微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022010503

# 低相噪启钥式耦合微波光电振荡器研究

霍沙沙[1,2]，李晓琼[1,2]，刘安妮[1,2]，戴　键[1,2*]，徐　坤[1,2]

（北京邮电大学信息 1. 光子学与光通信国家重点实验室；2. 电子工程学院，北京 100876）

**摘　要：** 针对微波通信、雷达、电子战和导航等先进电子系统的应用发展需求，为了实现具有实用价值的极低相噪耦合微波光电振荡信号产生，提出了一种基于 Sigma 型光纤储能环腔架构的低相噪启钥式耦合微波光电振荡器。该方案通过 Sigma 型光纤储能技术消除了耦合微波光电振荡器中存在的偏振衰落问题，并且通过有源光纤环腔再生增益特性极大增强了振荡器品质因数，最终实现了 10 GHz 耦合微波光电振荡器的开机启钥稳定运行，起振信号在 10 kHz 频偏处的相位噪声达到－139.26 dBc/Hz。

**关键词：** 耦合微波光电振荡器；Sigma 腔；抗偏振衰落；品质因数；相位噪声

**中图分类号：** TN752　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0079－05

## Turnkey Coupled Optoelectronic Microwave Oscillator with Low Phase Noise

HUO Shasha[1,2], LI Xiaoqiong[1,2], LIU Anni[1,2], DAI Jian[1,2], XU Kun[1,2]

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications; 2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, CHN)

**Abstract:** In order to meet the requirements of advanced electronic systems such as microwave communication, radar, electronic warfare and navigation, a turnkey coupled optoelectronic microwave oscillator with low phase noise based on Sigma-shaped fiber ring structure is proposed. In this scheme, the Sigma-shaped fiber ring structure is used to eliminate the harmful influence of the polarization-induced fading, and the quality factor of the oscillator is greatly enhanced by the regenerative gain characteristic of the active cavity. As a result, a stable 10 GHz signal with low phase noise is generated as soon as the oscillator is powered on. The phase noise at 10 kHz offset frequency is about －139.26 dBc/Hz.

**Key words:** coupled optoelectronic microwave oscillator; Sigma cavity; anti-polarization fading; quality factor; phase noise

## 0　引言

高质量微波振荡器是现代电子信息系统的关键组成部分，在通信、雷达、电子战、导航、测控和天文等领域有着广泛应用。随着现代无线电技术的快速发展，电子信息系统对微波振荡器输出信号的频率范围和相位噪声要求越来越高[1]。

传统振荡器主要包括石英晶体振荡器和介质振荡器两种类型。石英晶体振荡器输出频率仅为百兆赫兹量级，需要通过倍频方式得到高频输出信号，相位噪声也将随之严重恶化[2]。此外，介质谐振器的品质因子会随着工作频率升高而下降，目前 X 波段商用介质振荡器产品在 10 kHz 频偏处的最佳相位噪声可以达到－120 dBc/Hz[3]。为了克服传统高频微波振荡器的相位噪声性能瓶颈，基于长距离光纤储能链路的微波光电振荡器应运而生，能够直接产生 10 GHz 超低相噪微波信号(－163 dBc/Hz@10 kHz)[4-5]。

传统微波光电振荡器由于使用长距离光纤链路作为储能介质，相位噪声性能突出，但是体积重量也

收稿日期：2022－01－05.

基金项目：国家自然科学基金面上项目(61971065).

* 通信作者：戴　键　E-mail：daijian@bupt.edu.cn

较大，并且腔长容易受到环境影响而引起频率漂移或跳模[6-7]。耦合微波光电振荡器通过有源光纤环形腔再生增益特性来实现光纤谐振腔品质因子增强，仅用百米储能光纤就能够产生高频低相噪微波信号[8-15]，然而，通常耦合微波光电振荡器中的光纤环腔偏振状态随机变化，造成腔内增益随之剧烈波动，严重影响了耦合微波光电振荡器开机启钥运行[16-17]。

本文提出了一种基于 Sigma 型光纤储能环腔架构的低相噪启钥式耦合微波光电振荡器，有效消除了环腔偏振衰落影响，同时极大改善了环腔品质因数，最终实现了 10 GHz 低相噪耦合微波光电振荡器的开机启钥式运行，起振微波信号在 10 kHz 频偏处相位噪声达到−139.26 dBc/Hz。

