

## 基于非线性环形镜锁模的全保偏光纤光梳系统

陆诗雨<sup>1</sup>, 郝强<sup>1\*</sup>, 刘婷婷<sup>2</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 任心仪<sup>2</sup>, 沈旭玲<sup>2</sup>, 闫明<sup>2</sup>, 曾和平<sup>2,3</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>济南量子技术研究院红外光子学实验室, 山东 济南 250101

**摘要** 探究了一种基于非线性放大环形镜锁模的全保偏掺铒光纤光梳系统, 重复频率( $f_r$ )为 75.27 MHz,  $f_r$  与载波包络偏移频率( $f_o$ )的标准偏差为分别为 358  $\mu$ Hz 和 248 mHz。该系统通过温度反馈控制锁模振荡器局部环境、电压反馈控制压电陶瓷伸缩量、电流反馈控制泵浦源功率实现了对  $f_r$  和  $f_o$  的精确锁定, 在 10  $^{\circ}$ C 温度波动的外部环境中实现约 100 h 的稳定工作。最后, 将该光梳应用于混合气体光谱检测实验, 获得的乙炔吸收谱线与 HITRAN 数据库模拟结果一致, 表明该光梳系统可初步用于光谱分析等室外应用。

**关键词** 激光器; 光学频率梳; 载波包络偏移频率; 频率锁定

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2101002

## 1 引言

光学频率梳(简称“光梳”)自 20 世纪末获得广泛关注<sup>[1-2]</sup>。Hall 和 Hänsch 两位科学家因在该领域内的开创性贡献共同获得了 2005 年诺贝尔物理学奖。光梳输出的超短脉冲在频谱上呈现为数百万个以等频间隔分布的光学频率序列, 犹如一排精密的梳齿, 其数学表达式为  $f_n = n \times f_r + f_o$ , 其中,  $f_r$  是重复频率,  $n$  是纵膜序数,  $f_o$  是载波包络偏移频率。同时对  $f_r$  与  $f_o$  实现精密控制, 是获得光学频率梳的关键。

不断涌现的应用需求, 如在精密光谱<sup>[3]</sup>、光学时钟<sup>[4]</sup>和精密距离测量<sup>[5]</sup>等, 促使诸多新型光梳被广泛研究。早期的光梳大多是基于钛宝石激光器或固体激光器<sup>[6-8]</sup>, 这类激光器空间光路复杂、体积较大、对环境变化敏感, 不满足非恒温恒湿环境下的应用需求。与传统激光器相比, 光纤激光器具有结构简洁、稳定性好、体积小等优势, 已经成为实用化光梳的研究热点<sup>[9-11]</sup>。2012 年, 曹士英等<sup>[12]</sup>基于非线性偏振旋转(NPR)锁模实现了半空间结构的光学频

率梳, 通过对振荡器底板温度的精密控制, 在恒温实验室环境下实现了 20 h 的  $f_r$  与  $f_o$  锁定, 标准偏差分别为 515  $\mu$ Hz 和 93.13 mHz。2015 年, Zhang 等<sup>[13]</sup>在 NPR 锁模的振荡器中加入电光调制器(EOM)和压电陶瓷(PZT)将重复频率响应带宽提高到兆赫兹水平, 在小于 1  $^{\circ}$ C 波动的实验室环境中实现了长达 7 d 的  $f_r$  锁定, 标准偏差为 0.1 mHz。但是, 非保偏光纤的折射率易受振动和温度等因素的影响, 锁模和锁相的长期稳定性欠佳。同年, Feng 等<sup>[14]</sup>在基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的掺铒光纤光梳上, 通过共振测试实验证明该全保偏光梳仅易受高频振动( $>350$  Hz)影响, 并指出采用低通隔振结构可改善来自环境噪声的影响。2014 年, Sinclair 等<sup>[15]</sup>设计了一种基于 SESAE 锁模的掺铒光纤光梳, 得益于全保偏光纤型结构和适当的减震措施, 该光梳在车载运输过程中依然可维持  $f_r$  与  $f_o$  的高精度锁定, 标准偏差分别为 0.96 mHz 与 1.3 mHz。次年, 该团队<sup>[16]</sup>提高了系统的抗电磁干扰能力, 通过数字芯片分别处理控制高、低带宽双 PZT 和泵浦电流的反馈信号, 实现了  $f_r$  与  $f_o$  的更

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-05; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)

通信作者: \*qianghao@usst.edu.cn

高精度锁定,相应的标准偏差分别为 0.1 mHz 和 0.9 mHz,系统稳定工作时间大于 90 h。SESAM 锁模激光器存在几个实际问题,首先,SESAM 的生长批次不同导致其反射率、吸收率等指标差异较大。其次,SESAM 在长期使用过程中存在光致损伤风险,抗损伤性和可靠性有待进一步提升。此外,SESAM 一般具有百飞秒至皮秒量级的弛豫时间,会给光梳带来额外的相位噪声与不稳定性<sup>[17]</sup>。2016 年,Kuse 等<sup>[18]</sup>研发了基于非线性放大环形镜(NALM)锁模的全保偏掺铒光纤频率梳,利用抽运光与腔内石墨烯分别进行慢速和快速反馈来锁定  $f_0$  信号,利用 EOM、PZT 和温度反馈来锁定  $f_r$  信号,最终在  $\pm 2^\circ\text{C}$  波动的实验室环境下实现大于 60 h 的光梳长期稳定, $f_r$  与  $f_0$  的标准偏差分别为  $240\ \mu\text{Hz}$  和  $460\ \mu\text{Hz}$ 。2018 年,刘婷婷等<sup>[19]</sup>和鄢朋朋等<sup>[20]</sup>报道了全光纤结构 NALM 锁模掺铒光纤频率梳,当腔内净色散优化至  $+700\ \text{fs}^2$  时,将  $f_0$  线宽窄化到 5 kHz,在近 1 h 的锁定时间内, $f_r$  与  $f_0$  的标准偏差分别为  $780\ \mu\text{Hz}$  和 308 mHz。

