

仪器与测量·封面文章

万秒环内相对频率稳定度达 10^{-21} 量级的 掺铒光纤光学频率梳*

马骏逸^{1)2)#} 邵晓东^{1)2)#} 刘思聪³⁾ 刘巾杰³⁾ 罗远强³⁾
李呈志¹⁾²⁾ 韩海年^{1)3)4)†} 魏志义^{1)2)3)‡}

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

4) (合肥国家实验室, 合肥 230088)

(2025年11月16日收到; 2025年12月15日收到修改稿)

本文介绍了一种基于非线性环形放大器锁模技术实现的长期稳定度达 10^{-21} 量级的掺铒光纤光学频率梳研究. 自建的重复频率 (f_r) 为 100 MHz 的掺铒 (Er) 光纤飞秒激光器输出 290 mW, 67 fs 的飞秒脉冲, 采用共线 $f-2f$ 自参考技术探测到信噪比约 35 dB 的载波包络偏频 (f_{ceo}) 信号. 通过锁相环电路控制腔内的快速电光调制器、压电陶瓷和泵浦电流实现了将 f_{ceo} 和与连续激光的拍频信号同时锁定到微波参考信号. 锁定后 f_{ceo} 的相位噪声为 421 mrad, 环内相对频率稳定性为 $5.24 \times 10^{-17} @ 1 \text{ s}$, 拍频相位噪声为 129 mrad, 环内相对频率稳定性 $1.73 \times 10^{-18} @ 1 \text{ s}$, 在 20000 s 时进一步提升至 5.30×10^{-21} . 这样高稳定低噪声的光纤光梳系统为开展高精度光钟、光频比对、时频传递等研究提供了理想工具.

关键词: 掺铒光纤飞秒激光器, 非线性放大环形镜锁模, 高稳定度光纤光学频率梳

DOI: 10.7498/aps.75.20251560

CSTR: 32037.14.aps.75.20251560

1 引言

高频率稳定性和低相位噪声是光学频率梳性能的两个关键指标^[1-8], 高稳定性的飞秒光学频率梳在精密测量物理^[9]、光谱学^[10]、光钟^[11]以及阿秒科学^[12,13]等前沿领域中发挥着重要作用. 掺 Er 光纤光学频率梳的中心波长位于光通信波段 (约 1550 nm), 而单模光纤在该波段表现出负色散特性, 因此, 相较于掺 Yb 光纤光学频率梳使用光栅

对或啁啾布拉格光栅 (chirped fiber Bragg grating, CFBG), 掺铒光纤光学频率梳可以通过单模光纤与掺铒增益光纤共同组成全光纤锁模激光器结构, 结构更加简单, 成本更低. 通常 Er 光纤锁模光学频率梳基于三种成熟的锁模原理, 分别是可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 锁模、偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 锁模以及非线性放大环锁模 (nonlinear amplifying loop mirror, NALM), 这三种锁模机理的光纤光梳都被深入研究过^[14-16]. 其中 SA 锁模的优势是结构简

* 量子通信与量子计算机-国家科技重大专项 (批准号: 2021ZD0300904)、国家自然科学基金 (批准号: 62435013, 62305373) 和国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB4601100) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: hmhan@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

单,可自启动锁模,但具有较慢的弛豫时间,固有相位噪声较大;NPE锁模的优势在于振荡器输出功率高,脉宽窄固有噪声较低,但非保偏光纤的使用使其抗干扰性能较差;相比之下,具备全保偏光纤结构且低噪声特性的NALM腔锁模原理不但可自启动,而且鲁棒性好,为追求高长期稳定性的光纤光学频率梳提供了更为理想的种子源^[17,18].

基于全保偏“9”字形NALM反射环锁模的光纤光梳系统(9-NALM)是德国Menlo Systems公司在2012年首先提出并实现的^[19],这种“9”字形结构是基于典型的“8”字形NALM锁模技术研发而来^[20],具有结构紧凑、自启动、内禀相位噪声小、鲁棒性强等特点.近年来,“9”字形光纤光梳是低噪声光纤光梳的首选构型,对其研究热点集中在抑制相位噪声、压窄线宽和提高稳定性上,通过抑制泵浦激光电流噪声、控制飞秒激光色散、快速制动器反馈控制等方法相位噪声和线宽都已经有很大提升^[21-24],已经能满足大部分的时频研究需求.在长时间稳定性方面,虽然在工程优化及温度慢漂控制方面也做了很多工作^[25,26],但仍存在进步空间.

