

doi:10.3788/gzxb20174604.0423001

基于平面光波导谐振腔的可调谐光电振荡器

陈猛,薛晨阳,唐军,刘文耀,郑永秋,钱坤,谢成峰

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘 要:提出了一种基于平面光波导谐振腔的可调谐光电振荡器.该振荡器中,相位调制器串联光波导谐振腔,取代了传统系统中的强度调制器、长光纤和滤波器.由于光学谐振腔对光子频率和相位敏感,调节激光器改变输出光的波长,不仅可以调制光的强度,还可以对微波光子进行选频输出.当光子在波导腔中发生谐振时,产生很强的延时特性,可以取代传统系统中的长光纤.整个光电振荡器系统体积为长 29.5 cm、宽 21 cm、高 7 cm.实验中,改变 0.1 pm 的光子波长,能够产生步长为 12.5~35.5 MHz 的调谐,调谐范围达 2 GHz,且系统能够产生 10 GHz 的微波信号,在中心频率为 10 GHz 处其相位噪声为 -109.7 dBc/Hz@10 kHz.该研究为光电振荡器的小型化和实用化提供了一种新的思路.

关键词:光电振荡器;平面光波导谐振腔;可调谐;微波光子;相位噪声

中图分类号:TN751.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0423001-6

Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Planar Waveguide Resonator

CHEN Meng, XUE Chen-yang, TANG Jun, LIU Wen-yao, ZHENG Yong-qiu,
QIAN Kun, XIE Cheng-feng

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education;
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A tunable optical oscillator based on a planar optical waveguide resonator was proposed. In this oscillator, the phase modulator is connected in series with the optical waveguide resonant cavity to replace the intensity modulator, the long fiber and the filter in the traditional system. Because the optical resonator is particularly sensitive to photon frequency and photon phase, by adjusting the laser wavelength, not only the intensity of the light can be adjusted, but also the frequency of the microwave photons can be selected. When the photon is resonant in the waveguide cavity, it will produce a strong delay characteristic, which can be used to replace the long fiber in the traditional system. The whole photoelectric oscillator system volume is long 29.5 cm, wide 21 cm, high 7 cm. In the experiment, each time to change the photon wavelength 0.1 pm, resulting in a 12.5~35.5 MHz step tuning effect, tuning range of 2 GHz. The system generates a 10 GHz microwave signal having a phase noise of -109.7 dBc/Hz@10 kHz at a center frequency of 10 GHz. Which provides a new idea for the miniaturization and practical application of the optical oscillator.

Key words: Optoelectronics oscillator; OEO; Optical resonator; The tunable; Microwave photons; Phase noise

OCIS Codes: 230.4910; 230.7370; 130.0130; 130.0250; 130.3990; 140.4780

0 引言

光电振荡器(Optoelectronics Oscillator, OEO)^[1-3]作为一种新型的微波信号发生器,可以产生频率高达

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金项目(No. 51225504)和国家高技术研究发展计划(No. 2015AA042601)资助

第一作者:陈猛(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为光学谐振腔、光电振荡器. Email: mengmengsj@qq.com

导师(通讯作者):唐军(1981-),男,博士,教授,主要研究方向为谐振式光学陀螺、光电振荡器. Email: tangjun@nuc.edu.cn

收稿日期:2016-11-29;录用日期:2017-01-04

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

几百 GHz、超高频谱纯度的射频信号和微波光子信号^[4]。而低相位噪声、高频谱纯度、高品质因数的微波信号又被广泛地应用于宇宙探测、军事雷达、航空航天、通讯系统和电子对抗等领域^[5-6]。近年来,对于 OEO 的研究从降低相位噪声转移到实现可调谐输出,并提出了一系列方案。