本文实现了一种全保偏光纤结构、紧凑、可初步进行室外应用的光学频率梳。该系统采用基于 NALM 锁模光纤激光器,将其置于密封腔体实现与外部环境的隔绝。通过对锁模脉冲振荡器光纤和光纤器件的温度控制,减少  $f_r$  与  $f_0$  的频率漂移,以确保它们分别不超出相应的锁相电路的伺服范围。在约 100 h 的测量时间内, $f_r$  与  $f_0$  的标准偏差分别为  $358\ \mu\text{Hz}$  和 248 mHz。此外,基于该光纤光梳进行了混合气体光谱检测,获得乙炔的吸收谱线与 HITRAN 数据库模拟结果一致。

## 2 光梳光路装置

光纤光梳及光谱检测的光路部分如图 1(a)~(e)所示。其中,光纤光梳由锁模脉冲振荡器、光纤放大器、脉冲压缩与超连续谱展宽器、 $f-2f$  自参考探测器这四部分组成。图 1(e)为利用此光纤光梳进行混合气体光谱检测的示意图。为提高光纤光梳的抗环境干扰能力,实验装置中的光纤链路均采用保偏光纤及保偏光纤耦合器件。

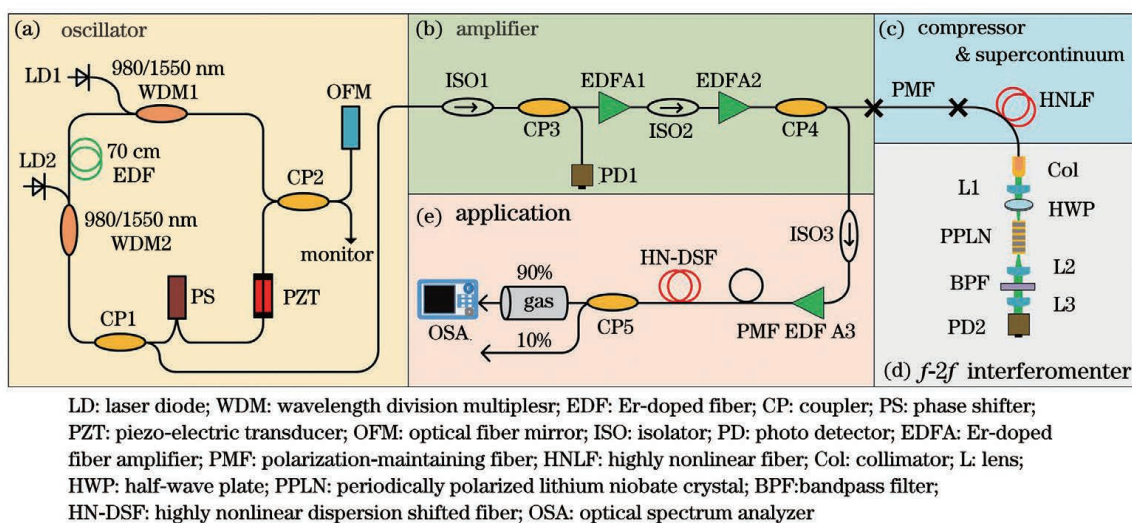


图 1 光路装置及应用装置。(a)~(d)各部分光路装置;(e)应用装置

Fig. 1 Optical path device and application device. (a)~(d) Each part of optical path device; (e) application device

如图 1(a)所示,锁模脉冲振荡器采用 NALM 锁模机制,由非线性环和线性臂两部分组成,通过一个分束比 50:50 的光分束器(CP2)进行连接。其中,CP2 一端连接至光纤反射镜(OFM),构成线性臂,另一端用作锁模监测。非线性环包括一段长度为 70 cm 的掺铒光纤(EDF),两支 980/1550 波分复用器(WDM1 & WDM2),用于耦合抽运光(LD1 & LD2),一支 10:90 的光分束器(CP1)和一支相移器(PS)。加入此相移器,是为了使在非线性环内反向传输的两个脉冲发生  $\pi/2$  的线性相移差,从而达到

降低锁模阈值的目的<sup>[21-22]</sup>。锁模脉冲振荡器的输出端为 CP1 的 10% 端口,重复频率为 75.27 MHz,平均功率为 4.1 mW。

如图 1(b)所示,锁模脉冲振荡器的输出脉冲经光隔离器(ISO1)后,接入一个 40:60 的光分束器(CP3),40% 端连接光电探测器(PD1),用于重复频率信号的探测,60% 端接入级联的掺铒光纤放大器(EDFA1 & EDFA2),放大后的平均功率为 196 mW。通过该级联放大器将信号先进行低泵浦放大,可有效抑制放大自发辐射(ASE)的产生与

其他噪声成分的引入,再将其经过隔离器(ISO2)后进行二级放大,脉冲光的信噪比(SNR)将得到大幅优化,并可避免由单次放大产生的泵浦能量浪费及放大效率低下的问题<sup>[23-24]</sup>。而后,由分束比 10:90 的光分束器(CP4)分为两束光,10% 端口作为光梳的输出端口,另一束输出端口的脉冲功率为 172 mW,接入一段单模保偏光纤(PMF)将脉宽压缩至 100 fs 以内。压缩后的脉冲通过光纤熔接方式注入一段保偏高非线性光纤(HNLF)中,利用非线性效应来产生超连续谱。此高非线性光纤在 1550 nm 处的色散为  $-2.4 \text{ fs}^2/\text{mm}$ ,非线性系数为  $10.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。如图 2(a)所示,该超连续谱覆盖 1000~2200 nm (AQ6370D & AQ6375B,