本文介绍了一种长期稳定性极高的低噪声全

保偏9-NALM型铷光纤频率梳系统,该系统基于我们自建的9-NALM铷光纤锁模激光器,该锁模激光器输出飞秒脉冲的重复频率为100 MHz,平均功率为290 mW,脉冲宽度67 fs.为了实现光梳锁定到1064 nm连续激光上,在振荡器腔内加入了电光调制器,作为快速相位调制器件,结合压电换能器的腔长慢调机理,将光学频率梳的一根梳齿和1064 nm连续激光器的拍频频率(f_{beat})锁定.采用共线f-2f测量到大于35 dB的载波包络偏移频率(carrier-envelope offset, f_{ceo}),通过调制泵浦电流实现了长期锁定.在加入双层封装和精密温控设计后,实现了连续96 h的锁定过程,采用1 s计数门时间测量 f_{ceo} 信号和 f_{beat} 的频率,对应1 s的Allan偏差分别达到 5.24×10^{-17} 和 1.73×10^{-18} ,尤其是 f_{beat} 的万秒频率相对稳定度进入 10^{-21} 量级,表现出优异的长期环内相对频率稳定性.

2 实验装置

本文的9-NALM铷光纤光梳系统有光路和电路锁定两部分,其中光路结构如图1所示,核心是

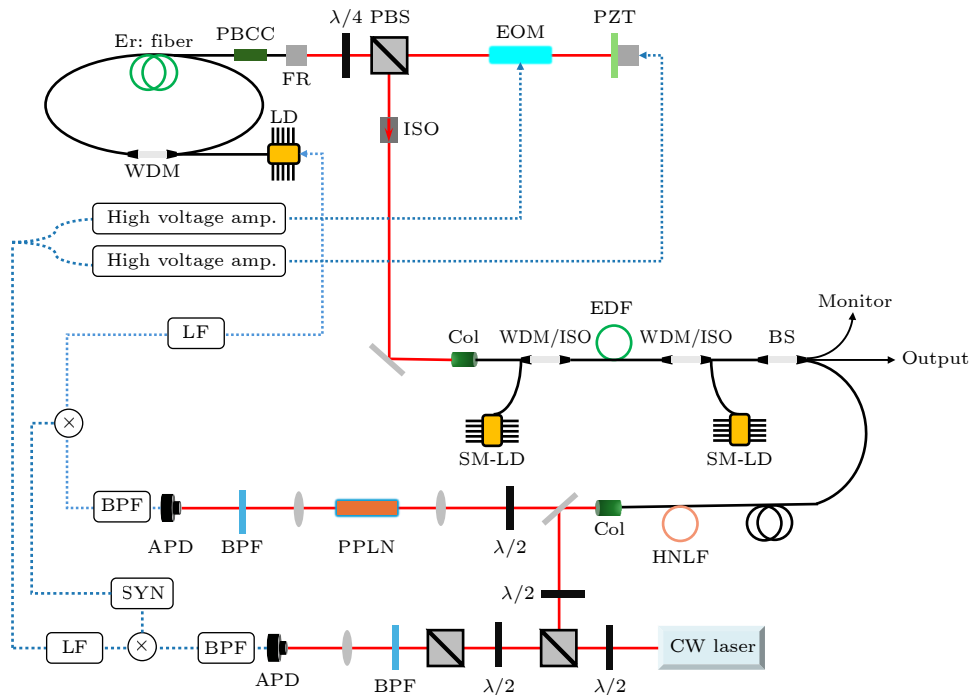


图1 掺Er光纤频率梳系统结构示意图. FR为法拉第旋光器,LD为激光二极管,WDM为波分复用器,ISO为隔离器,PBS为偏振分束棱镜,BS为光纤分束器,BPF为滤波器,APD为雪崩光电二极管,SYN为频率综合器,LF为环路滤波器

Fig. 1. Schematic of the Erbium-doped fiber optical frequency comb system. FR represents faraday rotator; LD represents laser diode; WDM represents wavelength-division multiplexer; ISO represents isolator; PBS represents polarization beam splitter; BS represents beam splitter; BPF represents bandpass filter; APD represents avalanche photodiode; SYN represents frequency synthesizer; LF represents loop filter.

