

# 全保偏掺铒光纤光梳

鄢朋朋<sup>1</sup>, 贡航<sup>1</sup>, 叶飞<sup>1</sup>, 程朝亮<sup>1</sup>, 王庆婷<sup>1</sup>, 陆诗雨<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 王天烨<sup>1</sup>, 刘婷婷<sup>2</sup>,  
郭政儒<sup>2</sup>, 沈旭玲<sup>2,3</sup>, 杨康文<sup>1</sup>, 郝强<sup>1\*</sup>, 曾和平<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

<sup>4</sup>济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

**摘要** 搭建了基于非线性放大环形镜的全保偏掺铒光纤激光器, 它可为光梳系统在室外环境中的应用提供稳定运行的光学振荡源。在实验上, 通过两级光学预放大及高非线性光纤获得了 1000~2300 nm 的超连续谱, 采用共线型  $f-2f$  干涉仪检测到的载波包络偏移频率  $f_0$  的信噪比高达 35 dB。研究了腔内净色散和  $f_0$  线宽的关系, 并将自由运转状态下的  $f_0$  线宽窄化至 5 kHz。将光梳系统的主要参数(重复频率  $f_r$  和载波包络偏移频率  $f_0$ )溯源至同一台铷原子钟, 锁定后所测标准偏差分别为 780  $\mu$ Hz 和 308 mHz。该光纤光梳系统具有集成度高、体积小特点。  
**关键词** 激光器; 非线性放大环形镜; 载波包络偏移频率; 频率锁定; 光学频率梳

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0115001

## All Polarization-Maintaining Erbium-Doped Fiber Based Optical Comb

Yan Pengpeng<sup>1</sup>, Gong Hang<sup>1</sup>, Ye Fei<sup>1</sup>, Cheng Chaoliang<sup>1</sup>, Wang Qingting<sup>1</sup>, Lu Shiyu<sup>1</sup>,  
Chen fei<sup>1</sup>, Wang Tianye<sup>1</sup>, Liu Tingting<sup>2</sup>, Guo Zhengru<sup>2</sup>, Shen Xuling<sup>2,3</sup>, Yang Kangwen<sup>1</sup>,  
Hao Qiang<sup>1\*</sup>, Zeng Heping<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>School of Optical Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for  
Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University,  
Shanghai 200062, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>4</sup>Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

**Abstract** An all polarization-maintaining fiber laser is established based on a nonlinear amplifying loop mirror, and thus a stable optical oscillator source is applied to an optical comb system which works outdoors. In this experiment, supercontinuum covering from 1000 nm to 2300 nm is produced by using two-level optical preamplification and high nonlinear fibers. The optimal signal-to-noise ratio of carrier-envelope offset frequency  $f_0$  detected by the collinear  $f-2f$  interferometer is 35 dB. Furthermore, the relationship between the net cavity dispersion and the linewidth of  $f_0$  is investigated. The narrowest linewidth of  $f_0$  in the free-running mode is narrowed to 5 kHz. Finally, the repetition rate  $f_r$  and  $f_0$  are both phase-locked to a rubidium atomic clock. The standard deviations for  $f_r$  and  $f_0$  are 780  $\mu$ Hz and 308 mHz, respectively. The fiber optic comb system guarantees compact size and excellent integration level.

**Key words** lasers; nonlinear amplifying loop mirror; carrier-envelope offset frequency; frequency locking; optical frequency comb

**OCIS codes** 140.7090; 060.3510; 140.3425; 120.3940

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2019-12-02; 录用日期: 2019-12-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)、国家自然科学基金(11434005, 11504235, 11704253)、上海市青年科技英才“扬帆计划”(17YF1413100)