Yokogawa, 日本),超过一个倍频程。如图 1(d)所示,该超连续谱经准直器(Col)耦合至共线型  $f-2f$  自参考探测器内,波长在 2094 nm 附近的基频光经过周期性极化的钽酸锂晶体(PPLN)后,被倍频至 1047 nm 附近,并与超连续谱中原有 1047 nm 的脉冲光进行拍频,产生  $f_0$  信号。而后,通过光电探测器(PD2)实现  $f_0$  探测,如图 2(b)所示,带宽(BW)为 100 kHz 时,  $f_0$  信噪比高达 40 dB (N9000A, Agilent, 美国)。为获得更窄的  $f_0$  线宽,需不断调整振荡器腔内净色散接近零<sup>[20]</sup>。最终,当腔内净色散为  $+705 \text{ fs}^2$  时获得半峰全宽(FWHM)为 5 kHz 的  $f_0$  信号(N9000A, Agilent, 美国),如图 2(c)所示。

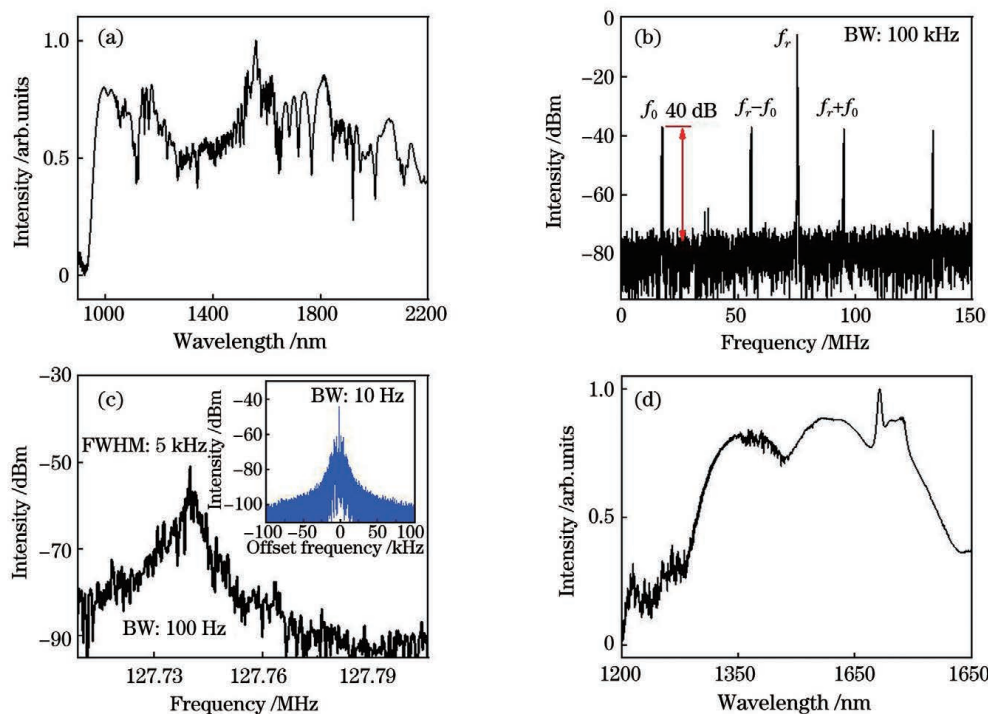


图 2 实验结果。(a)超连续谱;(b)  $f_0$  信号;(c)自由运转与锁定状态(插图)下  $f_0$  的线宽;(d)光谱展宽  
Fig. 2 Experimental results. (a) Supercontinuum; (b)  $f_0$  signal; (c) linewidth of  $f_0$  when free running and locking (illustration); (d) spectrum broadening

混合气体光谱检测的实验装置如图 1(e)所示。CP4 光梳应用端输出的平均功率为 17.5 mW,脉冲宽度为 651 fs,经光隔离器(ISO3)后接入一台双向泵浦的掺铒光纤放大器(EDFA3),将脉冲功率放大至 110 mW。功率放大后的脉冲由一段保偏单模光纤进行脉冲压缩至 100 fs 以内。压缩脉冲注入一段高非线性色散位移光纤(HN-DSF),用于在 1350~1550 nm 处产生平坦光谱。其中,HN-DSF 的衰减系数为 1.5 dB/km,在抽运波长(1550 nm)处的色散斜率小于  $0.03 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。如图 2(d)所示,

经展宽的光谱范围为 1250~1650 nm(AQ6370D, Yokogawa, 日本),覆盖了包含  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  (1510~1540 nm)、 $^{12}\text{CO}$ (1578~1585 nm)及空气中的水分子(1350~1480 nm)在内的多种气体分子吸收谱。

### 3 光梳控制装置

本实验设计了用于光纤光梳温度控制的恒温装置,并通过两组锁相电路分别实现  $f_r$  与  $f_0$  同时锁定。为了降低外界环境温度波动和内部器件热累积对  $f_r$  与  $f_0$  信号的影响,本实验设计了光纤光路的