9-NALM 锁模的铷光纤飞秒振荡器, 其由光纤环路和空间直线臂两部分构成. 光纤环路包含 80 cm 的掺铷增益光纤 (nLight Er80-4/125) 和 90 cm 的保偏单模光纤 (PM1550), 通过调节两种光纤的长度以优化腔内的净色散特性. 环路内设置有光纤偏振合束器 (polarization beam combiner, PBC), 用于将两个正交偏振态的光信号合束并准直输出至空间臂. 空间臂由非互易性移相器、偏振分束棱镜 (polarization beam splitter, PBS)、电光晶体以及端镜组成, 其中由法拉第旋光器 (Faraday rotator, FR) 和 $\lambda/4$ 波片构成的非互易性移相器提供线性相移, 从而提升锁模态的自启动性能. 端镜安装在电动平移台上, 可以进行重复频率的粗调, 调节范围超过 2 MHz, 有效满足系统频率调节需求. 受限于 PZT 伺服系统的响应带宽, PZT 对系统频率的调节带宽通常为数十 kHz, 因此我们在系统中插入铌酸锂电光晶体作为快速制动器抑制高频噪声, 配合 PZT 将光纤光梳的伺服锁定带宽提高到百 kHz 以上.

本实验中, 采用双向泵浦激光二极管 (laser diode, LD) 进一步放大振荡器的输出. 每个泵浦 LD 的最大功率均为 1 W, 增益光纤与振荡器中的光纤类型相同, 光纤长度经过优化设计确定为 1.8 m, 以实现最佳增益. 放大器输出经过一段保偏光纤进行脉宽压缩, 最终获得 290 mW 的输出功率和 67 fs 的脉冲宽度. 该放大脉冲被分为 3 路: 5% 用于实时监测, 5% 用于其他后续应用, 剩余 90% 注入一段 90 cm 的保偏高非线性光纤 (PM-HNLF). 在此过程中, 生成了波长范围覆盖约 1100—2400 nm 的倍频程超连续谱 (supercontinuum, SC). 所用高非线性光纤在 1550 nm 处的非线性系数为 $10.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 且具有接近零的反常色散和极小的色散斜率 (约 $0.025 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$), 这使得在 HNLF 之后仅需较短的单模光纤 (single mode fiber, SMF) 来补偿时间延迟. 最终, 超连续光通过光纤准直器输出至空间中, 进入后续的 $f-2f$ 自参考光路以及与连续波 (continuous wave, CW) 激光的拍频光路.

电学部分的功能是通过比较探测获得的光学信号与参考频率, 实现对激光器载波包络偏频信号 (f_{ceo}) 和拍频信号 (f_{beat}) 的锁定. 具体而言, 雪崩光电二极管 (avalanche photon diode, APD) 输出的信号经过低通滤波器处理后, 与信号发生器产生的参考信号进行鉴相, 产生鉴相信号. 该鉴相信号

随后被送入伺服系统, 伺服系统将其反馈到激光器的泵浦 LD 调制接口, 以及电光调制器和压电陶瓷, 以实现将 f_{ceo} 和 f_{beat} 精确锁定到参考频率上.

3 NALM 锁模铷光纤飞秒振荡器

我们的 9-NALM 铷光纤飞秒振荡器最高输出功率可达 65 mW, 但由于泵浦功率会显著影响超连续谱的形态, 进而影响载波包络偏频频率 f_{ceo} 和拍频信号的稳定性, 因此在实际应用中, 通常会在达到自启动阈值后适当调低泵浦功率. 如图 2(a) 所示, 输出光谱的中心波长约为 1575 nm, 在 1 nm 分辨率下光谱的半高全宽约 60 nm. 光谱中出现的凹陷是全保偏“9”字形光纤激光器中常见的特征, 由光纤偏振合束器端口处反向传播脉冲干涉效应引起^[27]. 输出光谱对应的傅里叶变换极限脉宽约为 43 fs. 根据 Paschotta 等^[28] 的报道, f_{ceo} 线宽与脉冲宽度成正比关系, 较短的脉冲宽度有助于有效降低光学频率梳的固有噪声. 图 2(b) 展示了光纤激光器的射频频谱, 重复频率为 100 MHz. 在 500 kHz 的分辨率带宽下, 重复频率信号的信噪比达到 80 dB. 在 0—1 GHz 的频谱范围内, 重复频率及其谐波信号均表现出极高的纯净度, 未见明显调制痕迹. 图 2(c) 为示波器测得的脉冲序列, 脉冲间隔及幅度均保持稳定.

