基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器

朱　丹[1],杜天华[1],胡晓朋[1],陆满君[2],潘时龙[1]
(1.南京航空航天大学 电子信息工程学院 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室,江苏 南京 211106;
2.上海无线电设备研究所,上海 201109)

摘　要: 针对微波光子射频系统对高质量的高重频光脉冲的迫切需求,提出和研究基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器,利用饱和吸收效应有效抑制超模噪声,有效改善耦合光电振荡器中超模噪声带来的光脉冲抖动问题。对半导体可饱和吸收镜抑制噪声的机理进行理论分析,并搭建实验系统,实现重频为 10.6 GHz 的光脉冲产生,超模抑制比达到 55.3 dB,相应射频信号的边模抑制比为 79.7 dB,相位噪声为 −108 dBc/Hz@10 kHz。该方案创新性地将半导体可饱和吸收镜引入耦合光电振荡器中,实现对超模噪声的抑制,并为系统的小型化和集成化提供了关键技术支撑。

关键词: 耦合光电振荡器; 半导体可饱和吸收镜; 光脉冲; 超模噪声; 相位噪声
中图分类号: TN 752　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.009

Coupled Optoelectronic Oscillator Based on Semiconductor Saturable Absorber Mirror

ZHU Dan[1], DU Tianhua[1], HU Xiaopeng[1], LU manjun[2], PAN Shilong[1]
(1.Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;
2.Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the urgent requirement of the microwave photonic radio frequency (RF) systems for the high-repetition frequency optical pulses with high quality, a coupled optoelectronic oscillator (COEO) based on the semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is proposed. The saturable absorption effect is used to effectively suppress the supermode noise and improve the optical pulse jitter caused by the supermode noise in the coupled optoelectronic oscillator. The mechanism of suppressing the supermode noise based on the SESAM is theoretically analyzed. An experiment system is built up to generate a stable optical pulse with a repetition frequency of 10.6 GHz. The supermode suppression ratio is up to 55.3 dB. The sidemode suppresses ratio of the corresponding RF signal is 79.7 dB and the phase noise is -108 dBc/Hz @ 10 kHz. It is innovative to introduces the SESAM into the coupled optoelectronic oscillator in the proposed scheme, which can suppress the supermode noise and also provide key technical supports for the system miniaturization and integration.

Key words: coupled optoelectronic oscillator; semiconductor saturable absorber mirror; optical pulse; super mode noise; phase noise

0　引言

超短光脉冲是由时域上极短的光学脉冲序列组成,脉冲序列具有极低的时间抖动[1]。而在频域上,超短光脉冲的输出光谱是由一系列等间隔的谱

收稿日期:2019-09-24; **修回日期:**2019-11-18
基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2016064);国家自然科学基金(61971222);江苏省自然科学基金(BK20160082);江苏省六大人才高峰项目(DZXX-030);江苏省 333 项目(BRA2018042);中央高校基本科研业务费项目(NE2017002,NC2018005)
作者简介:朱　丹(1983—),女,博士,副教授,主要研究方向为微波光子信号处理及系统应用。
通信作者:潘时龙(1982—),男,博士,教授,主要研究方向为基于微波光子技术的新体制雷达、无线通信、测量系统和集成微波光子学。

线组成的宽谱光信号,谱线间隔一般在微波频段。这一特性使得超短光脉冲在光子模数转换器、光子任意波形产生、光子辅助信道化接收、光子傅里叶变换等微波光子射频系统及其关键技术领域中具有重要的应用前景和价值。因而,高质量光脉冲的产生成为研究的热点。光脉冲的产生方法有多种[2],其中锁模光纤激光器因结构简单、性能稳定,且产生的光脉冲重复频率高、时间抖动小而掀起研究热潮。锁模光纤激光器按照锁模机理的不同,分为被动和主动锁模激光器两种。1964年,HARGROVE等[3]提出了主动锁模激光器的概念。主动锁模激光器通过在激光腔内引入主动锁模器件(如电光调制器),选出特定频率间隔的纵模,具有可实现超高重复频率和易调谐等优势,但用于选定锁模频率的外注入射频信号相位噪声将直接影响所产生的光脉冲的时间抖动等特性。

