optoelectronic Loops

PANG Hai-yue, LIN Xiao-dong, WU Zheng-mao, DENG Tao, XIA Guang-qiong
(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: A widely tunable narrow-linewidth photonic microwave generation scheme based on the period-one dynamics of an optically injected semiconductor laser combined with optoelectronic loops is proposed and experimentally demonstrated. The results show that the optical injection first drives the laser into period-one dynamics so that its intensity oscillates at a microwave frequency, which can be widely and continuously tuned in the range from 8 GHz to 67 GHz. A single sideband photonic microwave generation at 24.3 GHz is demonstrated with a proper injection condition. By using optoelectronic loops, the linewidth of the photonic microwave is effectively reduced from 8.6 MHz to 30 kHz and a signal to noise ratio above 40 dB is obtained.

Key words: Nonlinear optics; Microwave photonics; Optical injection; Semiconductor laser; Period-one oscillation; Photonic microwave; Optoelectronic loop; Narrow linewidth; Tunable

OCIS Codes: 140.5960; 190.4360; 300.3700; 350.4010

0 引言

光子微波技术利用光子学方法产生微波信号,能够在光纤中进行传输且具有高频、大带宽、低损耗、不受电磁场干扰、易于进行波分复用等特点,近年来受到人们极大的关注^[1-2],被广泛应用于光载无线(Radio-

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61475127, 61575163, 61674123, 61775184),重庆市自然科学基金(No. CSTC2016jcyjA0082),中央高校专项业务费(No. XDJK2017B012)资助

第一作者:庞海越(1992—),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: 284459834@qq.com

导 师:夏光琼(1970—),女,教授,博导,主要研究方向为半导体激光非线性动力学及其应用. Email: gqxia@swu.edu.cn

通讯作者:林晓东(1975—),男,副教授,主要研究方向为半导体激光器非线性动力学及其应用. Email: linxd@swu.edu.cn

收稿日期:2017-08-09; **录用日期:**2017-10-12

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

over-Fiber, ROF)通信系统^[3-4]、光学雷达系统^[5]等领域.多种光生微波的技术方案被陆续提出,如直接调制法^[6-7]、外部调制法^[8-9]、光外差法^[10-11]、双模激光器拍频法^[12-13]等.这些技术方案各具优势,但不足之处也比较突出,如频率可调谐范围较小、系统结构复杂且需要昂贵的高频电子设备、具有较高的相位噪声等.

近年来,人们提出了一种利用光注入半导体激光器单周期(Period-one, P1)动力学态来获取光子微波信号的方法^[14-18],该方法具有独特的优势^[19]:它是一种全光方案,不需要复杂的电子器件,只需采用普通的商用半导体激光器即可获得高频光子微波;该方法产生的光子微波频率可以在几 GHz 到上百 GHz 范围内连续调谐;另外,通过控制注入参数能使该光子微波的光谱具有单边带结构,从而避免在传输过程中由于光纤色散效应引起的功率损失^[20].但由于受到激光器线宽及相位噪声的影响,该方法产生的微波信号线宽比较宽,通常在 10~100 MHz 范围,限制了其在很多领域的应用.为此,人们提出了一些技术方案来对光子微波线宽进行压缩,2012 年本课题组首先提出了利用光反馈的技术方案,由此获得了线宽约为 300 kHz 的微波信号^[21];2013 年香港城市大学的 Zhuang 等利用双光反馈获得了 3dB 线宽小于 50 kHz 的光子微波信号^[22];2016 年本课题组利用光注入垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL)在光电负反馈环路下获得了线宽为 105.7 kHz 的微波信号^[23].这些技术方案都能够在一定程度上对 P1 态产生的光子微波线宽进行压缩,但线宽压缩的效果仍然不太理想且光子微波信号的相噪较大,与众多应用领域的要求还有一定的差距.2017 年美国空军研究实验室的 Suelzer 等利用光电反馈环路获得了频率为 25.3 GHz,线宽小于 3 Hz 的高质量光子微波信号,但其调谐范围相对较小(10~46 GHz)且高频区域微波功率衰减较大^[24].