2011 年,美国宇航局下面的 OEwaves 公司研究团队在《Nature》上发表了基于回廊腔结构的研究成果,提出了性能稳定、趋于实用化和小型化的 OEO 方案^[7-8],但其内部结构复杂,对材料要求特殊,加工工艺要求极高,并且其细节作为军事核心技术拒绝向外界公开。2012 年,潘时龙团队提出了基于偏振调制器结合布喇格光纤光栅和偏振分束器的可调谐光电振荡器,调谐范围为 5.8~11.8 GHz^[9];同年,该团队提出了基于偏振调制器的双环路四倍频的光电振荡器,倍频后最高频率达 32~42.7 GHz^[10]。2014 年,祝宁华团队提出了基于偏振调制器和 Signac 环的四倍频光电振荡器,联合使用偏振控制器和偏振分束器等效于强度调制器,通过四倍频,系统最高可以产生 39.74 GHz 的微波信号^[11];2015 年,该团队又提出了基于偏振分束器和偏振控制器的可调谐光电振荡器,通过调整 OEO 环内部光学带通滤波器的带宽,产生 8.8~37.6 GHz 的可调谐光电振荡器^[12]。两个团队都在 OEO 系统中引入偏振调制器、偏振分束器、等偏振光学器件,取代传统系统中的强度调制器实现倍频,并通过调节偏振控制器,实现对光子的选频滤波,最终实现输出的可调谐。其优点是通过倍频,可以产生超高频率的微波信号,其不足是延时器件都采用几百米到上千米长度不等的单模光纤,且由于光学器件太多,系统结构复杂庞大,不利于集成。

本文提出了一种基于平面光波导谐振腔的可调谐 OEO 方案,将光波导谐振腔和相位调制器串联,由于光学腔对光子的选频特性,光学腔不仅可以作为光子滤波器使用,而且结合相位调制器,可以取代传统 OEO 系统中的强度调制器和长光纤,通过调节输出光子的频率,调制经过谐振腔后的光强,并将光强的变化反馈回相位调制器,最终形成稳定的振荡输出。经过谐振腔后的光子具有很强的延时效应,利用光学谐振腔替代 OEO 系统中的长光纤,简化系统结构和体积,最终,整个 OEO 系统体积为长 29.5 cm、宽 21 cm、高 7 cm,为光电振荡器的小型化和实用化提供了一种新的思路。

1 理论分析

1.1 光学谐振腔理论分析

光学谐振腔结构如图 1,根据谐振理论^[13-15],光子从 E_1 端输入后,要想经过两个耦合区 C_1 、 C_2 后最终在 E_5 端输出,必须满足的相位、频率和波长的谐振条件分别为

$$\beta L = m \cdot 2\pi \quad (1)$$

$$v = \frac{mc}{nL} \quad (2)$$

$$nL = m\lambda \quad (3)$$

式中, β 为波导的光学的传播常量, L 为腔长, m 为正整数, v 为光子谐振频率, c 为光速, λ 为光子谐振波长, n 为波导折射率^[16-17]。

不满足谐振条件的光子从 E_1 端输入后直接从 E_4 端输出,根据式(2)可知:谐振腔可以作为光子滤波器,其等效通带带宽为透射谱的半高全宽(Full Width at Half Maximum,FWHM),等效抑制带宽为自由频谱宽度(Free Spectral Range,FSR)^[18],即

$$\text{FSR} = \frac{c}{nL} \quad (4)$$

根据式(3)可知,如果改变波长,就可以改变光子经过谐振腔时的谐振状态,从而实现输出的可调谐。

1.2 OEO 理论分析

传统的 OEO 结构是由激光源、强度调制器、长光纤、光电探测器、微波滤波器和微波放大器等器件组成的反馈回路。当满足振荡条件时,信号在腔内多次反馈并最终形成稳定的输出。本文在此原理上利用相位调制器+平面光波导谐振腔取代传统 OEO 中的强度调制器,光子经过相位调制器时,其相位会随时间发生改

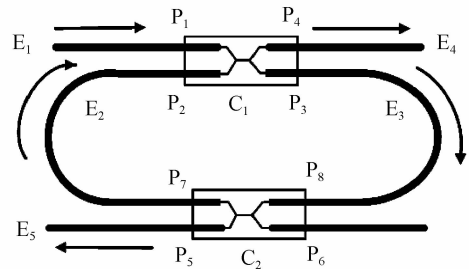


图1 光学谐振腔的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of optical resonator