针对这一挑战,耦合式光电振荡器成为可能的解决方案。耦合式光电振荡器(COEO)由 YAO等[4-5]于1997年首次提出,由共享同一个调制器的锁模激光器环路和光电振荡环路耦合构成,具备同时产生高质量光脉冲信号和微波本振信号的功能。耦合光电振荡器的光电振荡环路与光纤锁模激光器环路之间的正反馈,保证了所产生光脉冲和射频信号的高质量[6]。耦合式光电振荡器既继承了光电振荡器产生高质量微波信号的优势,又同时具备了产生低抖动、高重频光脉冲的功能,因此,成为研究热点,在光子雷达、微波光子卫星载荷等系统中存在着广泛需求。很多应用需要高重频的光脉冲或者高频率的低相噪射频信号,这就要求光纤锁模激光器环在腔模的高次模式下锁模。而光纤激光器环支持多个以腔基模为间隔的模式振荡,这些模式之间的跳动是所产生光脉冲的主要噪声来源。因此,对于基于耦合光电振荡器的光脉冲产生,超模抑制比是关键性能指标之一。国内外学者对如何改善耦合式光电振荡器中的噪声开展了大量研究。SALIK等[7]在环路中采用全保偏结构的光纤,结合色散位移光纤抑制偏振噪声并对色散进行管理,使得系统的相噪性能得到改善。北京邮电大学研究人员在光电反馈环中引入光脉冲能量前馈机制抑制超模噪声[8]。浙江大学研究人员引入保偏机制来抑制耦合光电振荡器的噪声[9]。南京航空航天大学在这方面也开展了研究,包括在光电反馈环中采用偏振双环结构[10],以及利用非泵浦掺铒光纤中由周期性空间烧孔引入的饱和吸收效应来抑制超模噪声[11-13]。但无论是光脉冲前馈结构、双环结构还是加入掺铒光纤,都会在一定程度上提高系统的复杂度,降低了整个系统的稳定性,且不利于系统的小型化和集成化。

针对上述问题,本文提出并研究了一种基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的耦合光电振荡器。半导体可饱和吸收体通常用于重复频率为MHz级别的被动锁模激光器中,本项工作则将半导体可饱和吸收镜创新性地引入到重频高达10.6 GHz的主动锁模机理的耦合光电振荡器中。通过半导体可饱和吸收镜引入饱和吸收效应,有效提高所产生的光脉冲的超模抑制比,以及耦合光电振荡器的系统性能。该结构只需引入一个半导体可饱和吸收镜,结构简单,且由于所引入的为半导体器件,易于整个系统的小型化和集成化。开展了验证实验,构建了基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器,产生了重频10.6 GHz的光脉冲,超模抑制比为55.3 dB,光电振荡环中所对应产生的10.6 GHz射频信号的边模抑制比达79.7 dB,相位噪声为－108 dBc/Hz @ 10 kHz。

1　基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器结构和原理

本文所提出的基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器的原理结构图如图1所示。将偏置于正交传输点的马赫-曾德尔调制器连接到光分束器上,光分束器的两路输出分别连接到共享同一个电光调制器的光电振荡回路和光纤锁模激光器环路中。对于光纤锁模激光器环路,光分束器的输出口1依次连接可调光延时线、掺铒光纤放大器和一个连接了半导体可饱和吸收镜的光环形器,光环形的3口通过一个偏振控制器连接回马赫-曾德尔调制器的光输入口。偏振控制器用来调节优化光纤锁模激光器环路的偏振态,光纤锁模激光器环路的腔长通过可调光延时线来调节,环路增益通过掺铒光纤放大器进行控制。对于光电振荡环路,光分束器的输出口2依次连接用于实现光电转换的光电探测器,用于选择振荡频率的电带通滤波器,以及一个用于提供光电振荡环路增益的电放大器,并最终连接到马赫-曾德尔调制器的射频端口,构建光电振荡环路。

