

一种基于串联谐振腔的高性能光电振荡器

黄港滨 王菊 王文睿 贾石 于晋龙

An optoelectronic oscillator based on series resonance cavity

Huang Gang-Bin Wang Ju Wang Wen-Rui Jia Shi Yu Jin-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重复频率可调谐的超低抖动光窄脉冲源的研究

Research of optical short pulse source with tunable repetition rate and ultra-low timing jitter

物理学报.2015, 64(18): 184201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184201>

基于波长双环路结构的新型光电振荡器的研究

Research of a novel optoelectronic oscillator based on dual-loop structure with different wavelengths

物理学报.2015, 64(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154204>

单线态分裂的超快光谱学研究

Ultrafast spectroscopic study for singlet fission

物理学报.2015, 64(9): 094210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094210>

掺铒光纤中亚稳态粒子振荡和慢光时间延迟关系研究

Study on the relationship between the population of metastable state and time delay in an erbium-doped optical fiber

物理学报.2013, 62(21): 214205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214205>

基于注入半导体激光器的微波副载波相位调制信号产生

Generation of microwave subcarrier phase modulation signal based on optical injection into a semiconductor laser

物理学报.2012, 61(5): 054208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.054208>

## 一种基于串联谐振腔的高性能光电振荡器\*

黄港滨 王菊<sup>†</sup> 王文睿 贾石 于晋龙

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2015年8月25日收到; 2015年10月28日收到修改稿)

提出了一种利用串联谐振腔来抑制光电振荡器边模的方案. 此方案中, 在传统光电振荡器结构中加入无源微波谐振腔结构来提高滤波器的  $Q$  值. 分析了该结构的基本原理, 并与传统光电振荡器结构进行对比, 此结构能有效提高边模抑制比. 实验中产生了 10 GHz 的微波信号, 所测得的边模抑制比达 72 dB, 单边带相位噪声为  $-122$  dBc/Hz@10 kHz. 同时, 利用锁相技术, 振荡频率的稳定性得到了很大的改善, 在 3 h 内漂移小于  $\pm 4$  Hz. 该方案无需增加有源器件, 保留了传统光电振荡器低相位噪声的优势, 又有效抑制了边模, 为光电振荡器的应用提供了一种新的方法.

**关键词:** 光电振荡器, 边模抑制, 微波谐振腔, 稳定性

**PACS:** 42.50.Md, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.65.044204

## 1 引言

高频谱纯度、低相位噪声的微波信号源被广泛应用于天文探测、航空、雷达、导航、通信系统和电子对抗等领域<sup>[1-3]</sup>. 随着应用需求的提高, 微波系统对振荡器输出信号的噪声特性要求越来越高<sup>[4]</sup>. 随着微波光子技术的发展, 利用光子技术产生微波信号一直受到广泛的关注<sup>[5-7]</sup>. 其中, 1996年美国国家航空航天局喷气动力实验室的 Yao 和 Makeli<sup>[8,9]</sup> 提出了光电振荡器 (optoelectronic oscillator, OEO) 的概念. OEO 作为一种新型的微波信号发生器, 可产生高达数百 GHz 的高纯度微波信号, 其储能元件的  $Q$  值高达  $10^{10}$ , 产生 10 GHz 的高频信号的相位噪声低至  $-163$  dBc/Hz@6 kHz, 是一种非常理想的高性能微波振荡器<sup>[10]</sup>.

传统的 OEO 结构是一个包含光源、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. 根据 OEO 的工作原理, 要获得低相位噪声的微波信号, 谐振腔必须具有高  $Q$  值 ( $Q = 2\pi f t_d$ ,  $f$  为起振频率,  $t_d$  为环路

延时时间,  $Q$  衡量了谐振腔的储能能力). 环路中光纤越长,  $Q$  值越高. 但是长光纤会引入新的问题, 就是会导致谐振腔内起振模式之间的频率间隔 ( $\Delta f = c/nL$ , 其中  $c$  为光速,  $n$  为折射率,  $L$  为腔长) 变得很小. 而目前微波滤波器难以提供足够窄的带宽实现单一模式的选择. 为了解决这一问题, 研究者提出了一些采用多环路结构抑制边模的方案.