飞秒锁模振荡器是光纤光梳的核心, 其性能直接影响整个光梳系统性能. 为了实现长期稳定和高环境抗干扰能力的光学频率梳, 对振荡器的封装进行工程化设计, 从密封、隔振、隔音、绝热等方面做了大量措施. 首先, 振荡器腔体机械结构采用一体化双层金属套叠结构设计, 以提升核心振荡器的抗干扰性能; 所有光学元件均不用立柱直接安装在底板上, 过高器件采用底板挖槽安装方式以降低光路高度; 为了保证密封性能, 所有电线和光路的传输均采用转接接口, 机械外壳打孔和盖板的密封都采用橡胶圈隔绝空气.

从工程角度来看, 温度变化是影响光频慢漂和长漂的最关键因素, 因此为了实现光纤光梳频率信号的长时间稳定, 我们在核心振荡器的控温方面进行相应的设计和测量. 一般激光器的控温采用水冷或热电冷却 (thermoelectric cooler, TEC) 两种方式, 风冷会引起空气流动, 并不会被采用. 考虑到我们的振荡器发热量不大, 主要是要隔绝和外界的

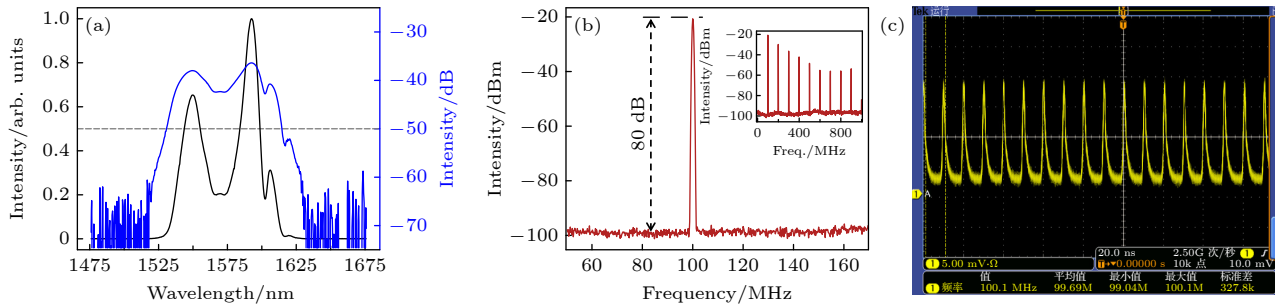


图2 掺Er光纤振荡器输出结果 (a) 振荡器输出光谱, 线性坐标(黑色)与对数坐标(蓝色); (b) 振荡器重频信号频谱图, 插图为重频基频及高次谐波频谱图; (c) 示波器显示振荡器输出稳定脉冲序列

Fig. 2. Output characteristics of the Erbium-doped fiber oscillator: (a) Output spectrum of the oscillator in linear (black) and logarithmic (blue) scales; (b) RF spectrum of the oscillator's repetition rate signal, with the inset showing the fundamental and higher-order harmonics; (c) stable pulse train from the oscillator displayed on an oscilloscope.

热量交换, 不要因外界温度变化引起激光器温度变化, 因此采用TEC控温, 热量由金属传导和空气辐射的方式带走. 在振荡器底板下方并联安装了4块TEC, 采用精密温控器将误差控制在 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内^[29], 在腔体的一端安装了热敏电阻进行温度监控并在另一端安装TEC控制器进行温度闭环控制. 在激光器开机工作时, 通过红外测温仪观测腔体温度分布显示整体温度均匀且稳定. 这种精确且均匀的温度控制有效抑制了因温度波动导致的频率漂移, 为振荡器的频率长期稳定性控制提供了保障.

在稳定控温情况下, 对振荡器的功率稳定性进行24 h测量, 具体功率抖动数据如图3(a)所示, 功率抖动RMS相较于未进行温控从0.4%降低至0.1%. 图3(b)展示了振荡器封装前后重复频率的相位噪声功率谱密度. 封装后, 积分相位噪声从封装前的 366.4 mrad (1 Hz—1 MHz)显著降低至 1.17 mrad (1 Hz—1 MHz). 与封装前相比, 10 Hz以下的低频噪声得到了明显抑制, 在1 Hz处, 封装后的相位噪声达到约 -60 dBc/Hz , 且在100 kHz频率处低于 -120 dBc/Hz . 图3(c)展示了激光器自由运转时重复频率的漂移情况, 可以看到, 通过对振荡器温度的精确控制, 其在一天内的总频率漂移被限制在百Hz量级. 这些都为后面实现长期电路主动反馈控制打下了良好基础.