变,变化相位的光子进入光学谐振腔后其输出端的光强也会发生变化,这一变化的信号最终反馈回相位调制器构成振荡环路,通过多次循环最终形成稳定的射频信号输出,系统结构如图 2 所示。

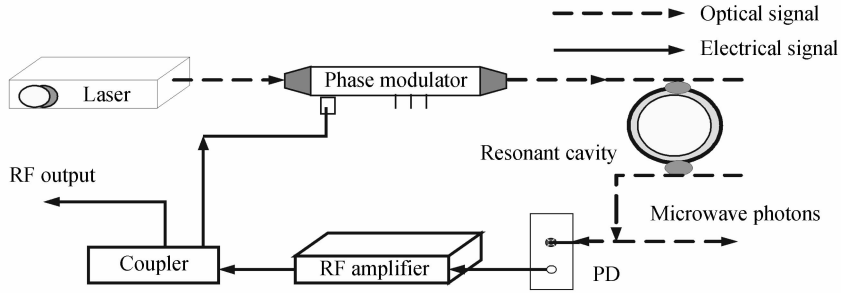


图 2 基于光波导谐振腔的 OEO 系统结构图

Fig. 2 Structure of OEO system based on optical waveguide resonator

根据相关文献分析^[16],经过调制器后光子的电场幅值为

$$E_{in} \approx E_0 e^{-i\omega t} \left[1 - \frac{b}{2} e^{i\Omega t} + \frac{b}{2} e^{-i\Omega t} \right] \quad (5)$$

式中, b 为调制器的调制系数, E_0 为输入光的复振幅, Ω 是 RF(Radio Frequency)输入端的振荡频率. 经过光波导谐振腔后的光子频率为

$$F(\omega) = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 + i(\omega_0 - \omega)}{\gamma_1 + \gamma_2 + i(\omega_0 - \omega)} e^{i\omega\tau} \quad (6)$$

式中, ω 为激光频率, ω_0 为光学腔的谐振频率, γ_1 和 γ_2 是光学腔的本身带宽和负载带宽, τ 是光子的延迟时间. 根据式(5)、(6)可以得出微波光子回路的归一化传递函数为

$$H(\Omega) \approx \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 - i(\Omega - \omega_0 + \omega)} e^{i\Omega\tau} \quad (7)$$

式(7)表示微波光子经过相位调制器和光波导腔后的传输函数,具体指激光器发出的光子经过相位调制器和光学谐振腔后,加载在光子上的微波信号。

2 实验结果与分析

2.1 实验过程与结论

在实验室利用掺杂等工艺控制光波导的折射率和传输损耗,并多次优化耦合间距和耦合深度,设计加工了平面光波导谐振腔,光波导腔芯片尺寸为:长 4.3 cm,宽 3.9 cm,厚度 0.1 cm,如图 3(a),封装后的尺寸为:长 9.8 cm,宽 9.8 cm,厚 0.4 cm,如图 3(b). 透射谱测试结果如图 4. 根据测试结果:FSR=2.1 GHz, FWHM=32.67 MHz, Q 值 1×10^8 . 可以得出其等效通带带宽为 32.67 MHz,其等效抑制带宽为 2.1 GHz.