## 1 系统工作原理

本论文提出的基于 Sigma 型光纤环腔架构的启钥式耦合微波光电振荡器结构如图 1 所示，系统主要包括主动锁模光纤环路和射频反馈环路。主动锁模光纤环路由保偏环形振荡腔和不保偏线性储能支路构成，其中掺铒光纤放大器为 Sigma 型光纤环腔提供光学增益，光带通滤波器限制光纤环形腔工作带宽，光学隔离器保证腔内信号单向传输，电光调制器为光纤环腔锁模器件。此外，Sigma 型支路是主动锁模光纤环路的储能功能模块，保偏环腔内慢轴线偏光信号旋转 π/2 后注入偏振分束器端口 1，经过端口 3 馈入单模线性储能光纤中，输出光信号偏振态经过末端法拉第旋转镜旋转 π/2 后反射回线性储能光纤，最终反射线偏光馈入偏振分束器端口

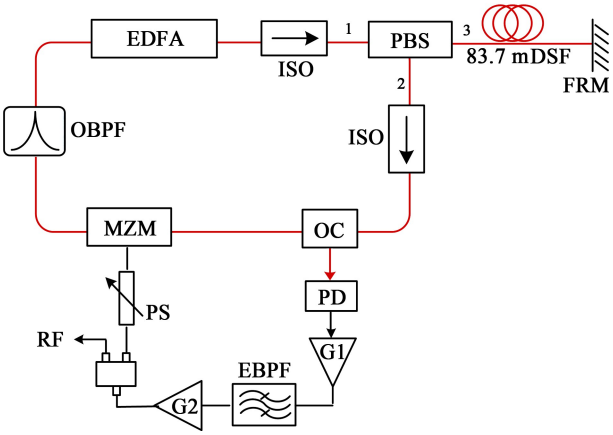



图 1 低相噪启钥式耦合微波光电振荡器结构框图

OC：光耦合器；PD：光电探测器；G1/G2：微波放大器；EBPF：带通滤波器；PS：移相器

3，并经过端口 2 输出再次进入保偏光纤环形腔，此时输出光保持与电光调制器主轴一致的慢轴线偏振状态[18-19]。

在射频反馈回路中，部分光脉冲信号经过光电探测后转换为微波信号，并且经过增益放大、滤波选模和移相匹配后馈入电光调制器中。光纤环形腔中光脉冲重频变化将导致射频反馈回路中拍频信号发生频移，实现了光纤环路模式间隔与射频环路驱动信号频率自动匹配锁模，最终两支环路相互锁定后能够直接生成低相噪微波信号。

低相噪启钥式耦合微波光电振荡器的核心模块是 Sigma 型主动锁模光纤储能环路，环路中 Sigma 型线性储能支路可以有效消除光纤环形谐振腔中的偏振扰动影响，实现振荡器开机启钥运行。Sigma 型储能支路中的偏振态变化可以利用琼斯矩阵模型进行分析。首先，光纤中双折射引起的偏振态变化通过传输矩阵表示为[20-21]

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{D}(\varphi)\boldsymbol{R}(\theta)=\begin{bmatrix}\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{i}\varphi}{2}} & 0\\ 0 & \mathrm{e}^{\frac{\mathrm{i}\varphi}{2}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{D}(\varphi)$ 和 $\varphi$ 分别为相位延迟矩阵和相位延迟量，$\boldsymbol{R}(\theta)$ 和 $\theta$ 分别为偏振旋转矩阵和偏振旋转角度。其次，偏振分束器和法拉第旋转镜的传输矩阵可以分别表示为

$$\boldsymbol{P}_x(\Gamma)=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \Gamma\end{bmatrix},\boldsymbol{P}_y(\Gamma)=\begin{bmatrix}\Gamma & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{P}_x(\Gamma)$ 和 $\boldsymbol{P}_y(\Gamma)$ 分别为偏振分束器的水平和垂直偏振矩阵，$\Gamma$ 为偏振抑制比。因此，Sigma 型光纤储能支路的传输矩阵表示为

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{total}}=\boldsymbol{P}_y(\Gamma)\boldsymbol{R}\left(\frac{\pi}{2}\right)\boldsymbol{P}_x(\Gamma)\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}\boldsymbol{T} \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}$ 为光纤储能支路传输矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的转置矩阵，$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{R}(\pi/4)\boldsymbol{R}(\pi/4)$ 为法拉第旋转镜的传输矩阵，上式经计算简化后得到：