另一方面,利用光电环路尤其是光电振荡器也是获得高频、低相噪、高 Q 值光子微波信号的有效方法.2007 年韩国延世大学 Lee 等利用一个光环和一个电环构成自注入锁定振荡器,获得了边模抑制比大于 50 dB,相位噪声为 -118 dBc/Hz@10 kHz 的高性能微波信号^[25];2015 年中科院半导体所的 Lu 等利用一个光反馈环和一个光电环构成的光电振荡器获得相位噪声低于 -97 dBc/Hz@10 kHz 的高性能微波信号^[26].2017 年中北大学陈猛等利用基于平面光波导谐振腔的可调谐光电振荡器,获得了相位噪声为 -109.7 dBc/Hz@10 kHz 的微波信号^[27];2017 年贵州大学白光福等利用基于分布反馈光注入锁定效应的可调谐光电振荡器获得了相位噪声为 -90 dBc/Hz@1 kHz 的微波信号^[28].这些研究结果都表明,由于采用了长光纤进行传输,光电环路能够保证获得线宽非常窄的高 Q 值光子微波信号,但受限于环路中带通滤波器的通带特性,光电环路产生的微波信号的连续调谐范围相对较小.

基于此,本文提出将光注入半导体激光器 P1 动力学态与光电环路相结合的方案,并实验研究了该方案中产生的光子微波的可调谐范围及线宽的压缩效果.该方案采用普通的商用分布反馈半导体激光器(Distributed Feedback Laser,DFB)作为核心器件,将 P1 态的大范围可调谐性与光电环路的窄线宽特点相结合,并利用双光电环路来解决单模输出与高 Q 值之间的矛盾,将光注入 DFB 作为微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter,MPF)替换高频窄带宽的带通滤波器用于降低系统成本.

1 实验装置

结合光注入半导体激光器与光电环路产生光子微波信号的实验系统结构如图 1.该系统可分为光注入模块、光电环路、光反馈环路和探测模块四部分.在光注入模块中,主激光器(Master Laser, ML)为可调谐激光器(Santec TSL-710),ML 输出的连续光经过光隔离器(Optical Isolator, OI)、偏振控制器(Polarization Controller, PC) PC₁、光纤耦合器(Fiber Coupler, FC) FC₁ 和光环形器(Optical Circulator, OC),注入到从激光器(Slave Laser, SL, DFB 1550-604)中以驱动其进入 P1 动力学态,OI 确保光单向传输,PC₁ 用于改变注入光的偏振态.光电环路由 PC₂、马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)(40 GHz 带宽)、掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)、FC₂、FC₃、单模光纤(Single Mode Fiber, SMF) SMF₁ 和 SMF₂、可调光衰减器(Variable Attenuator, VA) VA₁ 和 VA₂、FC₄、光电探测器(Photo Detector, PD)(U2T XPDV2150R, 50 GHz 带宽) PD₁ 以及电放大器(Electronic Amplifier, EA)(Agilent 83006A, 26.5 GHz 带宽)构成.在光反馈环路中,经 OC 出来的光信号依次经过 MZM、EDFA、FC₂、FC₃、SMF₁、SMF₂、VA₁、VA₂、FC₄、VA₃、FC₁、OC 后反馈回 SL.探测模块主要由 PD₂(U2T XPDV3120R, 67 GHz 带宽)、频谱分析仪(Electronic Spectrum Analyzer, ESA)(R&S FSW, 67 GHz 带宽)和光谱分析仪(Optical Spectrum

Analyzer, OSA)(Ando AQ6317C)组成.实验中使用高精度温度电流控制源(ILX-Lightwave, LDC-3724C)来控制 SL 的温度和偏置电流,并将其温度稳定在 20.87 °C,偏置电流稳定在 25.00 mA (约为 2 倍阈值电流).