4 CEO信号的测量与锁定

在振荡器的基础上, 搭建了共线型 $f-2f$ 自参考干涉仪, 将超连续谱中的2106 nm通过掺杂氧化镁的周期极化铌酸锂晶体(MgO:PPLN)实现倍频, 与基频1053 nm进行了相干外差拍频获得了

f_{ceo} 信号. 这里所用的PPLN晶体为多周期结构, 通光尺寸为 $12.3\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ ($W\times T$), 晶体两端面均镀有覆盖960—1150 nm和1925—2300 nm的增透膜, 借助该结构, 来源于SC中两种频率成分的1053 nm成分发生干涉, 并由光电探测器探测 f_{ceo} 信号, 其频谱在300 kHz分辨率带宽下信噪比达到35 dB, 如图4(a)所示. f_{ceo} 信号(20 MHz)通过鉴相器与参考微波源(E4428C, Agilent)输出的20 MHz进行比对, 得到的误差信号反馈给振荡器LD泵浦源电流锁定. 经过仔细调节锁相环电路的PID参数设置实现了 f_{ceo} 信号锁定, 采用频率计数器(53132A, Agilent)对 f_{ceo} 进行记录, 采样时间为1 s. 图4(b)显示了 f_{ceo} 的锁定情况, 频率计数器记录10 h计算出标准偏差低于9.5 mHz. 图4(d)为计算的修正Allan偏差, 在1 s时相对参考频率的环内频率稳定性为 5.24×10^{-17} , 在1000 s为 8.63×10^{-19} . 测量了 f_{ceo} 的积分相位噪声, 频率范围覆盖1 Hz—1 MHz, 积分相位噪声为 420.82 mrad , 如图4(c)所示, 其中数百Hz频率处出现的尖峰可能与电信号噪声或实验室其他设备运行时对光梳产生的干扰相关.

5 将光梳频率锁定到1064 nm连续激光上

光学频率梳可以通过两种方式实现锁定: 一种是锁定到光学频率上, 另一种是锁定到微波频率上. 在上述两种锁定方法下, 光梳梳齿频率不稳定性分别可达 10^{-18} (光学参考)和 10^{-13} (微波参考)^[30]. 这里将光学频率梳和一台连续激光器相干外差拍频获得拍频信号 f_{beat} , 然后再将 f_{ceo} 信号和 f_{beat} 信

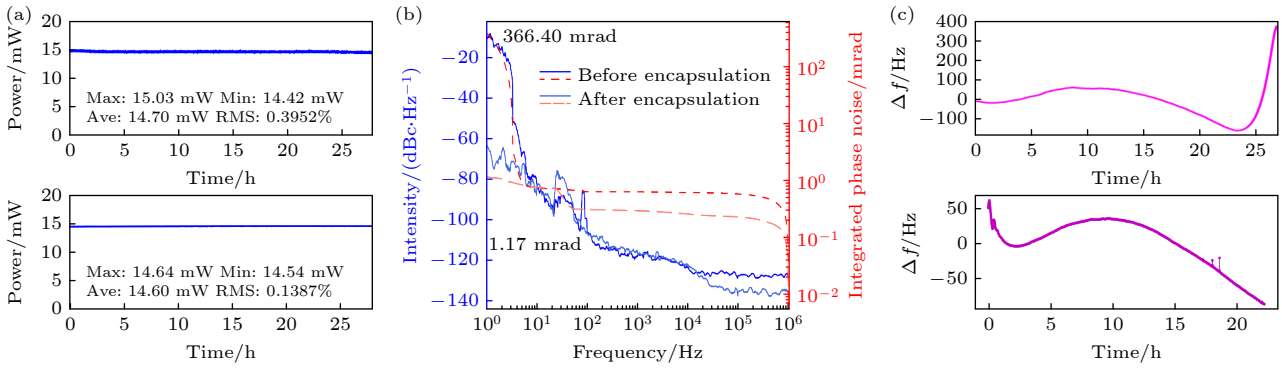


图 3 振荡器输出稳定性测试 (a) 封装加温控前(上)后(下)振荡器长时间输出功率曲线; (b) 封装前(粗线)后(细线)的积分相位噪声对比; (c) 加温控前(上)后(下), 重复频率在自由运转时的漂移
 Fig. 3. Stability tests of the oscillator output: (a) Long-term output power curves of the oscillator before (top) and after (bottom) packaging with temperature control; (b) comparison of the integrated phase noise before (thick line) and after (thin line) packaging; (c) drift of the free-running repetition frequency before (top) and after (bottom) the implementation of temperature control.