密封腔体,如图 3(c)所示。采用上、下两层铜箔对锁模脉冲振荡器的增益光纤和光纤器件进行固定和热均衡,避免温度分布不均。利用上(TEC2)、下(TEC1)两块半导体制冷片对锁模脉冲振荡器进行温度控制。其中,TEC1 用于直接控制光路及下层铜箔的温度( $T_{Cu1}$ ),提供快速的温度反馈。TEC2 用于控制密封腔内的空气温度( $T_{in}$ ),间接控制上层铜箔的温度( $T_{Cu2}$ ),提供精细的温度反馈。其中,TEC1 和 TEC2 温度调控精度为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。TEC 制冷片发热面的热量由铝板内嵌的循环水转移至光纤光梳外部。锁模脉冲振荡器和光纤放大器所用的多支激光二极管的热累积,也由该路水循环进行热量转移。

图 3(b)所示为  $f_r$  与  $f_0$  信号的锁相电路。为保持信号同步,两路信号均锁定在同一台铷原子

钟上。该铷原子钟的输出频率为 10 MHz,秒稳定度为 $2\times 10^{-11}$ 。为了更好地抑制噪声,选取  $f_r$  的高次谐波进行锁定<sup>[25]</sup>。本实验选取  $f_r$  的 68 次谐波与参考源(Ref 1, DSG3060, RIGOL, 中国)进行混频,经过低通滤波后得到误差信号,通过高压放大后反馈给 PZT 锁定。其中,PZT 的最大伸缩量为  $7\text{ }\mu\text{m}$ ,谐振频率约 150 kHz。在锁模脉冲振荡器中,该 PZT 对  $f_r$  的实际伺服范围约为 50 Hz。锁模脉冲振荡器的泵浦功率对  $f_0$  信号的调制带宽被限制在约 100 Hz 的水平。因此,线宽为 5 kHz 的  $f_0$  信号需进行 64 分频以匹配锁相环带宽。分频后的  $f_0$  信号通过高速鉴频鉴相器与参考源(Ref 2, DG4162, RIGOL, 中国)进行比对,得到的误差信号反馈给泵浦源锁定,锁定范围约为 1 MHz。

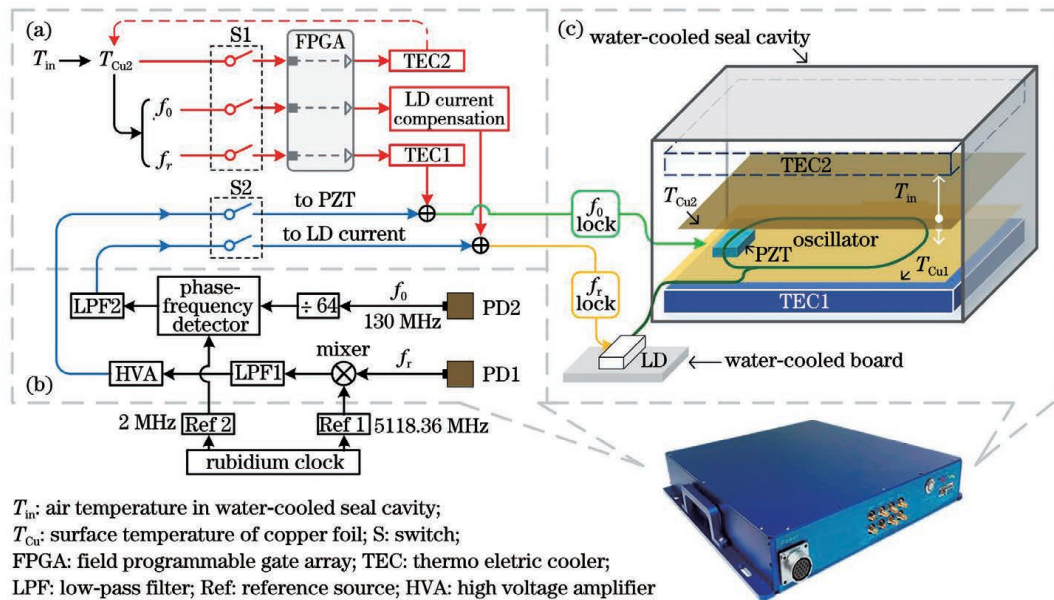


图 3 系统装置图。(a)反馈控制示意图;(b)锁相电路;(c)恒温装置

Fig. 3 System device. (a) Feedback control diagram; (b) phase lock circuit; (c) temperature control device

## 4 结果与讨论

当外界环境在一天时间内发生约  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度波动时, $f_r$  信号的漂移量为 6.2 kHz,如图 4(a)中虚线所示, $f_0$  信号的漂移量约 310 MHz。在开启水循环冷却的条件下,密封腔体的内部温度波动显著降低。在一天的测量周期内, $f_r$  与  $f_0$  信号的漂移量相应地减少至 0.51 kHz 和 26.9 MHz,如图 4(a)、(b)中实线所示。

在开环状态下,即 S1 与 S2 均打开,实验测定了 TEC1、TEC2、泵浦电流  $I_{LD}$  对  $f_r$  与  $f_0$  信号的控制能力,如图 3(a)所示。当 TEC1 增加  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, $f_r$

与  $f_0$  信号分别减少约 67 Hz 和 3.3 MHz。当 TEC2 增加  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, $f_r$  与  $f_0$  信号分别减少 7.7 Hz 和 0.34 MHz。当  $I_{LD}$  增加 1 mA 时, $f_r$  与  $f_0$  信号分别减少 0.86 Hz 和 0.9 MHz。可以发现,TEC1 对  $f_r$  信号的影响显著,泵浦电流对  $f_0$  信号的影响显著。因此,利用 TEC1 和  $I_{LD}$  分别对  $f_r$  和  $f_0$  的中心频率位置进行补偿控制。