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{total}}=\begin{bmatrix}-\Gamma^2 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix} \tag{4}$$

上式表明 Sigma 型光纤储能支路能够始终保持稳定偏振态，不随相位延迟和偏振旋转角度的变化而改变，因此，基于 Sigma 型主动锁模光纤储能环路的耦合微波光电振荡器可以实现启钥式稳定振荡运行。

相位噪声是衡量耦合微波光电振荡器输出信号

频谱质量的关键指标，通常微波信号相位噪声由光电振荡器中光纤储能腔的品质因数 $Q$ 值决定，$Q$ 值越高，振荡信号的相位噪声越低。传统微波光电振荡器的品质因数满足 $Q=\omega\tau_c$，其中 $\omega$ 为微波振荡信号频率，$\tau_c$ 为光纤环路传输往返时间（由光纤链路长度决定，通常 10 GHz 处 3 km 光纤链路储能时间对应 $Q$ 值约为 $10^6$）。在耦合微波光电振荡器中，有源光纤环形腔的再生增益有效提高了光纤环路品质因数，可以通过 $Q$ 值增强因子定义为[22-23]

$$Q_e=\frac{\Omega_f^2\tau^2}{1+q^2} \tag{5}$$

其中，$\Omega_f$ 为有源光纤环腔的有效增益带宽，主要由放大器增益和光域滤波带宽决定；$\tau$ 和 $q$ 分别为光脉冲时域宽度和啁啾系数，由光纤环路色散和非线性共同决定。最终耦合微波光电振荡器的品质因数可以表示为

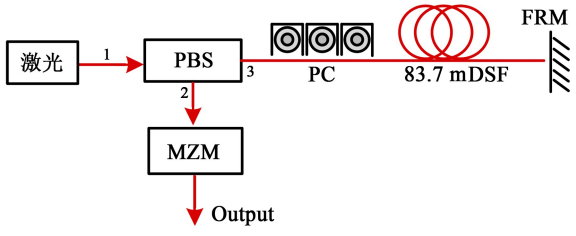
$$Q=\omega\tau_c Q_e=\omega\tau_c\frac{\Omega_f^2\tau^2}{1+q^2} \tag{6}$$

由于有源光纤环路的再生增益特性，耦合微波光电振荡器的品质因数得到极大增强，采用百米级光纤储能环腔就能够实现极高品质因子，可与数千米光纤链路的储能性能相媲美[24]。

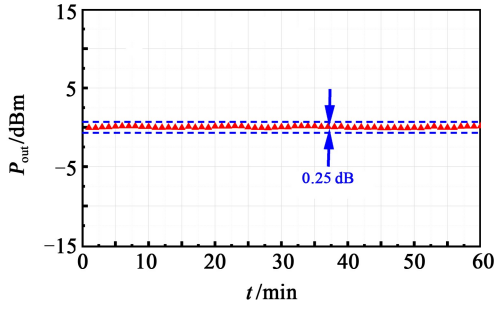
## 2　系统实验结果与分析

本文根据图 1 所示方案对基于 Sigma 型光纤环形腔架构的启钥式耦合微波光电振荡器开展实验验证。在 Sigma 型光纤环形腔中，锁模元件采用半波电压和插入损耗分别为 6.5 V 和 5 dB 的电光强度调制器（iXblue，MXAN-LN-20），掺铒光纤放大器（小信号增益为 25 dB）由 980 nm 泵浦激光器、波分复用器和 1.5 m 掺铒光纤构成，光带通滤波器的 0.5 dB 工作带宽和插入损耗分别为 3 nm 和 1 dB，环路等效腔长和色散水平约为 200 m 和 4 ps·nm$^{-1}$·km$^{-1}$。在射频反馈回路中，10%腔内光功率经过光电探测器转换为微波信号，光电探测器（Discovery，DSC40S）的工作带宽和响应度分别为 14 GHz 和 0.8 A/W，微波信号通过 23 dB 和 11 dB 两级低噪声放大器为环路提供振荡增益，6 MHz 通带带宽的 10 GHz 射频带通滤波器（K&L）提取出振荡环路所需频率分量，最终射频信号经过相位精确调节馈入电光调制器，实现耦合微波光电振荡器环路匹配锁模和闭环振荡。