\* E-mail: qianghao@usst.edu.cn

光学频率梳在时/频域上具有极高的分辨率,在高精度测距<sup>[1]</sup>、光钟<sup>[2]</sup>、低相噪微波产生<sup>[3]</sup>等领域有着广泛的应用。2000年,美国科研人员 Jones 等<sup>[4]</sup>首次在钛宝石激光器的基础上实现了光学频率梳。但钛宝石光梳存在光路复杂、高环境敏感性、需周期性维护等缺点,不利于在室外环境下应用。随着各类锁模原理的涌现和光纤制造工艺的进步,光纤激光器被用来替代钛宝石激光器。2010年,Nakajima 等<sup>[5]</sup>以 NPR(Nonlinear Polarization Rotation)腔为核心实现了光学频率梳,但 NPR 腔受到锁模原理的限制,腔型为不保偏结构,易受温度、振动、湿度等环境因素的影响,因此仅适用于室内环境中。为了在室外环境中实现稳定运行的光纤光梳,科研人员采用具有飞秒量级脉冲宽度、可自启动、无光致损伤风险、全保偏结构等优点的 NALM(Nonlinear Amplifying Loop Mirror)腔<sup>[6]</sup>作为核心光源。2016年,Lezius 等<sup>[7]</sup>在 NALM 腔的基础上实现了全保偏光梳,但该光梳的核心光源为半空间结构,不利于实现高度集成化的光纤光梳。2018年,刘婷婷等<sup>[8]</sup>综述了全保偏光纤光梳技术的发展过程。在实验上,基于全保偏光纤结构的 NALM 腔获得信噪比为 40 dB 的  $f_0$  信号。

本文报道的光纤光梳的光路部分如图 1(a)~(e)所示,其中,LD1 和 LD2 为激光二极管,WDM1 和 WDM2 为波分复用器,EDF 为掺铒光纤,DPMFM 为保偏相位延时法拉第镜,PZT 为压电陶

瓷,coupler 1,coupler 2,coupler 3 和 coupler 4 分别表示分束比为 40:60、20:80、10:90 和 20:80 的耦合器;ISO1 和 ISO2 为光隔离器,PD1 和 PD2 为光电二极管,PMF 为单模保偏光纤,HNLF 为高非线性光纤,col 为准直器,L1、L2 和 L3 为透镜,HWP 为半波片,PPLN 为周期性极化铌酸锂晶体,LPF1 和 LPF2 为低通滤波器,HV source 为高压源,Rb 为铷钟。

如图 1(a)所示,振荡器中加入了由波片和法拉第旋转器组成的保偏相位延时法拉第镜<sup>[9]</sup>,它可为在非线性环内沿顺时针、逆时针方向传输的脉冲提供  $\pi/2$  的线性相移差,降低锁模自启动对环内非线性相移差的要求,从而降低被动锁模的泵浦阈值。该振荡器输出的种子光脉冲的重复频率  $f_r$  为 77.3 MHz,平均功率为 1.7 mW。利用两级掺铒光纤放大器将种子光平均功率提升至 203 mW,并随后由光纤分束器(coupler 4)分为两束,其中一束脉冲功率为 31.2 mW,作为该光纤光梳的输出端口,为应用预留,另一束脉冲功率为 162.5 mW,由一段单模保偏光纤压缩至脉宽小于 100 fs。如图 1(d)所示,通过光纤熔接的方式,将压缩后的脉冲注入一段高非线性光纤中,用于产生超连续谱。如图 1(e)所示,将该超连续谱耦合至共线型  $f-2f$  干涉仪内,就可以实现对  $f_0$  的探测。装置中所有光纤和器件尾纤均为保偏光纤,以增强光纤光梳系统的抗环境干扰能力。图 1(f)显示了两套锁相电路,分别用于锁定  $f_r$  和  $f_0$ 。

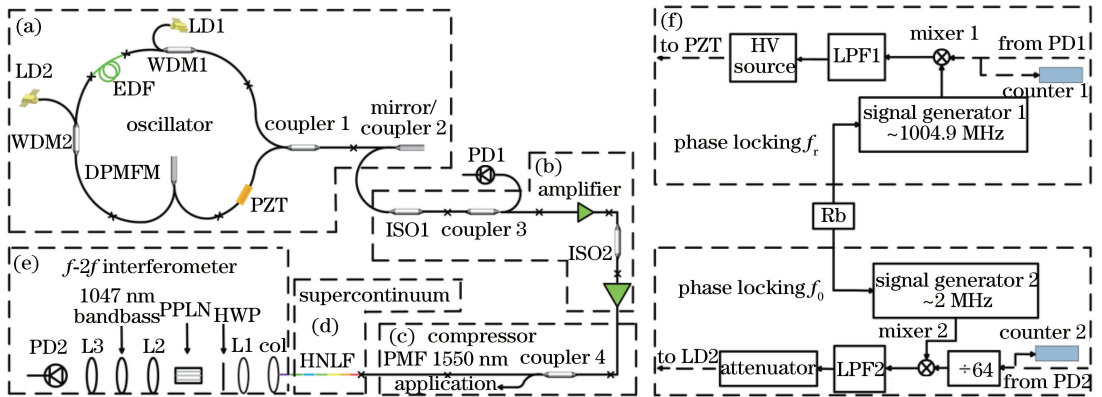


图 1 光路装置及锁相电路。(a)~(e)各部分光路装置;(f)锁相电路

Fig. 1 Optical path device and phase-locked circuit. (a)~(e) Each part of optical path device; (f) phase-locked circuit