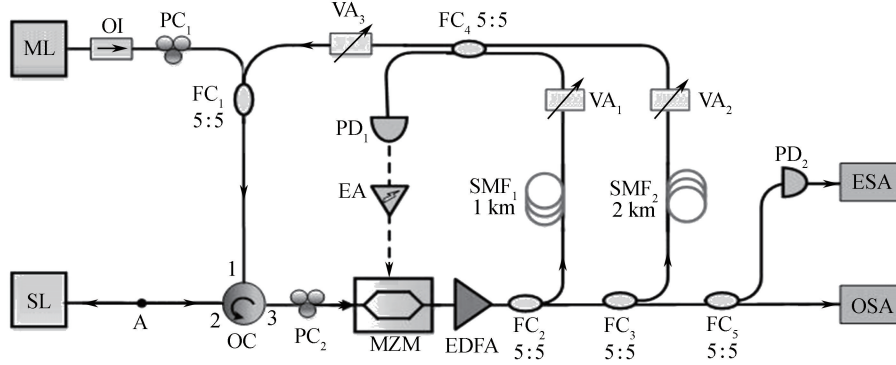


图 1 光注入半导体激光器结合光电环路产生光子微波信号的实验结构

Fig.1 Experimental setup of the photonic microwave generation using an optically injected semiconductor laser with optoelectronic loops

2 实验结果与讨论

实验中,首先利用 ML 注入到 SL 产生 P1 动力学态,获得了大范围连续可调节光子微波,但此时的微波线宽为~10MHz 量级.然后,基于光电环路及光反馈对线宽的压缩作用^[26],通过调节各个 VA 使之处于不同的开关状态(见表 1),可分别实现单光电环路、双光电环路、双光电环路加光反馈.

表 1 衰减器开关对应的系统运行状态

Table 1 States of the system in different combinations of VAs

System state	VA ₁	VA ₂	VA ₃
Single optoelectronic loop	On	Off	Off
Dual optoelectronic loops	On	On	Off
Dual optoelectronic loops with optical feedback	On	On	On

为方便讨论,把图 1 中 ML 输出光在 A 点位置的光功率标定为注入功率 P_{in} ,频率失谐为 ML 与 SL 自由运行时的频率差 $\Delta f (\Delta f = f_{ML} - f_{SL})$,以 $(P_{in}, \Delta f)$ 表示注入参数.通过改变 $(P_{in}, \Delta f)$,SL 可呈现出注入锁定、P1 振荡、倍周期振荡、混沌等多种非线性动力学状态.本文基于光注入半导体激光器的 P1 动力学态产生光子微波.

2.1 光子微波的产生

首先固定频率失谐 $\Delta f = 20.5$ GHz,此时 SL 在较大 P_{in} 范围内均呈现 P1 态振荡.图 2 所示为注入参数为 $(P_{in}, \Delta f) = (0.25 \text{ mW}, 20.5 \text{ GHz})$ 时,SL 输出的光谱和功率谱,其中图 2(a) 的虚线表示 SL 自由运行时

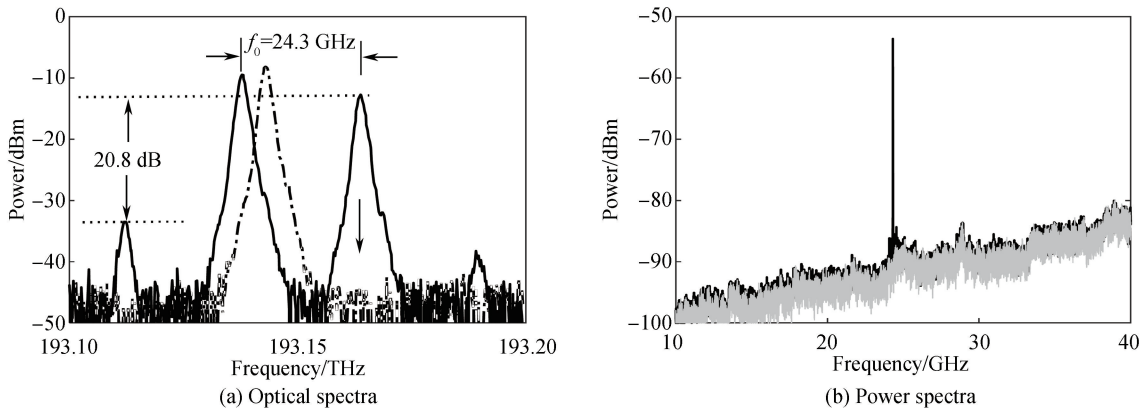


图 2 注入参数为 $(P_{in}, \Delta f) = (0.25 \text{ mW}, 20.5 \text{ GHz})$ 时,SL 输出的光谱和功率谱