Sigma 型光纤储能环形腔是耦合微波光电振荡器系统启钥式运行的关键功能模块。为了验证启钥式耦合微波光电振荡器中光纤振荡环腔的抗偏振衰落性能，本文首先对光纤储能环腔中 Sigma 型开环支路的偏振相关光功率抖动特性进行测量，如图 2（a）所示。该测量装置利用分布反馈单频连续激光器输出慢轴线偏振光注入偏振分束器端口 1，为了验证 Sigma 型光纤储能支路的抗偏振衰落性能，在偏振分束器端口 3 与单模储能光纤之间插入偏振控制器，通过不断拨动偏振控制器来模拟单模储能光纤中的偏振态变化，最后通过光功率计来测量偏振分束器端口 2 处电光调制器的输出光功率抖动情况。测量结果如图 2（b）所示，Sigma 型开环支路输出光功率在改变光纤储能链路（等效长度约 200 m）偏振状态的情况下几乎保持不变，功率波动范围小于 0.25 dB。此外，Sigma 型光纤储能支路输出光的线偏振态可以始终与电光调制器主轴保持一致，从而有效抑制了光纤储能链路中光传输过程的偏振状态衰落现象。




（a）　测量装置




（b）　测量结果

图 2　Sigma 型支路偏振相关光功率抖动测量结果

为了进一步验证启钥式耦合微波光电振荡器的抗偏振性能，本文还构建了基于 Sigma 型储能支路的主动锁模光纤环腔，并且通过矢量网络分析仪（安捷伦 N5244A）测量闭环光纤环腔的传输频率响应。矢量网络分析仪的输出和输入端口分别与 Sigma 型光纤环腔中电光调制器和光电探测器连接，测量结果如图 3 所示，Sigma 型光纤环腔的自由频谱范围约为 1 MHz，幅频响应呈明显周期稳定运行特性，测量过程无需调节腔内偏振状态，因此 Sigma

型主动锁模光纤环腔可以实现启钥式运行。

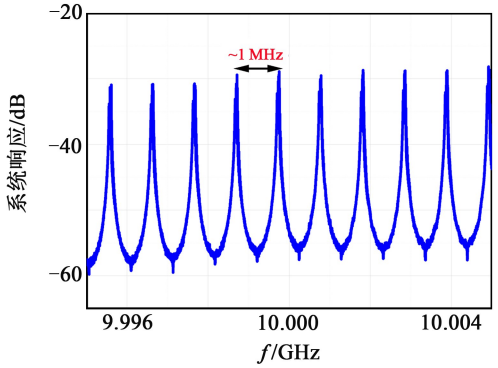



图 3 Sigma 型光纤储能环形腔传输响应测量结果

在上述 Sigma 型光纤储能环形腔架构的基础上构建耦合微波光电振荡器系统，根据 Sigma 型光纤环腔环路插损合理设计射频反馈环路功率增益，同时调节射频移相器，以确保 Sigma 型光纤环路与射频反馈回路之间的相位匹配，最终实现了启钥式耦合微波光电振荡器的开机自动起振功能。最后，本论文通过光谱分析仪(Yokogawa AQ6370D)和相位噪声分析仪(Rohde & Schwarz FSWP50)对耦合微波光电振荡器输出信号的光谱和射频特性进行测量分析，测量结果分别如图 4 和图 5 所示。如图 4 所示，耦合微波光电振荡器输出光信号表现为相干光学频率梳特征，频梳间隔约为 10 GHz。此外，如