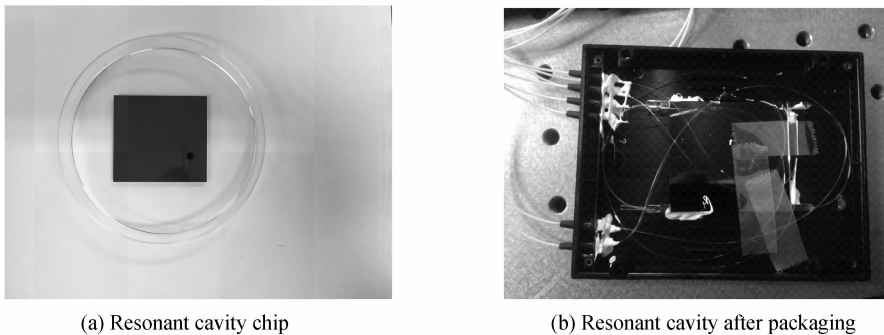


图 3 光波导谐振腔芯片及实物对比图

Fig. 3 Optical waveguide resonator chip and physical comparison

实验室搭建了如图 2 所示的实验系统,所用激光器为 NKT 窄线宽波长可调谐激光器,最小调谐步长为 0.1 pm,频谱分析仪为 Agilent N9030A PXA,相位调制器为 LN53S-FC,光电探测器为 1544-B. 激光器发出的光经相位调制器后进入谐振腔,只有相位条件满足式(1),或波长条件满足式(2)的光子才能进入腔中发生

谐振,并从 E_5 端输出,不满足相位或波长条件的光子从 E_4 端输出.

为了验证所提方案的正确性,对比测试了强度调制器+长光纤+电滤波器的传统 OEO 系统和相位调制器+平面光波导谐振腔的本文提出的 OEO 系统,其输出频谱分别如图 5(a)、(b)所示.

对比分析图 5(a)、(b)可以得出:1)传统 OEO 系统输出的微波信号的边模抑制比为 49 dB,低于本文提出的 OEO 系统中 58 dB 的边模抑制比;2)输出频谱宽度 $\Delta f_1 > \Delta f_2$,本文提出的 OEO 系统输出的信号更加纯净,信噪比更高.利用光学谐振腔作为光子滤波器,微波信号的谐波特性更好,信噪比更高.

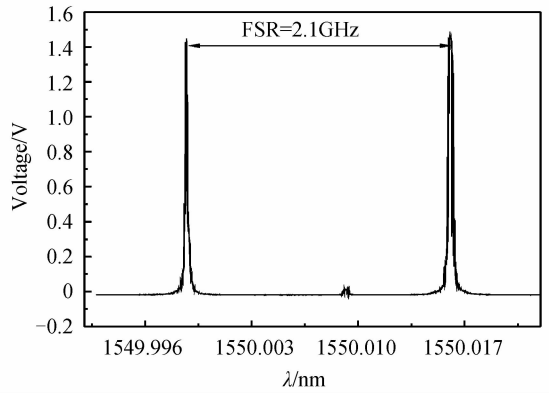
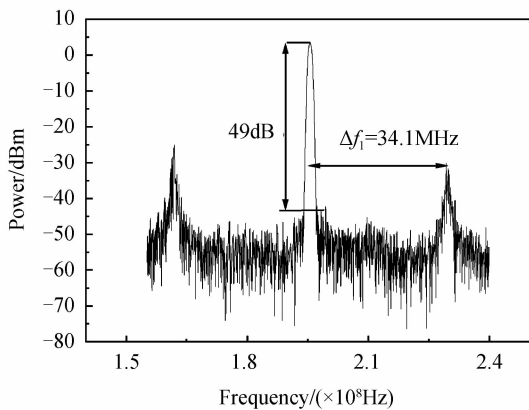
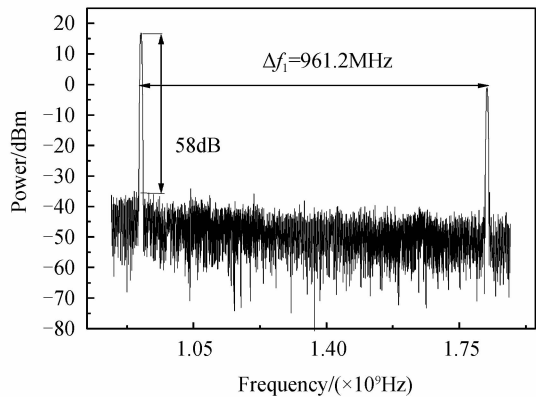


图 4 光波导谐振腔透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of optical waveguide resonator