在部分闭环状态下,即 S1 关闭与 S2 打开,在非恒温实验条件下(温度波动约  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $f_r$  和  $f_0$  频率漂移得到了一定程度的抑制。一种较为常见的情况是,当外界环境温度长时间单调变化时, $f_0$  信号会持续的单向漂移。当  $I_{LD}$  对该频率

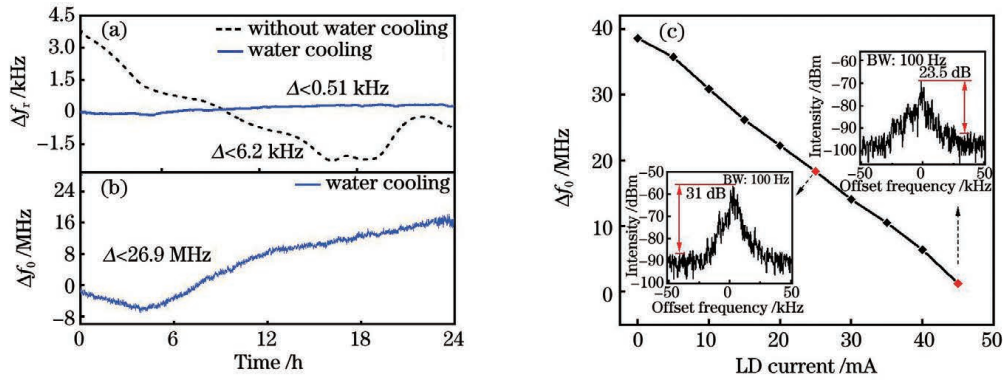


图 4  $f_r$  与  $f_0$  的频率漂移。(a) 有无水冷控制下  $f_r$  的频率漂移; (b) 水冷控制下  $f_0$  的频率漂移量; (c)  $f_0$  的信噪比与 LD 电流变化关系

Fig. 4 Frequency drift of  $f_r$  and  $f_0$ . (a) Frequency drift of  $f_r$  with and without water cooling; (b) frequency drift of  $f_0$  with water cooling; (c) relationship between SNR of  $f_0$  and LD current

漂移进行补偿时, 累积的电流变化会使  $f_0$  信号的信噪比降低, 如图 4(c) 所示, 当电流从 25 mA 增加至 45 mA 时,  $f_0$  的信噪比将显著降低至 30 dB 以下 (N9000A, Agilent, 美国)。为避免此类现象, 实验利用 TEC2 对  $T_{Cu2}$  温度进行精细控

制, 维持其温度在小范围内稳定不变, 以抑制  $f_0$  的单向漂移。如图 5(a)、(b) 所示, 在 24 h 的测量时间中, TEC1、TEC2 和  $I_{LD}$  的协同工作可以将  $f_r$  与  $f_0$  信号的漂移量分别进一步控制在 10 Hz 和 700 kHz 以内。

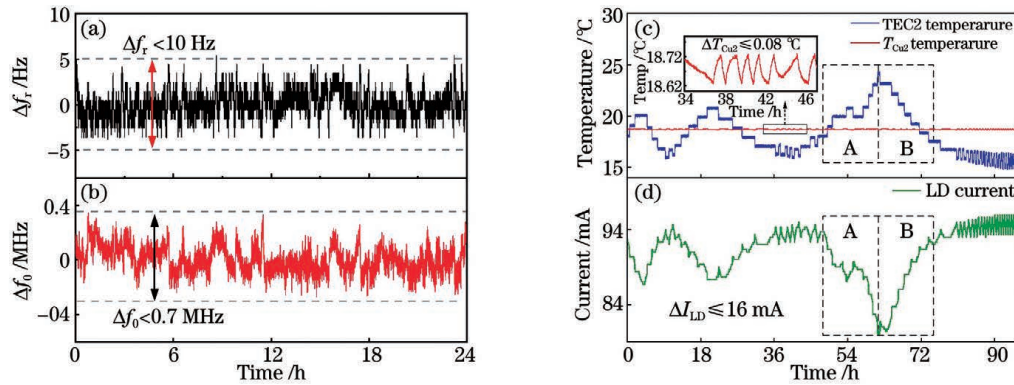


图 5 反馈控制结果。(a) 温控反馈下  $f_r$  的频率漂移; (b) LD 电流反馈下  $f_0$  的频率漂移; (c)  $T_{Cu2}$  与 TEC2 温度变化; (d) LD 电流变化

Fig. 5 Results of feedback control. (a) Frequency drift of  $f_r$  with temperature feedback; (b) frequency drift of  $f_0$  with LD current feedback; (c) variation of  $T_{Cu2}$  and TEC2 temperature; (d) variation of LD current

在全闭环状态下, 即 S1 与 S2 均关闭, 密封腔体内的温度调节与  $I_{LD}$  反馈情况如图 5(c)、(d) 所示。其中, 当外界环境温度逐步下降时, TEC2 为稳定  $T_{Cu2}$  温度而进行升温, 如图 5(c) 中 A 区域所示; 此时, 为了锁定  $f_0$  的中心频率,  $I_{LD}$  在闭环反馈状态下相应减少, 如图 5(d) 中 A 区域所示。当外界环境温度由降转升时, TEC2 反向调温, 如图 5(c) 中 B 区域所示。此时, 为继续锁定  $f_0$  的中心频率,  $I_{LD}$  在闭环反馈状态下相应增加, 如图 5(d) 中 B 区域所示。最终, 系统在约 100 h 运行过程中,  $I_{LD}$  的变化量被控制在 16 mA 范围内,  $T_{Cu2}$  在 0.08  $^{\circ}C$  的小范围内稳定, 如图 5(c) 中插图所示。