Fig.2 Optical spectrum and power spectrum of SL under the injection parameters of $(P_{in}, \Delta f) = (0.25 \text{ mW}, 20.5 \text{ GHz})$

的光谱,实线表示光注入后 SL 输出的 P1 态光谱,图 2(b)中的灰色曲线表示频谱仪噪声,黑色曲线表示光子微波功率谱.从图中可以看出,此时 SL 工作在 P1 动力学态.光注入后 SL 的腔模发生了红移,注入光与 SL 腔模之间的拍频产生了光子微波,其频率为 $f_0 = 24.3$ GHz 且两个边带的功率差为 20.8 dB,该光谱具有明显的单边带结构特性,此类光子微波作为 ROF 的副载波在光纤中传输时可以有效地抑制光纤色散引起的功率损失.

接下来考察光子微波频率分别随注入功率和频率失谐的演化规律,如图 3.其中,图 3(a)给出了频率失谐 $\Delta f = 20.5$ GHz 时,光子微波频率随注入功率的变化曲线.从图中可以看出,在一定的频率失谐下,在较大范围内,光子微波频率随着注入功率的增大而增大,这也为该方案能够大范围连续调谐提供了可能性.图 3(b)给出了注入功率 $P_{in} = 0.25$ mW 时,光子微波频率随频率失谐的变化曲线.从图中可以看出,越大的频率失谐越有利于获得更大的微波频率.因此,在实际应用中可以通过将 P_{in} 与 Δf 的调节相结合来实现光子微波频率大范围连续调谐.在频谱分析仪带宽范围内,实验获得了频率在 8~67GHz 范围内连续可调的光子微波信号,微波频率的漂移范围小于 1 MHz.进一步调节注入参数,通过分析其光谱能够将该方法产生的光子微波频率连续地调节到上百 GHz.

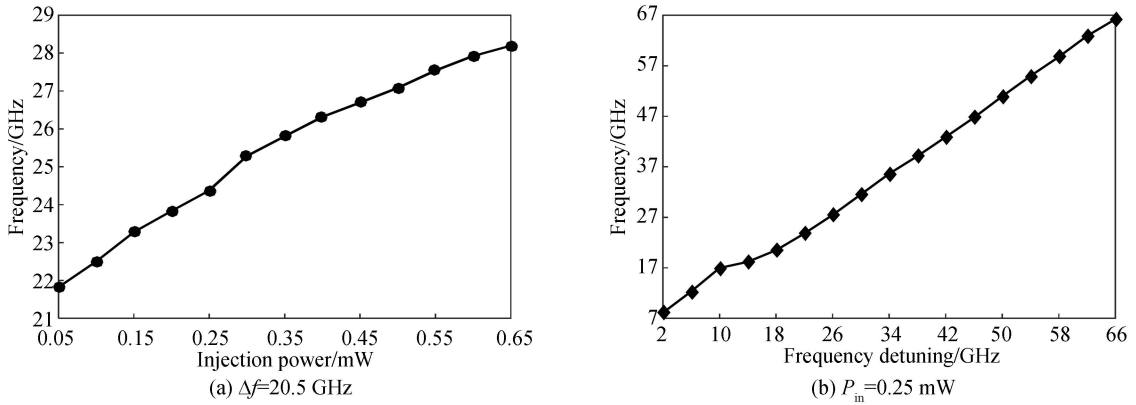


图 3 微波频率随注入光功率和频率失谐的变化曲线

Fig.3 Frequency of photonic microwave variance as a function of injection power and frequency detuning