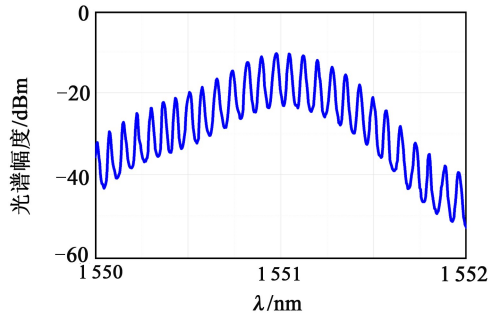



图 4 输出光信号光谱测量结果

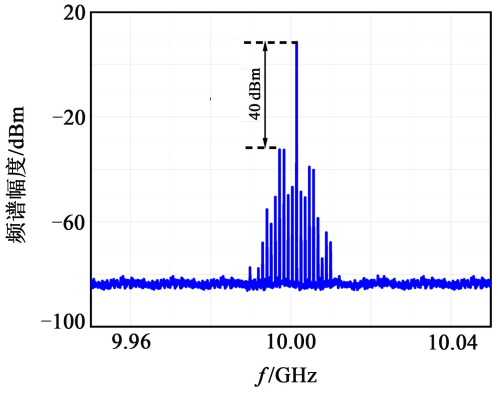



图 5 输出信号射频频谱与超模噪声测量结果

图 5 所示，耦合微波光电振荡器可以稳定产生 10 GHz 的微波信号，起振信号频率与光谱频梳间隔一致，并且射频信号超模噪声抑制比约为 40 dB，超模噪声间隔为 1MHz，与 Sigma 型光纤储能环形腔 200 m 等效腔长对应。

本文还测量了该启钥式耦合微波光电振荡器输出信号最重要的相位噪声指标，测量结果如图 6 所示。由于消除了光学储能环腔偏振衰落问题对耦合微波光电振荡器相位噪声的影响，振荡信号在 10 kHz 频偏处的最佳相位噪声为 −139.26 dBc/Hz，同时远端相位噪声优于 −162 dBc/Hz。因此，本文提出的基于 Sigma 型光纤环腔的启钥式耦合微波光电振荡器不仅克服了偏振衰落扰动问题，而且保证了极低的相位噪声性能，在进一步采用抑制超模噪声技术的基础上(包括超窄射频滤波和复合光学环腔等)，启钥式耦合微波光电振荡器在未来雷达、通信和电子战等先进电子信息系统中具有重要实用价值和广泛应用前景。

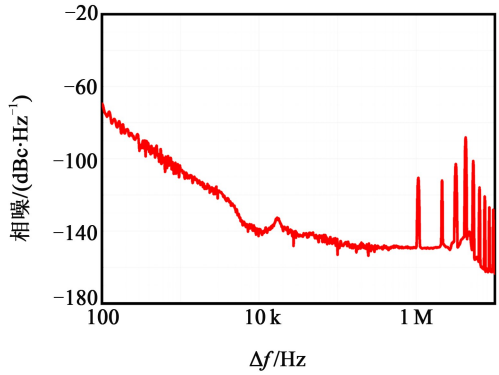



图 6 输出信号相位噪声测量结果

## 3 结论

本文提出的基于 Sigma 型光纤储能环腔架构的低相噪启钥式耦合微波光电振荡器，不仅有效抑制了光纤储能环路的偏振衰落问题，而且通过有源光纤环腔再生增益特性极大增强了光纤储能环路的品质因数，最终实现了低相噪耦合微波光电振荡器的开机启钥式运行。基于 200 m 光纤储能环腔启钥式产生了极低相噪 10 GHz 微波信号，并且在 10 kHz 频偏处的起振信号相位噪声达到 −139.26 dBc/Hz，为实用型耦合微波光电振荡器的发展提供了重要技术支撑。

**参考文献：**

[1] Choe J Y. Defense RF systems: Future needs, requirements, and opportunities for photonics[C]// Inter. Topical Meeting

on Microwave Photonics，2005.

[2] Mcclelland T，Stone C，Bloch M. 100 MHz crystal oscillator with extremely low phase noise[C]// Proc. of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE Inter. Frequency Control Symposium，1999：Cat. No. 99CH36313.

[3] Regis M，Llopis O，Haaren B V，et al. Ultra low phase noise C and X band bipolar transistors dielectric resonator oscillators [C]// IEEE Inter. Frequency Control Symp.，1998：507-511.

[4] Maleki L. Sources：The optoelectronic oscillator[J]. Nature Photonics，2011，5(12)：728-730.

[5] Eliyahu D，Seidel D，Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques，2008，56(2)：449-456.

[6] 郭姣姣. 光电振荡器的相位噪声模型研究及应用[D]. 杭州：浙江大学，2019.

Guo J J. Research and application of phase noise model of optoelectronic oscillators[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2019.

[7] 滕义超，张宝富，李得龙，等. 降低光电振荡器相位噪声的方法研究[J]. 半导体光电，2014，35(2)：171-175，189.