多环路结构是一类抑制边模的有效方法. Yao 和 Maleki<sup>[11]</sup> 在 2000 年提出了光电混合双环路 OEO 的方案, 边模抑制得到了很大改善, 但是该方案需要两套独立的高速光电探测器、微波放大器和滤波器等, 大大增加了系统成本. Jiang 等<sup>[12]</sup> 在 2007 年提出了光域偏振双环路的方案, 实现了双环路在光域耦合, 有效抑制边模的同时又节省了成本. 但是由于偏振分束/合束器的消光比有限, 致使不同光路的干涉和拍噪声严重影响 OEO 的相位噪声. 针对偏振双环的不足, Jia 等<sup>[13]</sup> 在 2015 年提出了基于波长双环结构的方案, 该方案解决了不同光环路的随机干涉和差拍噪声, 而且边模得到较好的抑制, 但该方案使用两个激光器、波分复用器等器件, 系统较为复杂. 上述多环结构的 OEO 都是属于

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61427817, 61405142) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20120032130010) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: wangju@tju.edu.cn

并联结构,其实质并没有提高谐振腔的 $Q$ 值,而且需要同时对两个环进行控制,多个控制变量增加了控制复杂度,不利于频率的稳定性控制.

本文提出了一种利用无源微波谐振腔结构来抑制边模的方法.利用两个反射点,形成一个无源微波谐振腔,可以通过控制微波反射系数,从而改变谐振腔的 $Q$ 值.本方案是在传统OEO系统中插入两段钻孔电缆,放置在微波滤波器两端,形成一个新的谐振腔.通过调节端面的反射系数,可以进一步提高整个环路的选频特性.实验表明,采用此方案后,OEO的边模抑制比可达72 dB.与传统OEO方案相比,该方案只需要在传统OEO方案中增加两段钻孔电缆,不用增加新的有源器件,几乎不会额外引入新的噪声.与双环结构相比,此方案还属于单环结构,针对频率稳定性,减少了控制变量.因此,本方案具有结构简单、成本低的特点,不仅实现了抑制边模的效果,而且不会引入新的噪声和增加系统的控制复杂度,为OEO的实用提供一种新的思路.

## 2 理论分析

本文提出利用无源微波谐振腔结构抑制OEO边模的实验方案,该结构是在传统OEO环路的微波滤波器两端分别插入一段钻孔电缆.传统OEO中的微波滤波器的带宽无法足够窄,因此在滤波器带宽内存在多模起振.本方案中插入的两段钻孔电缆和微波滤波器组成一个谐振腔,能够进一步减小环路的选频带宽,如图1所示.

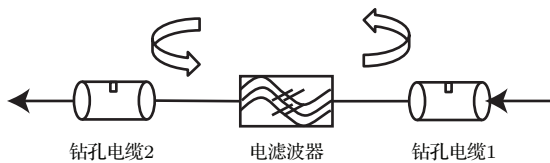


图1 微波谐振腔示意图

Fig. 1. Diagram of microwave resonant cavity.

依据传输线理论<sup>[14,15]</sup>,同轴线特征阻抗可表示为

$$Z_c = \frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} = \frac{E_\rho \ln(b/a)}{2\pi H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\ln(b/a)}{2\pi} = \frac{\eta \ln(b/a)}{2\pi}, \quad (1)$$

其中 $\eta$ 为介质层的介电常数, $a$ 和 $b$ 分别为内外导体的直径.由此知道,我们可以通过调节钻孔的形

状、直径和深度等改变电缆的反射系数.这里利用HFSS进行仿真,电缆的内导体直径为0.94 mm,材料为铜;介质层直径为2.94 mm,材料为聚乙烯.固定钻孔的深度为1 mm,通过改变钻孔的半径可以得到不同的反射系数,如图2所示.

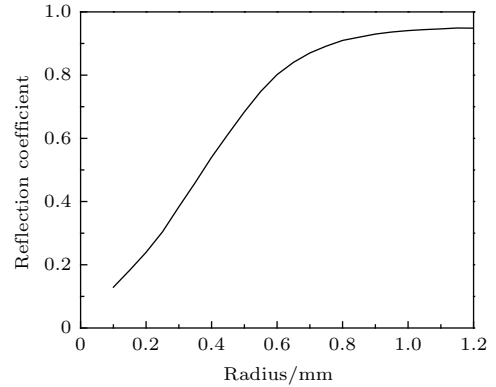


图2 反射系数与钻孔半径的关系仿真图

Fig. 2. Simulation of reflection coefficient as a function of drill radius.