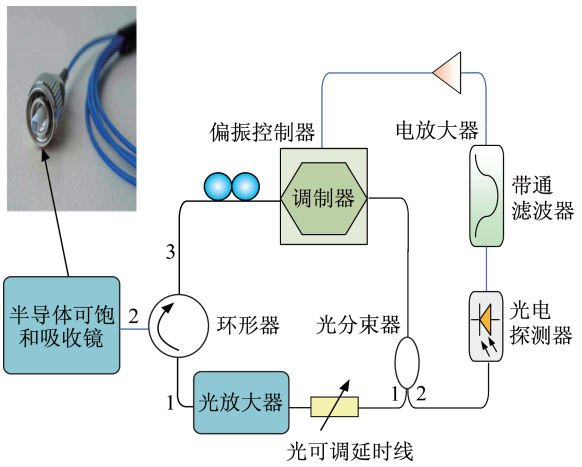

图 1 基于半导体可饱和吸收体的耦合式光电振荡器原理图

Fig.1 Schematic diagram of the proposed coupled opto-electronic oscillator (COEO) based on a semiconductor saturable absorber

半导体可饱和吸收镜是半导体可饱和吸收体和反射镜的结合,其关键参数包括吸收率η、调制深度ΔR、弛豫时间τ和饱和通量F_{sat}。对于高斯型脉冲,半导体可饱和吸收镜的吸收率η表示为

$$\eta=\frac{1}{2\pi r_0^2}\int_0^{\infty}\frac{F(r)}{F_0}\frac{\eta_0}{1+F(r)/F_{sat}}2\pi r\mathrm{d}r=\eta_0\frac{F_{sat}}{F}\ln\left(1+\frac{F}{F_{sat}}\right) \tag{1}$$

式中:η_0为小信号饱和吸收率;F_0为脉冲能量平均值;$F(r)=F_0\exp(r^2/2-r_0^2)$为高斯型脉冲径向相关的辐射通量,其中,$r_0$、$r$分别为高斯光束半径和光斑半径。

反射率R是半导体可饱和吸收镜另一个关键参数,定义如下:

$$R=1-\Delta R\frac{F_{sat}}{F}\ln\left(1+\frac{F}{F_{sat}}\right)-\eta_{ns}-\frac{\gamma F d}{\tau_p} \tag{2}$$

式中:η_{ns}为非饱和损耗;$\Delta R=\eta_0-\eta_{ns}$为调制深度;$\gamma$为双光子吸收率;$d$为吸收层厚度;$\tau_p$为脉冲宽度。

可以看出,半导体可饱和吸收镜的反射率随着脉冲能量的变大而变大。通过半导体可饱和吸收镜引入饱和吸收效应,使得对所需要的高功率模式吸收较弱,环路增益较大。而其余不需要的竞争模式则由于被吸收,从而环路增益较小,经过多次环路循环后将被有效抑制。和已有耦合光电振荡器结构相比,该耦合光电振荡器的结构简单,且无需引入额外的双环、反馈等结构,有效提高了所构建的耦合光电振荡器的结构简单性和稳定性。