采用频率计数器 (FCA3100, Tektronix, 美国) 对  $f_r$  与  $f_0$  进行记录, 采样时间为 1 s。锁定后的  $f_0$  信号如图 2(c) 中插图所示, BW 为 10 Hz 时, 信噪比达 40 dB (N9000A, Agilent, 美国)。图 6(a) 显示了 100 h 内的  $f_r$  和  $f_0$  的锁定情况, 标准偏差分别为 358  $\mu$ Hz 和 248 mHz。图 6(b) 为  $f_r$  和  $f_0$  对应的 Allan 偏差。当积分时间为 1 s、100 s、10000 s 时,  $f_r$  的 Allan 偏差分别为  $4.17 \times 10^{-12}$ 、 $2.72 \times 10^{-13}$  和  $2.37 \times 10^{-14}$ ,  $f_0$  的 Allan 偏差分别为  $1.69 \times 10^{-9}$ 、 $1.03 \times 10^{-10}$  和  $1.27 \times 10^{-11}$ 。经线性拟合后可见  $f_r$  和  $f_0$  的频率稳定度与  $\tau^{1/2}$  接近成反比, 其中  $\tau$  是积分时间。如果利用此光学频率梳对

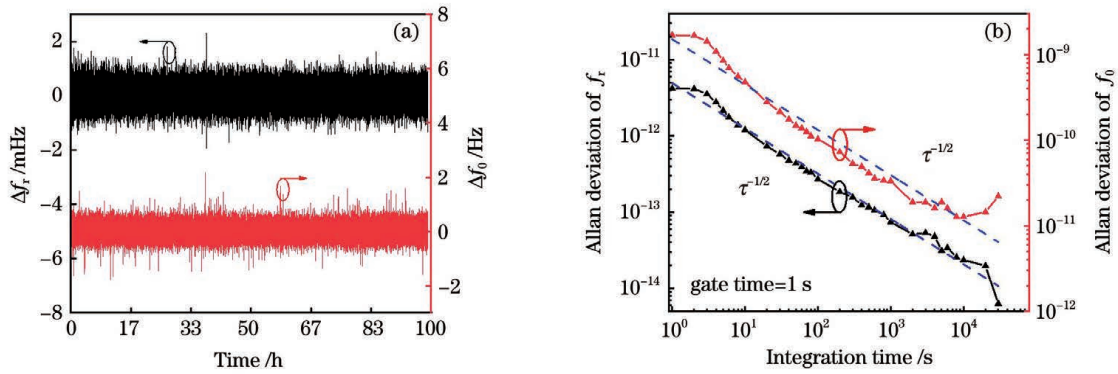


图 6  $f_r$  和  $f_0$  测量结果。(a) 频率计数; (b) Allan 偏差

Fig. 6 Results of  $f_r$  and  $f_0$  measurement. (a) Frequency counts; (b) Allan deviation

1.5  $\mu\text{m}$  附近的稳频激光进行绝对频率测量, 当采样时间大于 100 s 时, 由  $f_0$  波动引入的不确定分量小于  $10^{-17}$ , 满足光频计量的使用需求<sup>[26]</sup>。

本实验基于该光梳对混合气体样品进行了光谱检测。定制的标准气样池 (Daud-4/2/150/150-FCAPC, Wavelength References, 美国) 充有  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  (2 Torr, 1 Torr = 133.322 Pa) 和  $^{12}\text{CO}$  (4 Torr) 等混合气体, 长度为 8 cm。实验使用 0.02 nm 分辨率的光谱分析仪 (AQ6370D, Yokogawa, 日本) 进行光谱测量。实验装置能够对包括  $^{12}\text{CO}$ 、 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  和光路中水分子  $\text{H}_2\text{O}$  在内的多种类气体分子光谱进行同时测量, 测量结果如图 7(a)~(c) 所示。为验证光谱测量的准确性, 本文将获得的  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  吸收谱线在经

过去背景及归一化处理, 与 HITRAN 数据库的模拟光谱 (Voigt 线型, 温度 296 K) 进行对比, 如图 7(c) 所示。结果显示检测数据与模拟结果基本吻合, 两者偏差的均方差仅为 2.4%, 如图 7(c) 中散点线所示。根据测量结果可知,  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  气体吸收谱线的线强度在  $2.22 \times 10^{-21} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$  以上, 吸收谱线线宽约为  $0.02 \text{ cm}^{-1}$ , 符合 HITRAN 数据库结果。为提高气体检测的灵敏度, 可采用腔增强吸收光谱技术<sup>[27]</sup> 与光外差平衡探测技术<sup>[28]</sup>, 通过增加光与物质分子的相互作用长度和抑制探测系统共模噪声的方式, 来提高光谱检测的信噪比, 最终达到对痕量气体的灵敏检测。后续实验, 我们将采用上述的腔增强吸收光谱技术来进行灵敏度检测。