2.2 光子微波线宽的窄化

由于受到激光器线宽和相位噪声的影响,光注入半导体激光器 P1 态产生的光子微波信号谱线宽通常在 10~100 MHz 范围,而大多数的应用领域都要求微波信号具有较窄的线宽,因此需要采用相应技术对微波信号谱线进行窄化.引入具有窄线宽特征的光电环路来对光子微波线宽进行优化.在如图 1 所示实验装置中,通过控制 VA_1 、 VA_2 和 VA_3 的开关状态能够实现光注入 SL、单光电环路、双光电环路以及双光电环路加光反馈等系统运行条件.分别考察这四种运行条件下光子微波信号的线宽.考虑到实验中所获取的功率谱具有不规则起伏,不能采用传统的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)或 3 dB 线宽等描述方法来标定微波线宽,因此采用功率谱分布的标准偏差来标定微波线宽^[29],其定义为

$$\Delta\nu = [\langle \nu^2 \rangle - \langle \nu \rangle^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中, ν 表示频率,而

$$\langle \nu^p \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu^p P(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) d\nu} \quad (p = 1, 2) \quad (2)$$

图 4 为光子微波线宽窄化效果.将图 2 中所产生的光子微波频率 $f_0 = 24.3$ GHz 作为中心频率,考察频率偏差在 100 MHz 范围内的功率谱.其中图 4(a)为光注入 SL 运行在 P1 动力学态时的功率谱,由于此时并未引入线宽压缩机制,因此该光子微波线宽 $\Delta\nu = 8.6$ MHz,且信噪比相对较低.为此,首先引入单光电环路,可以看出此时的光子微波线宽大幅度地减小为 $\Delta\nu = 177$ kHz,如图 4(b).为了解决单模输出与高 Q 值之间的矛盾,进一步引入双光电环路,实验中测得的功率谱图 4(c)显示其对应的光子微波线宽被进一步压缩至 $\Delta\nu = 113$ kHz.最后,在双光电环路的基础上再引入光反馈并获得了线宽为 $\Delta\nu = 30$ kHz 的光子微波信号,同

时测得其信噪比可达 40 dB,如图 4(d).