2 实验结果与分析

如图 1 所示的结构搭建了实验系统,对基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器进行了实验验证,实验装置图如图 2 所示。所使用的主要器件和仪器参数如下:马赫-曾德尔强度调制器(Fujitsu, FTM7938EZ-A)的 3 dB 工作带宽为 40 GHz;光电探测器(KG-PT-10G)的响应度为 0.88 A/W,3 dB 工作带宽为 10 GHz;低噪声电放大器的增益为 40 dB,工作频率范围为 8~18 GHz;所使用电带通滤波器中心频率位于 10.664 GHz,3 dB 带宽为 11.8 MHz;半导体可饱和吸收镜(FC-SANOS-15XX-TEC, BATOP)的工作中心波长位于 1 550 nm,最大平均输入功率为 0.5 W,强、弱信号的通过率分别为 45% 和 3%,饱和通量 F 为 100 μJ/cm^2,弛豫时间为 5 ps。实验中采用光谱分析仪(Yokogawa AQ6 370C)测量光谱,采用采样示波器(Agilent 86 100C,光电接口模块为 86 116C)对光脉冲的波形进行测量,采用相位噪声分析仪(R&S FSWP26,工作频率范围 1 MHz~26.5 GHz)对微波信号的频谱和相位噪声进行测试分析。

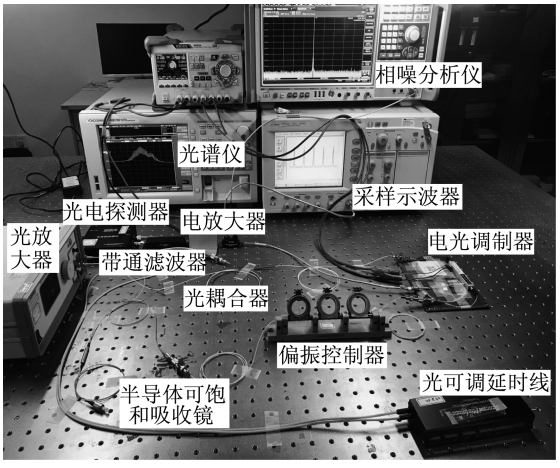

图 2 基于半导体可饱和吸收镜的耦合式光电振荡器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of the proposed SESAM-based COEO

基于图 2 的实验装置图构建了耦合光电振荡器,实现了重频为 10.6 GHz 的稳定光脉冲序列和频率为 10.6 GHz 的高质量微波信号的产生。当耦合式光电振荡器达到稳定状态后,所产生光脉冲的时域波形眼图如图 3(a)所示,对应的光谱如图 3(b)所示。光脉冲的光谱中心波长由半导体可饱和吸收

镜的工作波长以及所使用的掺铒光纤放大器的增益谱共同决定，约为 1 561.1 nm。为了得到产生光脉冲的超模噪声特性，将所产生的光脉冲注入到一个光电探测器中，得到的电信号频谱如图 3(c)所示。可以看出，超模噪声抑制比为 55.3 dB，因此，通过引入半导体可饱和吸收镜可有效地抑制超模噪声。