(a) The output spectrum of traditional OEO system

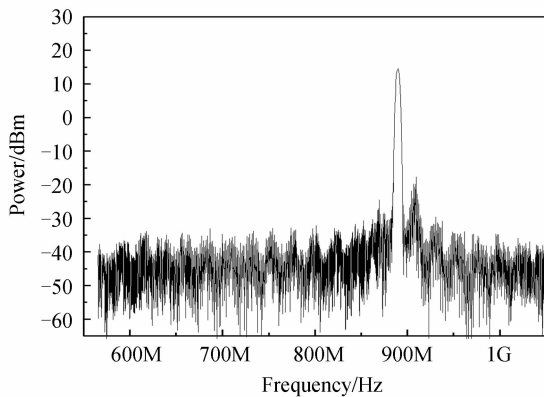


(b) The output spectrum of the new scheme OEO system

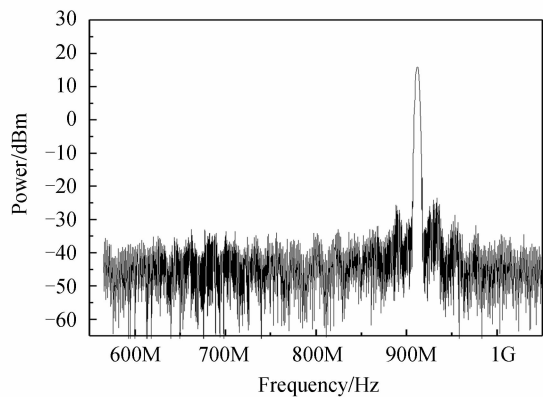
图 5 两种方案输出频谱对比图

Fig. 5 Comparison of two kinds of output spectrum

采用窄带激光器调谐微波信号输出,激光的中心波长为 1 550 nm,调谐步长为 0.1 pm.根据 $c=\lambda \times \nu$,波长变化 $\Delta \lambda=0.1$ pm 时,对应频率变化 $\Delta \nu=12.5$ MHz,由于频率的改变,光子经过谐振腔时其谐振状态发生漂移,从而调谐 OEO 系统的微波输出.图 6 为 OEO 系统调谐输出的连续 4 幅频谱图,其中步长:(a) \rightarrow (b)、(b) \rightarrow (c)、(c) \rightarrow (d)分别为:22.3 MHz、23.2 MHz、23.3 MHz,考虑系统及测量误差,实验结果与理论相符.进一步实验发现:基于平面光波导谐振腔的 OEO 系统最大可调谐范围约等于平面光波导腔的 FSR,实验结果与理论相符.