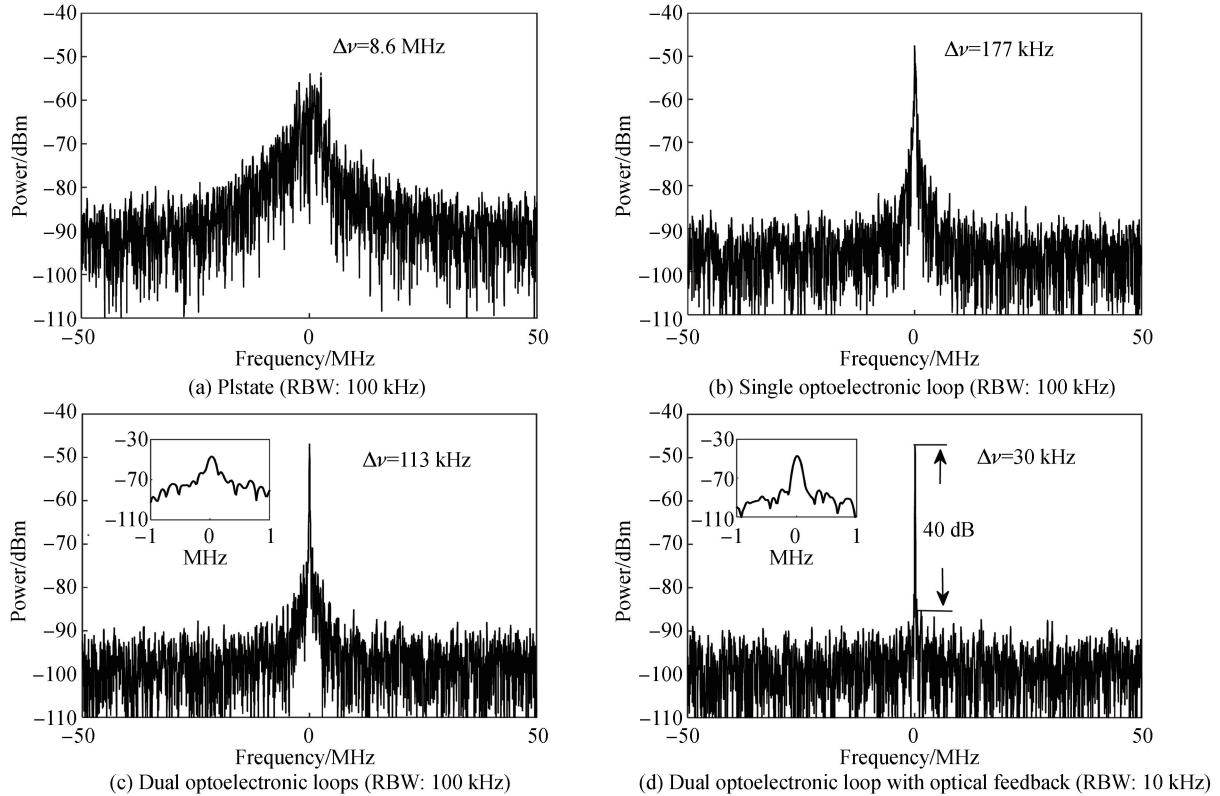


图 4 注入参数 $(P_{in}, \Delta f) = (0.25 \text{ mW}, 20.5 \text{ GHz})$ 时,以微波频率为中心 100 MHz 范围内的功率谱
 Fig.4 Power spectra centered at the photonic microwave frequency with the injection parameters of $(P_{in}, \Delta f) = (0.25 \text{ mW}, 20.5 \text{ GHz})$ in the span of 100 MHz ($\Delta\nu$ is the linewidth of the photonic microwave)

此外,还考察了在一定的 P_{in} 下,利用频率失谐 Δf 连续调节光子微波频率时其线宽的压缩效果,结果如图 5.从图中可以看出,在此频率范围内光子微波的线宽压缩效果与图 4 中展示的效果相似.研究表明,光电环路的加入能够在较大的频率范围内显著地改善光注入半导体激光器 P1 态产生的光子微波信号质量,且双光电环路较单光电环路能够更有效地抑制频率边峰和压缩微波线宽;在加入光反馈后,光子微波频率的边峰得到进一步抑制,线宽进一步地被压缩;相比于没有加入光电环路的情形,光子微波线宽被压缩了三个数量级.另外,从图中还可以看出,光反馈与光电环路对不同频率的微波而言,线宽压缩效果几乎相当.因此可以推测,当光电环路中采用具有更大带宽的器件时,可以得到更高频的窄线宽微波信号.

3 结论

本文对基于光注入半导体激光器的单周期动力学态结合光电环路产生频率大范围连续可调、窄线宽光子微波信号的方案进行了实验研究.结果表明:光注入 SL 在一定条件下能够呈现 P1 动力学态,其产生的光子微波频率可在 8~67 GHz 大范围内连续调节,且该频率会随注入功率和频率失谐的增加而增大;在适当的注入参数下,获得了频率为 24.3 GHz、线宽为 8.6 MHz 且光谱具有单边带结构的光子微波;通过逐步引入

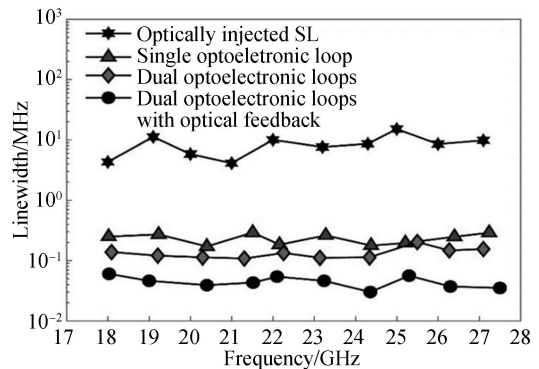


图 5 注入功率 $P_{in} = 0.25 \text{ mW}$ 时,光子微波信号线宽随微波频率的变化曲线

Fig.5 Linewidth of photonic microwave signal variance as function of microwave frequency when $P_{in} = 0.25 \text{ mW}$