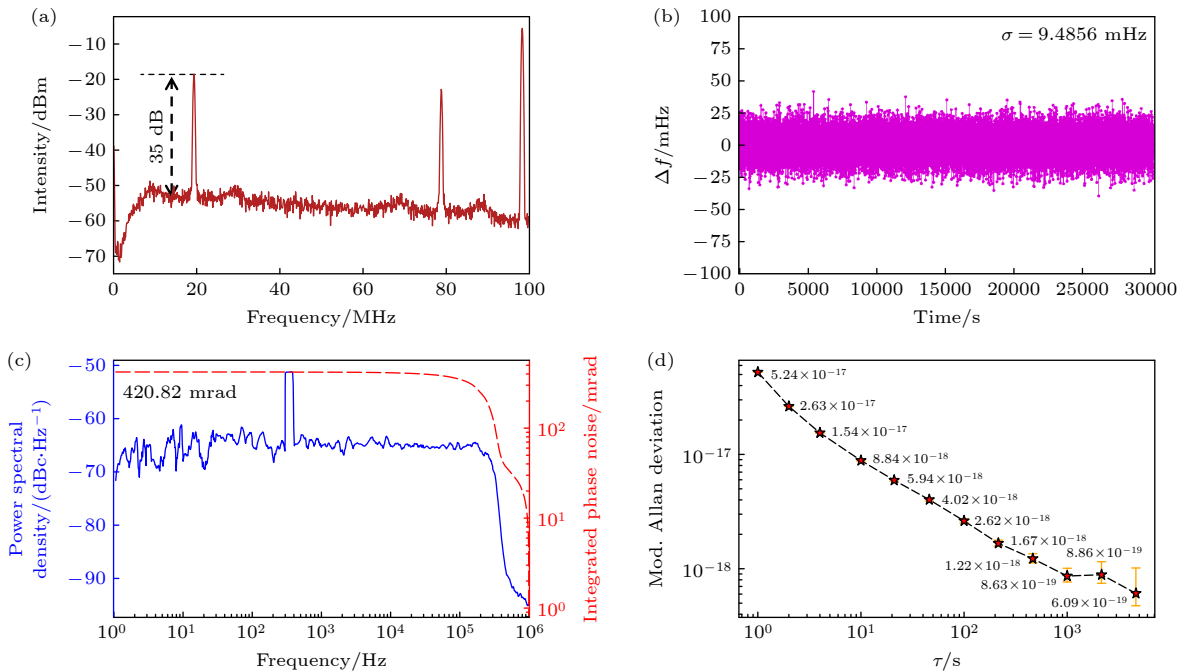


图 4 f_{ceo} 锁定结果 (a) f_{ceo} 信号频谱图, 在 300 kHz 分辨率带宽下信噪比达到 35 dB; (b) 频率计数测量锁定后 f_{ceo} 信号与中心频率之间的偏差; (c) f_{ceo} 信号积分相位噪声 (1 Hz—1 MHz); (d) f_{ceo} 信号的 Allan 偏差
 Fig. 4. Locking results of the f_{ceo} : (a) RF spectrum of the f_{ceo} signal, showing a signal-to-noise ratio (SNR) of 35 dB at a resolution bandwidth (RBW) of 300 kHz; (b) deviation of the locked f_{ceo} signal from its set center frequency, measured by a frequency counter; (c) integrated phase noise of the f_{ceo} signal (from 1 Hz to 1 MHz); (d) Allan deviation of the f_{ceo} signal.

号通过电子锁相环系统 (menlo systems) 进行主动反馈控制抑制噪声.

首先, 提取超连续光谱中的 1064 nm 成分与一台碘稳 Nd:YAG 激光器的 1064 nm 输出分别经过一个半波片, 用于调整激光的偏振态. 接着, 使用 PBS 将两路光束相干重合. 之后, 系统中再插入一个 1064 nm 半波片和 PBS, 经过 BPF, 光信号进入 APD, 将拍频信号转换为电信号. 对于光学频率梳与 1064 nm 连续激光器之间的拍频信号 f_{beat} ,

将其与频率综合器产生的参考信号进行鉴相, 经过 PID 控制器处理后通过分为两路输出, 分别经过高压放大器驱动振荡器腔内的电光调制器 EOM 和 PZT. 其中, EOM 具有 MHz 量级的反馈带宽, 可以有效抑制拍频信号锁定过程中的高频噪声, 因此被用于快环锁定. PZT 的响应带宽比较低, 但是其控制行程比较大, 可以抑制信号的长期漂移. EOM 用于锁定是基于铌酸锂晶体的电光效应来实现的, 通过对晶体施加一定电压, 改变晶体