如图1所示,将两段钻孔电缆放置在滤波器两端后,OEO环路中的部分能量在两段钻孔电缆之间发生来回反射,形成一个新的谐振腔.这里我们假设两段钻孔电缆的性能完全一致,反射系数为 $R$ ,传输系数为 $T$ ,微波滤波器的频率响应为 $F(\omega)$ .通过对钻孔电缆和滤波器形成的新谐振腔进行分析<sup>[16,17]</sup>,我们可以得到新腔的透射信号的传输函数 $H(\omega)$ 为

$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(1 - R^2)a e^{-j\omega\tau} F(\omega)}{1 - R^2 a^2 e^{j\omega 2\tau} F^2(\omega)}. \quad (2)$$

由(2)式可知,新的谐振腔的滤波特性由微波滤波器的传输特性、两段电缆的反射系数和电缆之间的传输延时共同决定.计算 $H(\omega)$ 的传输特性,图3所示为反射系数分别为0.3, 0.6和0.9时所得的结果和独立微波滤波器的幅频特性,这里延时 $\tau = 100$  ns,损耗 $a = 0.8$ ,滤波器的3 dB带宽为10 MHz.在实验中,设计OEO环路的小信号增益为2,根据振荡器的起振条件,环路增益必须大于1,这里我们把环路增益做归一化处理,得到图3所示阈值线(threshold),只有在阈值线以上才满足OEO起振条件,把满足起振条件的频率区域定义为起振带宽.从图3可以看出,随着反射的逐渐增加,微波谐振腔的通带变窄,环路内满足起振条件的模式越来越少.通过和未加钻孔电缆时的滤波器传输特性相比较,可以看出,当反射超过一定值后,

加入钻孔电缆可以明显改善滤波带宽, 满足条件的振荡模式明显减少.

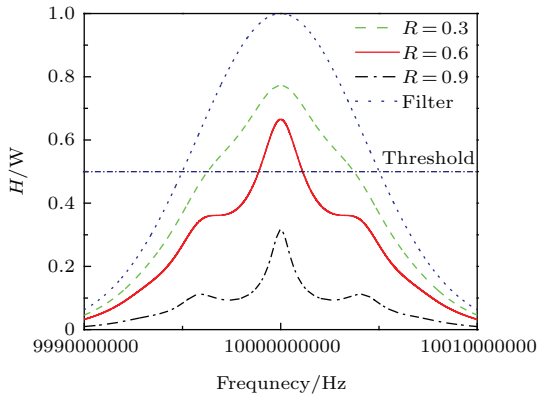


图3 (网刊彩色) 不同反射系数下微波谐振腔的频率响应  
Fig. 3. (color online) Frequency response of microwave resonant cavity with different reflection coefficients.

另外, OEO的起振还需要满足一定的环路增益, 而微波谐振腔内存在损耗, 从图3可以得到, 随着反射的增大, 微波谐振腔的插入损耗增大, 当反射超过一定值后, OEO环路增益会小于1而导致所有模式无法起振. 因此, 在微波谐振腔的频率响应和OEO的起振阈值条件的共同作用下, 我们可以适当地调整其中的参数, 使得整个OEO环路通带内只有少量的模式能够通过, 从而有效抑制OEO的边模, 甚至实现单模起振. 图4所示是在环路增益一定的情况下, 整个OEO环路的起振带宽随着反射系数的变化. 从图4中可以看出, 在其他条件不变的情况下, OEO的起振带宽随着反射系数的增加显著减少, 可以使起振的模式数量减少, 但反射系数不能太大, 否则会导致所有模式都无法起振.

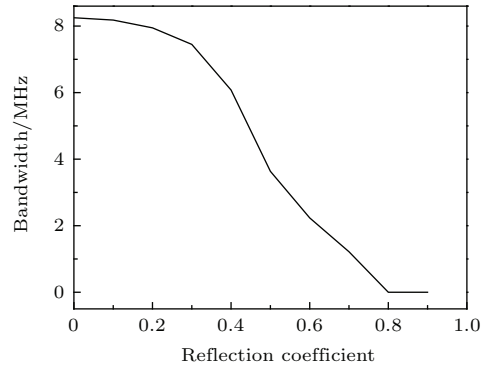


图4 反射系数与起振带宽的关系  
Fig. 4. Relationship between reflection coefficient and bandwidth.