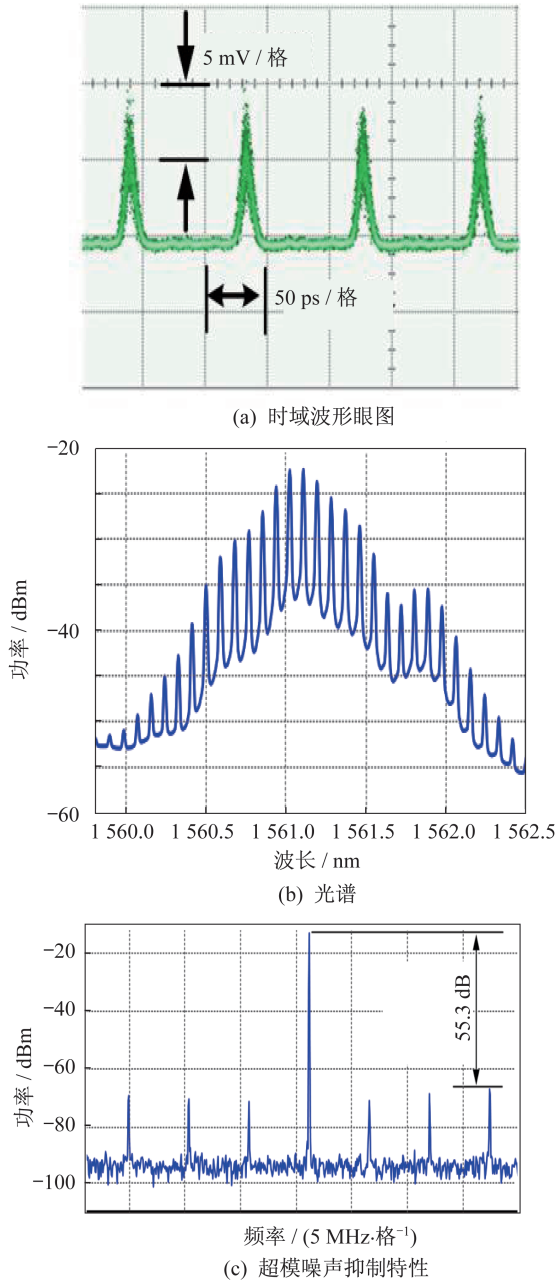

图 3　基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器产生的光脉冲

Fig.3　The optical pulses generated from the proposed SESAM-based COEO

此时，对应光电振荡环中产生频率为 10.6 GHz 的单频微波信号，其频谱和相位噪声谱分别如图 4(a)和图 4(b)所示。由图可见，光电振荡环中产生微波信号的边模抑制比达到 79.7 dB，边模得到了有效抑制。所产生的 10.6 GHz 微波信号的相位噪声，在光电振荡环中无需额外引入长光纤的情况下，可低至 −108 dBc/Hz@10 kHz。可以看出，通过引入半导体可饱和吸收镜来抑制高频工作的耦合光电振荡器中的超模噪声，可以使得耦合光电振荡器的整体综合性能均得以提升，所产生微波信号的边模抑制比和相位噪声均得到了有效改善。

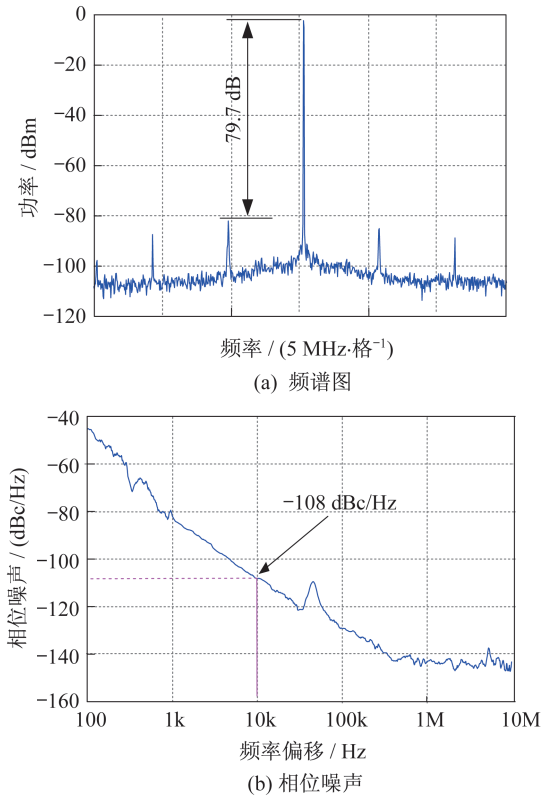

图 4　基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器产生的微波信号

Fig.4　The RF signal generated from the proposed SESAM-based COEO

3　结束语

本文提出并研究了基于半导体可饱和吸收镜的耦合式光电振荡器，介绍了工作原理，理论分析了半导体可饱和吸收镜在耦合式光电振荡器中抑制超模噪声的过程。搭建了耦合光电振荡器的实验验证系统，实现了重频为 10.6 GHz 的高质量光脉冲和频率为 10.6 GHz 的高质量射频信号产生，超模