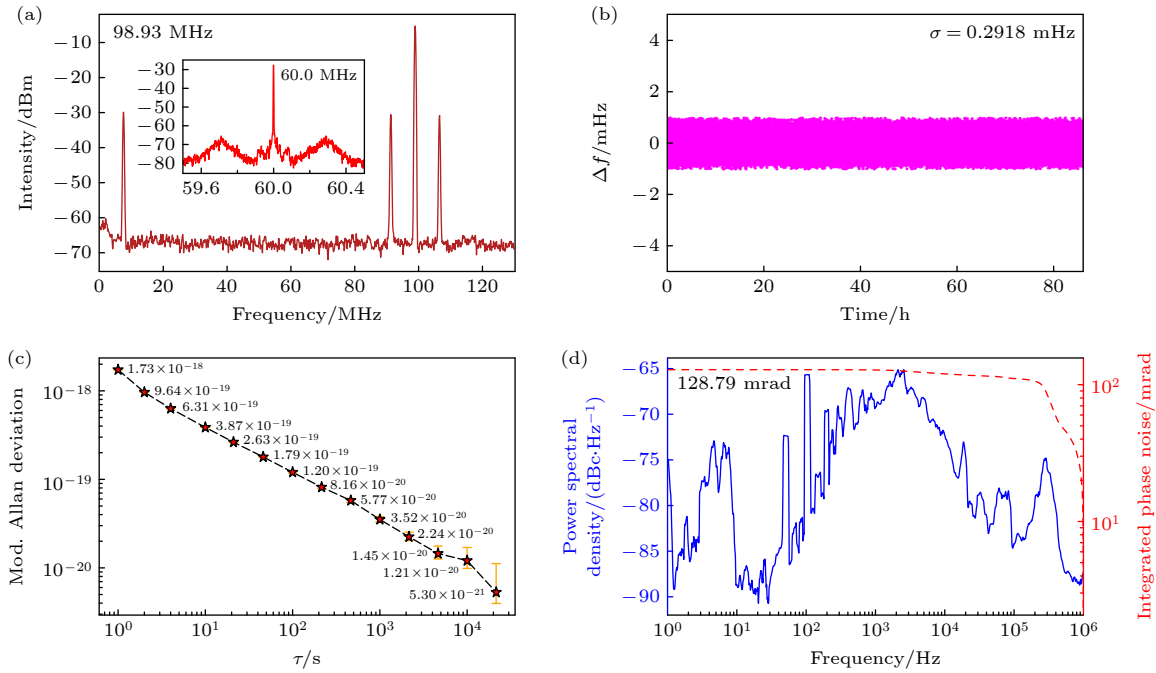


图 5 f_{beat} 锁定结果 (a) f_{beat} 信号频谱图 (RBW = 300 kHz), 插图为锁定后的频谱图 (RBW = 2 kHz); (b) 频率计数器测量锁定后 f_{beat} 信号与中心频率 (60 MHz) 之间的偏差; (c) f_{beat} 信号 Allan 偏差; (d) f_{beat} 信号噪声功率谱密度曲线及积分相位噪声 (1 Hz—1 MHz)

Fig. 5. Locking results of the f_{beat} : (a) RF spectrum of the f_{beat} signal (RBW = 300 kHz), with the inset showing the spectrum after locking (RBW = 2 kHz); (b) deviation of the locked f_{beat} signal from its set center frequency (60 MHz), measured by a frequency counter; (c) Allan deviation of the f_{beat} signal; (d) noise power spectral density (PSD) of the f_{beat} signal and its integrated phase noise (from 1 Hz to 1 MHz).

的折射率, 进而对重复频率进行一定的调节^[31]. 实验中 Mg:LN 晶体为 y -cut, 通光截面为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 镀有 1500—1600 nm 增透膜, 通光长度为 7 mm, 两个 z 面镀金用于施加电压, 采用最大 80 V 放大电路 (IMRA, HVA) 对 LN 晶体施加电压. 图 5(a) 为 f_{beat} 信号频谱图, 其中插图为锁定后的结果, 根据锁定后频谱出现的锁频边带, 可以得到 EOM 的锁定带宽约 300 kHz. 图 5(b) 给出了 f_{beat} 的锁定结果, 计数器门时间为 1 s, 连续锁定时间 4 d, 标准偏差为 0.29 mHz. 图 5(c) 为对应的修正 Allan 偏差. 当积分时间为 1 s, 1000 s, 10000 s, 20000 s 时, f_{beat} 的 Allan 偏差分别为 1.73×10^{-18} , 3.52×10^{-20} , 1.21×10^{-20} , 5.30×10^{-21} . 如图 5(d) 所示, 相位噪声在 1 Hz 时为 -75 dBc/Hz, 在 1 MHz 降至约 -90 dBc/Hz, 从 1 Hz—1 MHz 的积分相位噪声为 129 mrad.