单光电环路、双光电环路结构并结合光反馈,该光子微波线宽能够逐渐地被压缩,最终获得了标准差线宽为 30 kHz 且具有 40 dB 以上信噪比的光子微波信号。

参考文献

- [1] YAO Jian-ping. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(3): 314-335.
- [2] 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.
- [3] JIA Zhen-sheng, YU Jian-jun, CHANG Gee-kung. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(16): 1726-1728.
- [4] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319-330.
- [5] TONDA-GOLDSTEIN S, DOLFI D, MONSTERLEET A, *et al.* Optical signal processing in Radar systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2006, **54**(2): 847-853.
- [6] BRAUN R P, GROSSKOPF G, ROHDE D, *et al.* Low-phase-noise millimeter-wave generation at 64 GHz and data transmission using optical sideband injection locking[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(5): 728-730.
- [7] HWANG Sheng-kwang, CHEN Sze-chun, HSIEH Shie-chin, *et al.* Photonic microwave generation and transmission using direct modulation of stably injection-locked semiconductor lasers[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(14): 3581-3589.
- [8] 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 Mach Zehnder Modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0906001
汪东,戴博,任栎亲,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.
- [9] QI Gao-hua, YAO Jian-ping, SEREGELYI J, *et al.* Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2005, **53**(10): 3090-3097.
- [10] HYODOM, ABEDIN K S, ONODER 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.
- [11] GENEST J, CHAMBERLAND M, TREMBLAY P, *et al.* Microwave signals generated by optical heterodyne between injection-locked semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(6): 989-998.
- [12] LIU Wei-sheng, JIANG Meng, CHEN Da-ru, *et al.* Dual-wavelength single-longitudinal-mode polarization-maintaining fiber laser and its application in microwave generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(20): 4455-4459.
- [13] 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.
- [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] NIU Sheng-xiao, WANG Yun-cai, HE Hu-cheng, *et al.* Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7241-7245.
牛生晓,王云才,贺虎成,等. 光注入半导体激光器产生可调谐高频微波[J]. 物理学报,2009,**58**(10):7241-7245.
- [17] 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.
- [18] LO Kai-hung, HWANG Sheng-kwang, DONATI S, *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.
- [19] CHAN Sze-chun, DIAZ R, LIU Jia-ming. Novel photonic applications of nonlinear semiconductor laser dynamics[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2008, **40**(2-4): 83-95.
- [20] 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.
- [21] LIN Xiao-dong, DENG Tao, XIE Yi-yuan, *et al.* Generation of photonic microwave based on the period-one oscillation of an optically injected semiconductor lasers and all-optical linewidth narrowing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(19): 194212.
林晓东,邓涛,解宜原,等. 基于光注入半导体激光器单周期振荡的光子微波产生及全光线宽窄化[J]. 物理学报,2012,**61**(19):194212.
- [22] ZHUNAG Jun-ping, CHAN Sze-chun. Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor

- laser dynamics with optical feedback stabilization[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(3): 344-346.
- [23] LIANG Qing, FAN Li, WU Zheng-mao, *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.
- [24] SUELZER J S, SIMPSON T B, DEVGAN P, USECHAK N G. Tunable, low-phase-noise microwave signals from an optically injected semiconductor laser with opto-electronic feedback[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(16): 3181-3184.
- [25] LEE Kwang-hyug, KIM Jae-young, CHOI Woo-young. A 30-GHz self-injection-locked oscillator having a long optical delay line for phase-noise reduction[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(24): 1982-1984.
- [26] LU Dan, PAN Bi-wei, CHEN Hai-bo, *et al.* Frequency-tunable optoelectronic oscillator using a dual-mode amplified feedback laser as an electrically controlled active microwave photonic filter[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(18): 4340-4343.
- [27] CHEN Meng, XUE Chen-yang, TANG Jun, *et al.* Tunable optoelectronic oscillator based on planar waveguide resonator[J] *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0423001
陈猛,薛晨阳,唐军,等. 基于平面光波导谐振腔的可调谐光电振荡器[J]. 光子学报, 2017, **46**(4):0423001.
- [28] BAI Guang-fu, JIANG Yang, HU Lin. Tunable optoelectronic oscillator based on injection-locking effect in distributed feed-back laser diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5): 0523004.
白光富,江阳,胡林. 基于DFB腔注入锁定效应的可调谐光电振荡器[J]. 光子学报, 2017, **46**(5):0523004
- [29] 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.