抑制比为55.3 dB,射频信号的边模抑制比为79.7 dB,相位噪声为－108 dBc/Hz@10 kHz。通过进一步优化所使用饱和吸收体的吸收系数等参数,以及对整体结构引入保偏和封装措施,耦合光电振荡器的性能可以进一步提升。本文理论分析和实验验证了基于半导体可饱和吸收镜的耦合光电振荡器的可行性,将半导体可饱和吸收镜应用于主动锁模机制的耦合光电振荡器内,实现了对超模噪声的抑制,并为系统的小型化和集成化提供了关键技术支撑。

参考文献

[1] 王瑞鑫.新型主动锁模光纤激光器的研究与应用[D].北京:北京邮电大学,2015.

[2] 杜天华.面向一体化射频前端的多频光本振产生研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.

[3] HARGROVE L E, FORK R L, POLLACK M A. Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation [J]. Applied Physics Letters, 1964, 5(1): 4-5.

[4] YAO X S, MALEKI L. Dual microwave and optical oscillator [J]. Optics Letters, 1997, 22(24): 1867-1869.

[5] YAO X S, DAVIS L, MALEKI L. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(1): 73-78.

[6] WILLIAMS C, DAVILA-RODRIGUEZ J, MANDRIDIS D, et al. Noise characterization of an injection-locked COEO with long-term stabilization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(19): 2906-2912.

[7] SALIK E, YU N, MALEKI L. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 444-446.

[8] DAI Y, WANG R, YIN F, et al. Sidemode suppression for coupled optoelectronic oscillator by optical pulse power feedforward [J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27589.

[9] 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.

[10] WEI Z W, ZHU D, PAN S L. Stabilize the regeneratively mode-locked fiber laser based on a polarization maintained dual-loop structure [C]// 2015 Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2015). Hong Kong, China: Optical Society of America (OSA), 2015: ASu5I.1.

[11] CAI S H, PAN S L, ZHU D, et al. Stabilize the coupled optoelectronic oscillator by an unpumped erbium-doped fiber [C]// 2012 Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2012). Guangzhou, China: Optical Society of America (OSA), 2012: ATh2C.5.

[12] ZHU D, DU T H, PAN S L. A coupled optoelectronic oscillator with performance improved by enhanced spatial hole burning in an Erbium-doped fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3726-3732.

[13] DU T H, ZHU D, PAN S L. A polarization-maintained coupled optoelectronic oscillator incorporating an unpumped erbium-doped fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 010604.

(上接第 63 页)

[7] 邢美源,姚君山,刘杰.新一代运载贮箱搅拌摩擦焊应用研究[J].上海航天,2006,23(4):39-43.

[8] 赵宇宏,欧阳自鹏,胡佩佩,等.激光-TIG复合焊接温度场和应力场的有限元分析[J].上海航天,2012,29(6):68-72.

[9] 郑侃.薄壁铝合金件激光焊接过程模拟仿真与分析研究[D].武汉:华中科技大学,2009.

[10] 胡敏英.铝合金激光深熔焊接过程应力应变数值模拟研究[D].太原:太原科技大学,2008.

[11] 廖传清,高艳芳,杨江,等.铝合金联装架焊接残余应力和变形数值模拟[J].上海航天,2020,37(3):144-150.

[12] 蒋志伟,张玉.6061铝合金光纤激光填丝焊工艺与性能研究[J].热加工工艺,2015(7):189-191.

[13] 许飞,陈俐,郭路云.6061铝合金激光穿透焊的焊缝成形[J].航空制造技术,2015,25(11):74-76.

[14] 何涛.铝合金光纤激光填丝焊接工艺研究[D].武汉:华中科技大学,2011.

[15] DILTHEY U, ROOSEN S. Theoretical prediction in joining and welding [R]. Osaka: Osaka University Joining and Welding Research Institute, 1996: 133.

[16] 庄其仁.激光焊接温度场解析计算[J].华侨大学学报,2001,22(3):247-250.