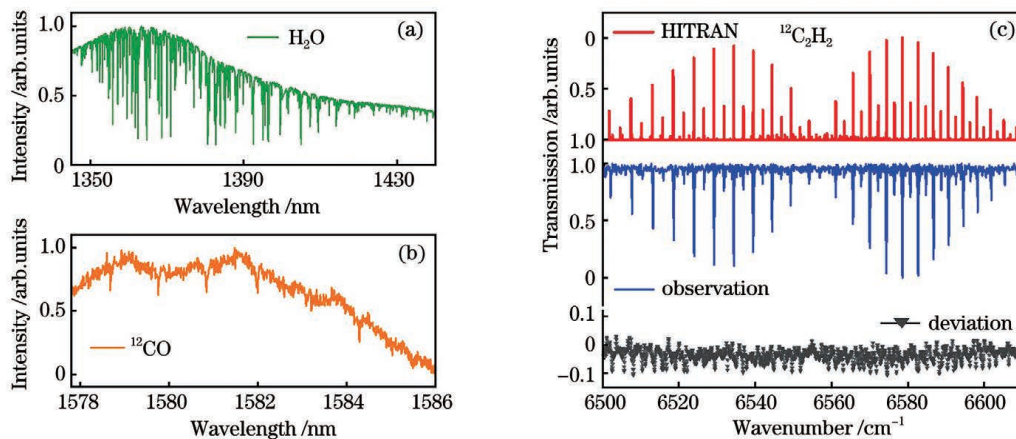


图 7 气体吸收光谱。(a)  $\text{H}_2\text{O}$  吸收谱; (b)  $^{12}\text{CO}$  吸收谱; (c)  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  吸收谱与 HITRAN 数据库谱线对比

Fig. 7 Gas absorption spectrum. (a) Absorption spectrum of  $\text{H}_2\text{O}$ ; (b) absorption spectrum of  $^{12}\text{CO}$ ; (c) comparison of absorption spectrum of  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  with HITRAN database

## 5 结 论

本文展示了基于 NALM 锁模的全保偏掺铒光纤光学频率梳系统, 其体积为  $330 \text{ mm} \times 340 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ , 整机重 6.5 kg。在  $(22 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  的环境温度

波动下, 光梳系统实现  $f_r$  和  $f_0$  长期稳定, 连续锁定时间约 100 h, 系统的频率稳定度在 1 s 内, 约为  $4 \times 10^{-12}$ 。此外, 在基于该光梳的宽光谱检测混合气体实验中, 获得的检测数据与 HITRAN 数据库的模拟结果基本一致, 表明该光纤光梳系统可初步用于

光谱分析等室外应用。通过进一步加强隔振、控温条件,有望实现光纤光梳系统的车载、星载应用。

### 参 考 文 献

- [1] Diddams S A, Jones D J, Ye J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102-5105.
- [2] Holzwarth R, Udem T, Hansch T W, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(11): 2264-2267.
- [3] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 627-630.
- [4] 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.
- [5] Cui P F, Yang L H, Lin J R, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute distance measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120011. 崔鹏飞, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120011.
- [6] 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): 635-640.
- [7] Diddams S A. The evolving optical frequency comb [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B51-B62.
- [8] Yang K W, Li W X, Yan M, et al. High-power ultra-broadband frequency comb from ultraviolet to infrared by high-power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12899-12905.
- [9] Qin Z P, Xie G Q, Gu H A, et al. Mode-locked 2.8  $\mu\text{m}$  fluoride fiber laser: from soliton to breathing pulse[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(6): 065001.
- [10] Liu X M, Cui Y D. Revealing the behavior of soliton buildup in a mode-locked laser[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016003.
- [11] Ding Z X, Huang Z N, Chen Y, et al. All-fiber ultrafast laser generating gigahertz-rate pulses based on a hybrid plasmonic microfiber resonator[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(2): 026002.
- [12] Cao S Y, Meng F, Lin B K, et al. Precise frequency control of an Er-doped fiber comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 134205. 曹士英, 孟飞, 林百科, 等. 长时间精密锁定的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳[J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 134205.
- [13] Zhang Y Y, Yan L L, Zhao W Y, et al. A long-term frequency-stabilized erbium-fiber-laser-based optical frequency comb with an intra-cavity electro-optic modulator[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(6): 064209.
- [14] Feng Y, Xu X, Hu X H, et al. Environmental-adaptability analysis of an all polarization-maintaining fiber-based optical frequency comb [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17549-17559.
- [15] Sinclair L C, Coddington I, Swann W C, et al. Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6996-7006.
- [16] Sinclair L C, Deschênes J D, Sonderhouse L, et al. Invited article: a compact optically coherent fiber frequency comb[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(8): 081301.
- [17] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [18] Kuse N, Jiang J, Lee C C, et al. All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3095-3102.
- [19] 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.
- [20] Yan P P, Gong H, Ye F, et al. All polarization-maintaining erbium-doped fiber based optical comb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0115001. 鄢朋朋, 贡航, 叶飞, 等. 全保偏掺铒光纤光梳[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0115001.
- [21] 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.
- [22] Liu G Y, Ou S M, Chen K L, et al. Mode-locked oscillator-amplifier femtosecond pulse laser with bias phase shift nonlinear loop mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501011. 刘关玉, 欧尚明, 陈昆仑, 等. 基于偏置相移非线性环路反射镜的锁模振荡放大飞秒脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501011.
- [23] Xiao H, Leng J Y, Zhou P, et al. High power

- tandem-pumped Yb-doped fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201007.
- 肖虎, 冷进勇, 周朴, 等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201007.
- [24] Zhao Z Y, Duan K L, Wang J M, et al. Comprehensive analysis of amplified spontaneous emission noise of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 611-614, 618.
- 赵振宇, 段开棕, 王建明, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器的自发辐射噪声分析[J]. 激光技术, 2009, 33(6): 611-614, 618.
- [25] Peng J L, Ahn H, Shu R H, et al. Highly stable, frequency-controlled mode-locked erbium fiber laser comb[J]. Applied Physics B, 2007, 86(1): 49-53.
- [26] Xia C Q, Wu T F, Zhao C B, et al. Experiment study on carrier-envelope offset frequency locking in a femtosecond fiber comb[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 123201.
- 夏传青, 武腾飞, 赵春播, 等. 光纤飞秒光学频率梳载波包络偏移频率锁定的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 123201.
- [27] Han L, Xia H, Dong F Z, et al. Progress and application of cavity enhanced absorption spectroscopy technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911003.
- 韩萃, 夏滑, 董凤忠, 等. 腔增强吸收光谱技术研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911003.
- [28] Tan T, Cao Z S, Wang G S, et al. Study on the technology of the 4.4 μm mid-infrared laser heterodyne spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6): 1516-1519.
- 谈图, 曹振松, 王贵师, 等. 4.4 μm 中红外激光外差光谱探测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1516-1519.