Teng Y C，Zhang B F，Li D L，et al. Research on phase noise reduction of optoelectronic oscillators [J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，35(2)：171-175，189.

[8] Du T H，Zhu D，Pan S L. Polarization-maintained coupled optoelectronic oscillator incorporating an unpumped erbium-doped fiber[J]. Chinese Optics Lett.，2017，16(1)：21-24.

[9] 徐　伟. 新型光电振荡器研究[D]. 杭州：浙江大学，2014.

Xu W. Research on new optoelectronic oscillator [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2014.

[10] 徐　伟，金　韬，池　灏. 耦合式光电振荡器的理论与实验研究[J]. 激光技术，2014，38(5)：579-585.

Xu W，Jin T，Chi H. Theoretical and experimental research of coupled optoelectronic oscillators[J]. Laser Technology，2014，38(5)：579-585.

[11] Oriane L，Vincent C，Ghaya B，et al. Experimental investigations for designing low phase noise 10 GHz coupled optoelectronic oscillator [C]// Conf. on Terahertz，RF，Millimeter，and Submillimeter-Wave Technology and Applications，2018.

[12] Salik E，Yu N，Maleki L. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2007，19(6)：444-446.

[13] Yu N，Salik E，Maleki L. Ultralow-noise mode-locked laser with coupled optoelectronic oscillator configuration[J]. Opt. Lett.，2005，30(10)：1231-1233.

[14] Yu N，Salik E，Tu M，et al. Frequency stabilization of the coupled opto-electronic oscillator[C]// Proc. of the 2005 IEEE Frequency Control Symposium and Exposition，2005.

[15] Zhang J，Yao M，Yan M，et al. 10 GHz non-PM based ultra stable picosecond pulsed fiber laser[J]. Proc. SPIE，2006，6351：635127.

[16] 魏正武. 基于自再生锁模光纤激光器的光脉冲信号产生研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2016.

Wei Z W. Research for generating optical pulse based on regeneratively mode-locked fiber laser[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2016.

[17] 苗　旺，于晋龙，王　菊，等. 基于再生锁模系统的低相噪微波源[J]. 光电子·激光，2012，23(9)：1702-1707.

Miao W，Yu J L，Wang J，et al. Low phase noise microwave source based on regeneratively mode-locked system[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2012，23(9)：1702-1707.

[18] Carruthers T F，Iii I N D. 10 GHz，1.3 ps erbium fiber laser employing soliton pulse shortening[J]. Opt. Lett.，1996，21(23)：1927-1929.

[19] Carruthers T F，Iii I N D，Horowitz M，et al. Dispersion management in a harmonically mode-locked fiber soliton laser [J]. Opt. Lett.，2000，25(3)：153-155.

[20] 王镜清，张竞辉，张云翠，等. 偏振态稳定型掺铒光纤激光器[J]. 大连工业大学学报，2009，28(4)：292-296.

Wang J Q，Zhang J H，Zhang Y C，et al. Erbium-doped fiber laser with stable polarization state[J]. J. of Dalian Polytechnic University，2009，28(4)：292-296.

[21] 齐龙舟，肖　浩，李　芳，等. 光纤激光水听器消偏振衰落技术研究[J]. 传感器与微系统，2008，27(7)：21-23.

Qi L Z，Xiao H，Li F，et al. Study on polarization-induced fading elimination method of fiber laser hydrophone [J]. Transducer and Microsystem Technologies，2008，27(7)：21-23.

[22] Matsko A B，Eliyahu D，Koonath P，et al. Theory of coupled optoelectronic microwave oscillator Ⅰ：expectation values[J]. J. of the Optical Society of America B，2009，26(5)：1023-1031.

[23] Matsko A B，Eliyahu D，Maleki L. Theory of coupled optoelectronic microwave oscillator Ⅱ：phase noise[J]. J. of the Optical Society of America B：Optical Phys.，2013，30(12)：3316-3323.

[24] Eliyahu D，Maleki L. Modulation response (S21) of the coupled opto-electronic oscillator [C]// IEEE Inter. Frequency Control Symposium & Exposition，2005.

## 作者简介：

**霍沙沙**(1997—)，女，河北省石家庄市人，硕士研究生，主要研究方向为耦合光电振荡器；

**戴　键**(1987—)，男，博士，副教授，硕士/博士生导师，主要研究方向为微波光子学和集成光子学。