### 3 实验结果与分析

基于上面的理论分析, 我们对所提出的方案搭建实验进行了验证, 如图5所示. 整个实验系统包括一个分布式反馈(DFB)激光器, 一个马赫-曾德尔铌酸锂强度调制器, 一盘长光纤(1.5 km), 一个高速(20 Gb/s)的光电探测器, 一个微波放大器, 一个中心频率为10 GHz、带宽10 MHz的微波滤波器和两段钻孔电缆等. DFB激光器发出波长为1550 nm的激光, 通过工作在线性区的强度调制器后, 进入长光纤延时储能, 再被光电探测器转化为电信号, 然后进入钻孔电缆和微波滤波器构成的新谐振腔, 完成滤波后经过微波放大器反馈调制电光调制器, 完成整个环路的反馈, 形成稳定振荡. 根据微波滤波器的带宽, 这里我们选择两段电缆的钻孔之间的等效延时  $\tau = 100$  ns. 根据前面的理论分析, 可以通过调节电缆的反射系数, 得到不同的频率响应, 从而选择最佳的起振条件.

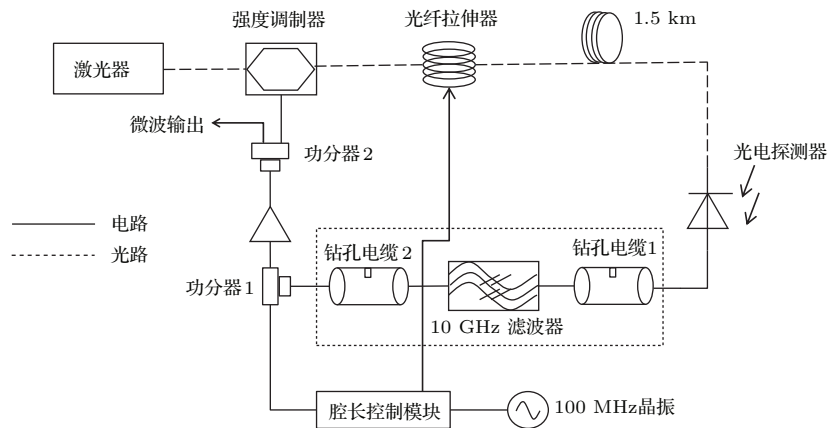


图5 基于微波谐振腔的OEO实验装置图  
Fig. 5. Experimental setup of OEO based on microwave resonant cavity.

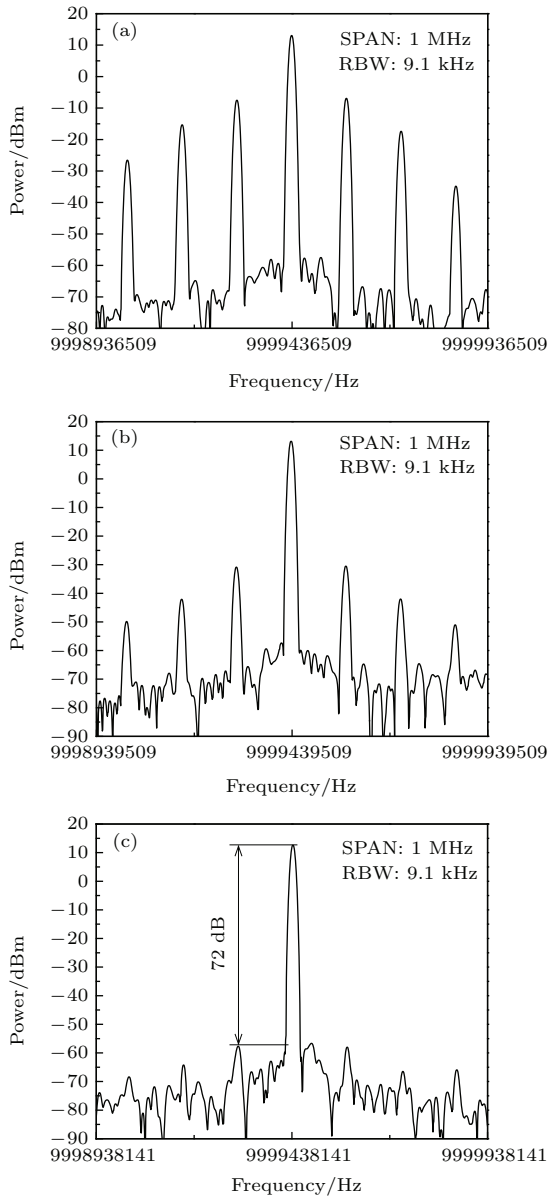


图6 电谱图 (a) 自由振荡; (b) 加入钻孔电缆, 反射系数为0.3; (c) 加入电栅, 反射系数为0.7  
 Fig. 6. Radio frequency spectrum: (a) Free run; (b) insert drilling cable,  $R = 0.3$ ; (c) insert drilling cable,  $R = 0.7$ .