## All Polarization Maintaining Fiber-Based Optical Comb System with Nonlinear Loop Mirror Mode-Locking

Lu Shiyu<sup>1</sup>, Hao Qing<sup>1\*</sup>, Liu Tingting<sup>2</sup>, Chen Fei<sup>1</sup>, Ren Xinyi<sup>2</sup>, Shen Xuling<sup>2</sup>, Yan Ming<sup>2</sup>, Zeng Heping<sup>2,3</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, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

<sup>3</sup> Infrared Photonics Laboratory, Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

### Abstract

**Objective** Compared with the traditional laser, fiber laser has the advantages of simple structure, high stability, and small size, becoming the research focus of practical optical comb. The structure of fiber-based optical comb with nonlinear polarization rotation (NPR) mode-locking is simple, but the refractive index of non polarization-maintaining fiber is easily affected by vibration and temperature, and the long-term stability of mode-locked state and phase-locked state of the oscillator is poor. The optical frequency comb based on semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) can improve the influence of environmental noise due to the fully polarization maintaining fiber structure and appropriate damping measures. However, SESAM has the risk of light-induced damage during long-term use. It has a relaxation time of several hundred femtoseconds to picoseconds, bringing additional phase noise and instability to the optical comb. Most of the reports about the long-term stable operation of the comb were obtained in the constant temperature laboratory. In this study, we report a compact optical frequency comb with all polarization maintaining fiber structure. The system had kept stable operation for a long time in the external environment of 10 °C temperature fluctuation, and the mixed gas detection experiment was completed. This paper provides a feasible method for realizing practical optical frequency comb.

**Methods** In the study, a mode-locked fiber laser with nonlinear amplifying loop mirror (NALM) was used as the seed source of the optical comb, which was placed in a sealed cavity to achieve isolation from the external environment. Then, the optical power amplification, pulse width compression, and spectrum broadening were studied by using cascaded erbium-doped fiber amplifier, single-mode polarization-maintaining fiber (PMF), and highly nonlinear fiber (HNLF). The broadened spectrum was injected into the  $f-2f$  self-referenced detector to



detect the carrier envelope offset frequency ( $f_0$ ) signal. Then, by precision controlling the local temperature of the mode-locked fiber oscillator, the length of a piezoelectric transducer, and the current of the pump diode, long-term repetition rate ( $f_r$ ) and  $f_0$  locking of the optical frequency comb was achieved. Finally, a high non-linear dispersion shifted fiber (HN-DSF) was connected to the comb application end to generate flat spectrum at 1350–1550 nm. Besides, a gas sample cell filled with  $^{12}\text{CO}$  and  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  was used to exam the mixed gas detection experiment.

**Results and Discussions** The repetition rate of the mode-locked laser was 75.27 MHz, and the average power was 4.1 mW. The pulsed light was amplified to 196 mW by a cascaded erbium-doped fiber amplifier, and then the pulse width was compressed to less than 100 fs by a section of PMF fiber. The supercontinuum of the compressed pulse was realized by a segment of HNLF fiber from which the spectrum covered 1000–2200 nm [Fig. 2(a)]. The  $f$ - $2f$  self-referenced detector detected  $f_0$  signal with signal to noise ratio of 40 dB and line width of 5 kHz [Fig. 2(b)–2(c)]. In long-term operation, the drifts of  $f_r$  and  $f_0$  (24 h) in the open-loop were reduced from 6.2 kHz and 310 MHz to 0.51 kHz and 26.9 MHz, respectively [Fig. 4(a) and (b)]. The drifts were further reduced to 10 Hz and 700 kHz in the partially feed-back loop, which satisfied the servo capability of the phase-locked circuit of the system [Fig. 5(a) and (b)]. Finally, the standard deviations of  $f_r$  and  $f_0$  after locking were 358  $\mu\text{Hz}$  and 248 mHz in 100 hours operation, respectively [Fig. 6(a)]. In the experiment of gas mixture detection based on the optical frequency comb, a flat spectrum from 1250–1650 nm was generated from a segment of HN-DSF fiber, covering the absorption spectra of various gas molecules including  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $^{12}\text{CO}$ , and  $\text{H}_2\text{O}$  [Fig. 2(d)]. The obtained  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  gas detection data was basically consistent with the simulation results of HITRAN database, and the standard deviation of their deviations was only 2.4% [Fig. 7(c)].

**Conclusions** An all polarization-maintaining fiber optical frequency comb for outdoor application is proposed. The size of the optical frequency comb is 330 mm  $\times$  340 mm  $\times$  65 mm. The frequency stability of the optical frequency comb system is about  $4 \times 10^{-12}$  in 1 s, and the system can keep  $f_r$  and  $f_0$  stable for a long time under the temperature fluctuation of  $(22 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . In addition, in the experiment of wide spectrum detection of mixed gas based on the optical comb, the gas detection data obtained is consistent with the simulation results of HITRAN database, indicating that the optical comb system can be rudimentarily used for outdoor applications such as spectral analysis.

**Key words** lasers; optical frequency comb; carrier-envelope offset frequency; frequency locking

**OCIS codes** 140.3510; 140.7090; 140.3425; 120.39