图 2(a)显示了压缩后飞秒脉冲经由 HNLF 产生的超连续谱,光谱覆盖 1000~2300 nm。在实验上,将超连续谱经过准直聚焦透镜耦合进 PPLN 晶体(尺寸为 10 mm×4.5 mm×1 mm,反转周期为 31.8  $\mu\text{m}$ ),可使超连续谱中的 2094 nm 成分产生倍频。该倍频光与超连续谱中原有的 1047 nm 成分

经过窄带滤波片后发生拍频,由光电二极管 PD2 探测到  $f_0$ 。如图 2(b)所示, $f_0$  信号的信噪比高达 35 dB(带宽 BW 为 100 kHz)。

通过调整腔内增益光纤 EDF 和无源光纤的长度,研究了腔内净色散与  $f_0$  线宽的关系。当腔内净色散为 +700  $\text{fs}^2$  时,测得自由运转状态下  $f_0$  的线

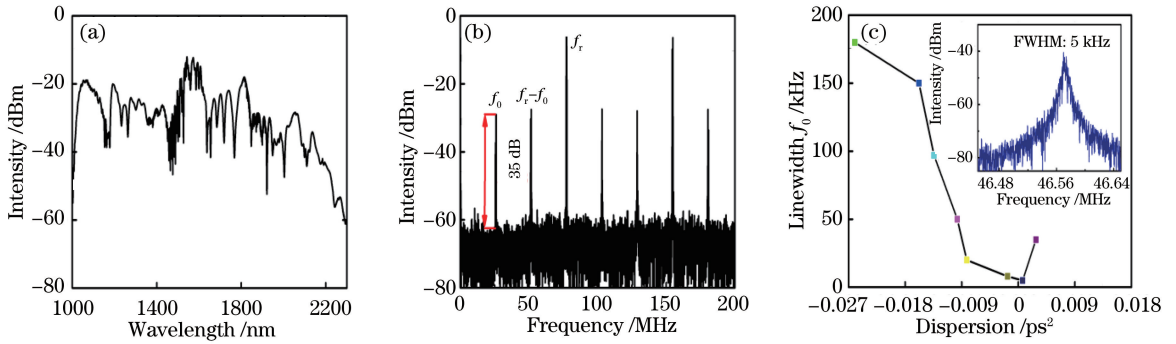


图2 实验结果。(a)超连续谱;(b)  $f_0$  信噪比为 35 dB;(c)  $f_0$  线宽与腔内色散的关系  
Fig. 2 Experimental results. (a) Supercontinuum; (b)  $f_0$  with signal-to-noise ratio of 35 dB;  
(c) relationship between linewidth of  $f_0$  and net cavity dispersion

宽为 5 kHz(BW 为 100 Hz),已接近钛宝石光梳中自由运转状态下  $f_0$  的线宽<sup>[10]</sup>,如图 2(c)所示。

采用锁相电路将  $f_r$  和  $f_0$  同时锁定在同一台铷原子钟(FS725, SRS Inc, 输出频率为 10 MHz, 秒稳定性为  $2 \times 10^{-11}$ , 频率准确度为  $5 \times 10^{-11}$ )上。在锁定  $f_r$  时,为了抑制噪声,选取  $f_r$  的高次谐波进行锁定<sup>[11]</sup>。本实验选取  $f_r$  的 13 次谐波与高频参考源 signal generator 1 (APSIN2010, AnaPico)进行混频,由低通滤波器 LPF1 得到误差信号,再将误差信号经高压放大后反馈给压电陶瓷 PZT 锁定,以 counter 1(FCA3100, Tektronix)测量  $f_r$ 。在 3000 s 采样时间内,  $f_r$  的标准偏差为 780  $\mu$ Hz;当采样时间为 1, 100, 1000 s 时,  $f_r$  的 Allan 偏差分别为  $7.05 \times 10^{-12}$ 、 $9.36 \times 10^{-13}$  和  $7.07 \times 10^{-13}$ 。

在  $f_r$  锁定的基础上,先将  $f_0$  经过 64 分频,目的是匹配锁相环带宽和增加  $f_0$  的锁定时间。将经过 64 分频后的  $f_0$  与参考源 signal generator 2