为了检验方案的正确性, 对所提出的方案进行了实验验证, 并与传统的OEO进行了比较. 图6(a)是传统OEO所测得的电谱图(扫描带宽(SPAN)为1 MHz, 分辨率带宽(RBW)为9.1 kHz). 光纤长度为1.5 km, 其对应的模式间隔为135 kHz, 边模抑制比为23 dB. 显然, 传统OEO的输出信号具有很强的边模, 且模式间隔由环路长度决定. 采用相同的结构, 图6(b)是加入钻孔电缆后, 钻孔电缆的反射系数为0.3时测得的电谱图(SPAN为1 MHz, RBW为9.1 kHz). 可以看出其对应的模式间隔同样是135 kHz, 但边模抑制比为44 dB.

图6(c)是加入钻孔电缆后, 钻孔电缆的反射系数为0.7时测得的电谱图(SPAN为1 MHz, RBW为9.1 kHz). 此时OEO的边模抑制比达到了72 dB. 与传统OEO相比, 这种方法使边模得到了很好的抑制.

由于相位噪声低是OEO的主要特点, 也是微波信号的重要指标, 因此我们用N9030A信号分析仪对OEO输出信号进行测试. 图7为加入钻孔电缆前后, 在中心频率为10 GHz处的相位噪声的对比图. 通过对比可以看出, 加入钻孔电缆前测得的相位噪声为 $-124.59$  dBc/Hz@10 kHz, 而加入钻孔电缆后, 边模得到明显的抑制, 相位噪声为 $-122.61$  dBc/Hz@10 kHz. 因此OEO的相位噪声并没有明显的恶化, 验证了之前的设想.

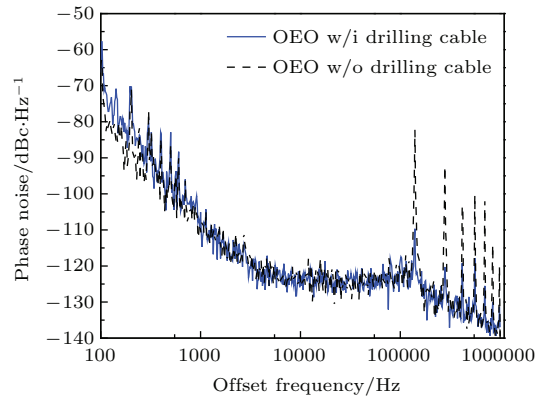


图7 相位噪声比较  
 Fig. 7. Comparison of phase noise.

另外, 由于环路主要由长光纤构成, 其腔长容易受到环境温度、应力等因素影响而发生变化, 造成起振基频的变化, 使输出频率发生漂移甚至跳频. 为了提高频率稳定度, 设计了腔长控制模块. 最后, 对系统进行了长时间的测试, 系统连续工作3 h, 用Agilent公司生产的8564EC频谱仪测量输出微波信号的频率, 每隔30 s记录一次, 处理所有频率值, 得到频率的漂移低于 $\pm 4$  Hz, 所以频率稳定度优于 $10^{-9}$ . 因此, 在保证高谱纯度、低相位噪声的情况下, 输出微波信号的频率稳定度得到了极大的改善.

## 4 结 论

本文提出了一种利用微波谐振腔来抑制边模的OEO结构, 并对系统进行了理论分析. 利用该结构, 系统产生了10 GHz的微波

信号, 边模抑制比为72 dB, 单边带相位噪声为 $-122.61$  dBc/Hz@10 kHz, 并加入腔长控制模块, 频率稳定度优于 $10^{-9}$ . 实验验证了理论分析的正确性和方案的可行性. 此方案的优势在于: 不需要增加有源器件, 具有结构简单、成本低的特点, 不仅实现了抑制边模的效果, 而且几乎不会引入新的噪声和增加系统的控制复杂度, 为OEO的边模抑制提供一种新的方法.