(a) Center frequency is 0.890GHz



(b) Center frequency is 0.912GHz

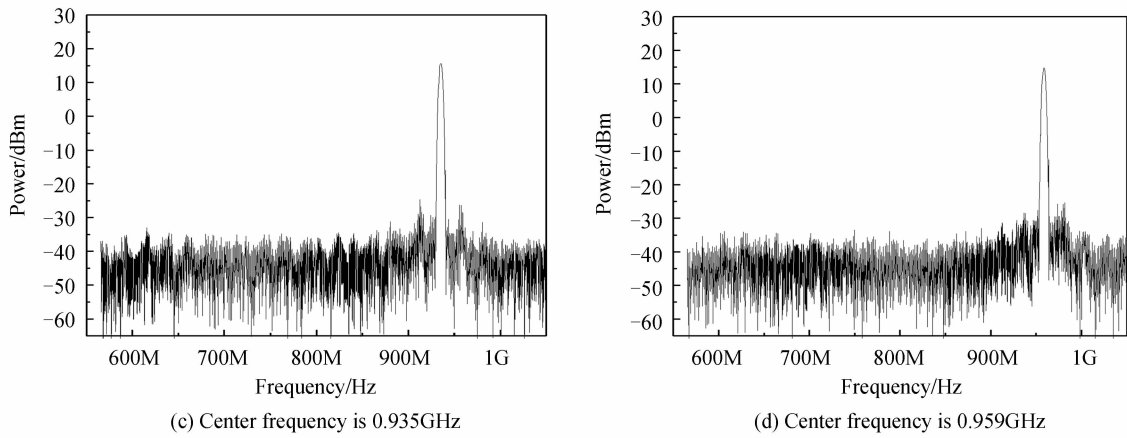


图6 调谐输出频谱图
Fig. 6 Tuned output spectrum

2.2 相位噪声测试结果

低相位噪声是 OEO 的主要特点,也是评价微波信号源的主要指标之一,为了方便与其他同行研究成果进行对比,选择了本系统最高频率 10 GHz 附近信号进行测试,测试相位噪声的工具是 Agilent N9030A PXA 的相位噪声测试模块,测试结果为:相位噪声 $-109.26 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$,如图 7 所示.

3 实验分析

传统 OEO 系统输出微波信号的最高频率严格受强度调制器带宽限制,且高带宽的强度调制器全部由美国进口,价格昂贵,而利用相位调制器串联光波导谐振腔,可以取代传统系统中的强度调制器.其次,在本方案中,平面光波导谐振腔具有滤波器的功能,其等效抑制带宽以及 OEO 系统最大可调谐范围都受谐振腔 FSR 的限制,因此,如果想要获得更大的抑制带宽和更大的可调谐范围,根据式(4) $FSR = \frac{c}{nL}$,可以减小谐振腔的腔长,根据 OEwaves 公司最新研究成果:利用钽酸锂晶体制作直径为 $650 \mu\text{m}$ 谐振腔,可调谐范围达 15 GHz.本方案是通过调谐光子波长而改变光子在谐振腔中的谐振状态,从而调谐微波信号的输出,调谐步长受波长变化量的限制,以中心波长为 1550 nm 的激光为例,波长变化 0.1 pm ,频率变化 12.5 MHz ,波长变化 0.01 pm ,则频率变化 1.25 MHz ,理论上可以得出:如果想要更高的调谐准确度,可以选择准确度更高的可调谐激光器.同时根据式(1)、(2),可以选择移频器或移相器,理论上也可以调谐 OEO 系统的射频输出.

OEO 系统输出射频信号的相位噪声包括:热噪声、散粒噪声、闪烁噪声^[17],主要由光源、探测器、放大器引入.为了降低信号的相位噪声,本课题组在实验室进行了一系列相关对此实验,通过实验发现:高性能光电探测器所引入的噪声最低,相比较其他噪声而言可以忽略不计;通过引入温控系统,可以提高 OEO 系统的频率稳定性,降低由于温度变化所带来系统不稳定性的影响;选用窄线宽激光器可以降低光源引入的噪声,相位噪声降低幅度在 5 dB 左右;其中,微波放大器引入的噪声最大,选用低噪声窄带微波放大器,可以大幅降低微波信号的相位噪声,降低幅度约为 $10 \sim 20 \text{ dB}$.

4 结论

提出了一种基于平面光波导谐振腔的可调谐 OEO,将光波导谐振腔和相位调制器串联,取代传统 OEO 系统中的强度调制器、长光纤和滤波器.该振荡器中,光波导谐振腔不仅可以作为光子滤波器,还可以充当长光纤起延时的作用.通过调节激光器的输出波长,实现了微波信号的可调谐输出,调谐步长为 $12.5 \text{ MHz} \sim$