(DGDG4162, RIGOL)进行混频,由低通滤波器 LPF2 得到误差信号,再将误差信号进行衰减后反馈给腔内泵浦源 LD。由图 3(a)可知,将误差信号反馈给 LD1 时,仅能对  $f_0$  实现粗锁;将误差信号反馈给 LD2 时,可对  $f_0$  实现细锁。当反馈 LD2 锁定  $f_0$  后,用 counter 2(FCA3100, Tektronix)测量  $f_0$ 。在 3000 s 的采样时间内,  $f_0$  的标准偏差为 308 mHz;当采样时间为 1, 100, 1000 s 时,  $f_0$  的 Allan 偏差分别为  $3.96 \times 10^{-9}$ 、 $1.78 \times 10^{-10}$  和  $3.54 \times 10^{-11}$ 。图 3(b)显示了  $f_r$  和  $f_0$  的锁定精度,图 3(c)显示了  $f_r$  和  $f_0$  锁定后的 Allan 偏差。

该光纤光梳系统样机的实物如图 3(d)所示,包括锁模激光器、掺铒光纤放大器、脉冲压缩器、光谱展宽器、共线型  $f-2f$  干涉仪、多个泵浦源及其驱动电路、锁相电路等部分,最终集成于尺寸为 330 mm  $\times$  340 mm  $\times$  60 mm 的机箱中。该光纤光梳有望满足双光梳光谱测量、频率传递、星载光梳等领域的应用需求。

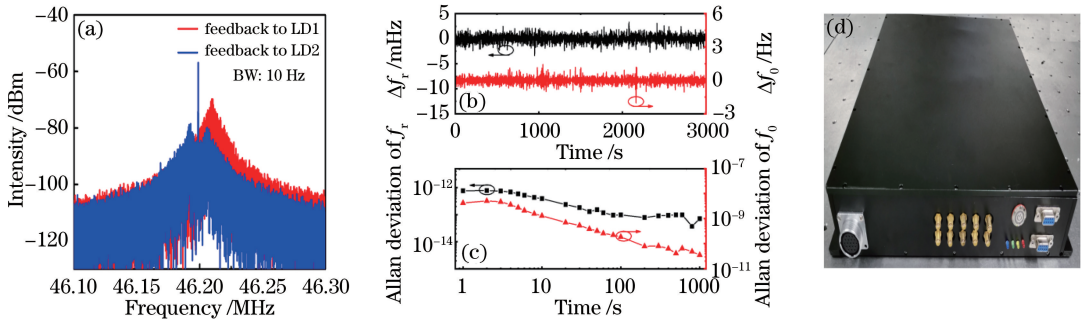


图3 实验结果及光梳实物图。(a)分别反馈 LD1 和 LD2 锁定  $f_0$ ;(b)  $f_r$  和  $f_0$  锁定后的频率计数结果;  
(c)  $f_r$  和  $f_0$  锁定后的 Allan 偏差;(d)光梳实物

Fig. 3 Experimental results and photo of optical comb. (a) Locking  $f_0$  by feedback of LD1 and LD2; (b) frequency counts after locking  $f_r$  and  $f_0$ ; (c) Allan deviation after locking  $f_r$  and  $f_0$ ; (d) photo of optical comb

## 参 考 文 献

- [1] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, et al. Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 020601.  
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 020601.
- [2] Nakamura T, Ito I, Kobayashi Y. Offset-free broadband Yb : fiber optical frequency comb for optical clocks [J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19376-19381.
- [3] Jung K, Shin J, Kim J. Ultralow phase noise microwave generation from mode-locked Er-fiber lasers with subfemtosecond integrated timing jitter [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3): 5500906.
- [4] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. Science, 2000, 288(5466): 635-639.
- [5] Nakajima Y, Inaba H, Hosaka K, et al. A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1667-1676.
- [6] Chen F H, Hao Q, Zeng H P. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er : fiber laser system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2119-2122.
- [7] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology[J]. Optica, 2016, 3(12): 1381-1387.
- [8] Liu T T, Hao Q, Zeng H P. All polarization-maintaining fiber-based frequency combs [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120003.  
刘婷婷, 郝强, 曾和平. 全保偏光纤光学频率梳技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120003.
- [9] Jiang T X, Cui Y F, Lu P, et al. All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(16): 1786-1789.
- [10] Yu Z J, Han H N, Xie Y, et al. Monolithic CEO-stabilization scheme-based frequency comb from an octave-spanning laser[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(4): 044205.
- [11] Wu H Y, Shi L, Ma T, et al. Design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601008.  
吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601008.