## 参考文献

- [1] Yuan H C, Gao Y Y 2009 *Semicond. Technol.* **34** 927 (in Chinese) [袁慧超, 高燕宇 2009 半导体技术 **34** 927]
- [2] Tsuchida H, Suzuki M 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 211
- [3] Fang L J, Liu Y, Ma J, Guo X F, Gui Y F, Wu P S 2015 *Radar Sci. Tech.* **13** 219 (in Chinese) [方立军, 柳勇, 马骏, 郭雪锋, 桂勇锋, 吴彭生 2015 雷达科学与技术 **13** 219]
- [4] Jung K, Shin J, Kim J 2013 *IEEE Photon. J.* **5** 5500906
- [5] Hou L, Han H N, Wang W, Zhang L, Pang L H, Li D H, Wei Z Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024213
- [6] Yang X F, Peng L, Tong Z R, Cao Y, Yang Y F 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0206004 (in Chinese) [杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘, 曹晔, 杨寅飞 2012 光学学报 **32** 0206004]
- [7] Wang T, Sang X Z, Yan B B, Ai Q, Li Y, Chen X, Zhang Y, Chen G X, Song F J, Zhang X, Wang K R, Yuan J H, Yu C X, Xiao F, Kamal A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064217
- [8] Yao X S, Maleki L 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1725
- [9] Yao X S, Maleki L 1996 *Opt. Lett.* **21** 483
- [10] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L 2008 *IEEE International Frequency Control Symposium* Honolulu, USA, May 19–21, 2008 p811
- [11] Yao X S, Maleki L 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 79
- [12] Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, Zhang L T, Yang E Z 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 807
- [13] Jia S, Yu J L, Wang J, Wang W R, Wu Q, Huang G B, Yang E Z 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 213
- [14] Wei T, Wu S P, Huang J, Xiao H, Fan J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 113517
- [15] Brian C 1991 *Transmission Line Design Handbook* (Norwood: Artech House Publishers) pp47–57
- [16] Ibrahim O, Dimitrios M, Nazanin H, Peter J D 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3100
- [17] Li H X, Jiang Y, Bai G F, Shan Y Y, Liang J H, Ma C, Jia Z R, Zi Y J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 044202 (in Chinese) [李红霞, 江阳, 白光富, 单媛媛, 梁建惠, 马闯, 贾振蓉, 瞿月姣 2015 物理学报 **64** 044202]

# An optoelectronic oscillator based on series resonance cavity\*

Huang Gang-Bin Wang Ju<sup>†</sup> Wang Wen-Rui Jia Shi Yu Jin-Long

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 25 August 2015; revised manuscript received 28 October 2015 )

## Abstract

Commercial and military applications of microwave and millimeter-wave sources in aerospace, radar, navigation, and communication system require high spectrum purity and low phase-noise oscillators. The optoelectronic oscillator (OEO) emerges as an excellent low noise source that has attracted great attention in recent years. In this paper, a novel technique is proposed for single-mode selection in an optoelectronic oscillator, which uses a microwave cavity as the mode selector. It consists of a pump laser and a feedback circuit including an intensity modulator, an optical fiber delay lines, a photodetector, an amplifier, a filter and two drilling cables. The drilling cable is fabricated by drilling open holes on a coaxial cable using a drilling machine. By changing the radius of the drilling holes, the designed reflection coefficient can be obtained. By simulation, the constructed microwave resonator that consists of a filter and two drilling cables has a higher  $Q$  value and only the modes that satisfy the oscillation conditions of the loop will be selected. The basic principle is analyzed theoretically and experimentally. By comparing with traditional structure of OEO, it is shown that the novel structure can effectively improve the side-mode suppression ratio. In addition, the stability of the oscillation frequency is easier to control than the parallel structure. In this experiment, the output of a 10 GHz single-mode signal with a side-mode suppression ratio of 72 dB and a phase noise of  $-122$  dBc/Hz@10 kHz from the carrier is obtained. Meanwhile, phase-lock techniques are used to compensate the drift of cavity length. Then the radio frequency (RF) stability of the oscillation frequency is measured using an RF spectrum analyzer, and the RF stability over 3 hours for the OEO is less than  $\pm 4$  Hz. This scheme has the advantages of traditional OEO with low noise since no extra active devices are needed, and it suppresses the side-mode noise also effectively. In addition, this system is promising for the development of compact, high frequency, low cost and low noise OEOs.

**Keywords:** optoelectronic oscillator, side-mode suppression, microwave resonant cavity, stability

**PACS:** 42.50.Md, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.65.044204

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61427817, 61405142) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120032130010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangju@tju.edu.cn