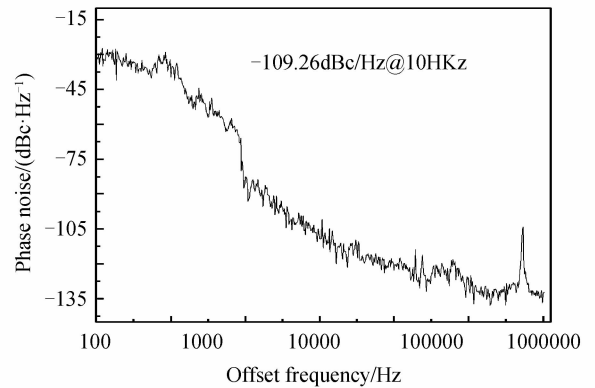


图7 相位噪声测试图
Fig. 7 Phase noise test chart

35.5 MHz,最大可调谐范围约为 2 GHz,中心频率 10GHz 处其相位噪声为 -109.26 dBc/Hz@10 kHz. 在 OEO 系统中引入光波导谐振腔,整个 OEO 系统体积缩小到长 29.5 cm、宽 21 cm、高 7 cm,为以后光电振荡器的小型化和实用化提供了一种新的思路.

参考文献

- [1] JIANG Yang, YU Jin-long. An optical domain combined dual-Loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Letters*, 2007, **19**(11): 807-809.
- [2] LI W, YAO J. A wideband frequency tunable optoelectronic oscillator incorporating a tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2012, **60**(6): 1735-1742.
- [3] KONG F, LI W, YAO J. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(14): 2611-2613.
- [4] ELIYAHU D, MATSKO A B, LLCHENKO VS, *et al.* Spectrally pure RF Photonic source based on a resonant optical hyper-parametric oscillator[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2014, **8960**(1): 271-283.
- [5] YUAN Hui-chao, GAO Yan-yu. Research and complement of mm-wave low phase noise frequency synthesizer[J]. *Semiconductor Technology*, 2009, **34**(9): 927-929.
袁慧超,高燕宇.低相噪毫米波源的研制[J]. *半导体技术*, 2009, **34**(9):927-929.
- [6] LUTE M, LIANG W, DANNY E, *et al.* Spectrally pure and stable hyper-parametric RF photonic oscillator[J]. *IEEE International Frequency Control Symposium*, 2014: 1-3.
- [7] MALEKI L. The optoelectronic oscillator[J]. *Nature photonics*, 2011, **5**(12): 728-730.
- [8] LLCHENKO V S, BENNET A M, SANTINI P. Whispering gallery mode diamond resonator[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(21): 4320-4323.
- [9] TANG Zhen-zhou, PAN Shi-long, ZHU Dan, *et al.* Tunable optoelectronic oscillator based on a polarization modulator and a chirped FBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2012, **24**(17): 1487-1489.
- [10] ZHU Dan, PAN Shi-long, BEN De. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(3): 194-196.
- [11] WANG Wen-ting, LI Wei, ZHU Ning-hua. Frequency quadrupling optoelectronic oscillator using a single polarization modulator in a Sagnac loop[J]. *Optics Communications*, 2014, **318**(5): 162-165.
- [12] LI Wei, LIU Jian-guo, ZHU Hua-ning. A widely and continuously tunable frequency doubling optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(13): 1461-1464.
- [13] STOKES L F, CHODOROW M, SHAW H J. All-single-mode fiber resonator[J]. *Optics Letters*, 1982, **7**(6): 288-290.
- [14] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSK F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, **31**(2): 97-105.
- [15] BAMES J A, GAGKIAEDI G, LOOCK H P. Cavity-enhanced spectroscopy on silica microsphere resonators [J]. *Springer*, 2014, **179**: 351-383.
- [16] MILENKO K, KONIDAKIS I, PISSADAKIS S. Silver iodide phosphate glass microsphere resonator integrated on an optical fiber taper[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(10): 2185-2188.
- [17] LIU Jie, TIE Sheng-nian, LU Hui-dong. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(5): 1021-1027.
刘杰,铁生年,卢辉东.多信道二维光子晶体滤波器[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(5): 1021-1027.
- [18] ELIYAHU D, LIANG W, ELIJAH D, *et al.* Resonant widely tunable optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(15): 1535-1538.
- [19] LI Chuan-qi, FAN Qing-bin, LU Ye, *et al.* Multi-channel heterophotonic crystal filter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2171-2177.
李传起,范庆斌,陆叶,等.多信道异质结构光子晶体滤波器[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(8): 2171-2177.