6 结 论

本文详细介绍了一台自主研制的高稳定度全保偏自启动 9-NALM 型钕光纤光学频率梳系统. 该

系统基于自建的重复频率为 100 MHz 的 9-NALM 型掺钕光纤飞秒激光振荡器, 通过两级放大、高非线性光纤倍频程光谱扩展以及共线 f - $2f$ 自参考测量装置得到了 f_{ceo} 信号, 并通过与 1064 nm 连续激光拍频获得了 f_{beat} 信号. 采用锁相环电路反馈系统分别实现了 f_{ceo} 和 f_{beat} 信号的锁定, 锁定后 f_{ceo} 的不稳定性为 5.24×10^{-17} @1 s, f_{beat} 拍频环内相对频率稳定性 1.73×10^{-18} @1 s, 在 20000 s 时进一步提升至 5.30×10^{-21} . 据我们所知, 这是目前在钕光纤光梳系统中测量到的最好的长期稳定度, 进一步提高输出功率后将可作为理想的高稳定光梳系统开展实际场景的应用实验.

参 考 文 献

- [1] Reichert J, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59
- [2] Baltuška A, Udem T, Uiberacker M, Hentschel M, Goulielmakis E, Gohle C, Holzwarth R, Yakovlev V S, Scrinzi A, Hänsch T W, Krausz F 2003 *Nature* **421** 611
- [3] Fortier T M, Roos P A, Jones D J, Cundiff S T, Bhat R D R, Sipe J E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 147403
- [4] Hänsch T W 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297
- [5] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V 2007 *Nature* **445** 627

- [6] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, Sizmman A, Pasquini L, Araujo-Hauck C, Dekker H, D'Odorico S, Fischer M, Hänsch T W, Manescau A 2007 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **380** 839
- [7] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, et al. 2008 *Science* **319** 1808
- [8] Rickly P, Stevens P S 2018 *Atmos. Meas. Tech.* **11** 1
- [9] Shao X D, Han H N, Yan Y, Ma J Y, Li C Z, Wei Z Y 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 171103
- [10] Foltynowicz A, Masłowski P, Ban T, Adler F, Cossel K C, Briles T C, Ye J 2011 *Faraday Discuss.* **150** 23
- [11] Fortier T, Baumann E 2020 *Commun. Phys.* **3** 85
- [12] Pupeza I, Zhang C K, Högnér M, Ye J 2021 *Nat. Photonics* **15** 175
- [13] Agostini P, DiMauro L F 2004 *Rep. Prog. Phys.* **67** 1563
- [14] Haus H A 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 3049
- [15] Peng J, Sorokina M, Sugavanam S, Tarasov N, Churkin D V, Turitsyn S K, Zeng H 2018 *Commun. Phys.* **1** 20
- [16] Aguergaray C, Broderick N G R, Erkintalo M, Chen J S Y, Kruglov V 2012 *Opt. Express* **20** 10545
- [17] Lu S Y, Hao Q, Liu T T, Chen F, Ren X Y, Shen X L, Yan M, Zeng H P 2021 *Chin. J. Laser* **48** 2101002 (in Chinese) [陆诗雨, 郝强, 刘婷婷, 陈飞, 任心仪, 沈旭玲, 闫明, 曾和平 2021 *中国激光* **48** 2101002]
- [18] Li M K, Yang X G, Rao B J, Yan L L, Chen X, Yuan R, Zhang P, Zhang Y Y, Liu T 2023 *Front. Phys.* **11** 1044842
- [19] Hänsel W, Holzwarth R, Doubek R, Mei M 2012 *Environ. Pollut.* **2637265** A1
- [20] Nicholson J W, Andrejco M 2006 *Opt. Express* **14** 8160
- [21] Raabe N, Feng T, Mero M, Tian H C, Song Y J, Hänsel W, Holzwarth R, Sell A, Zach A, Steinmeyer G 2017 *Opt. Lett.* **42** 1068
- [22] Hänsel W, Hoogland H, Giunta M, Schmid S, Steinmetz T, Doubek R, Mayer P, Dobner S, Cleff C, Fischer M, Holzwarth R 2017 *Appl. Phys. B* **123** 41
- [23] Cao X R, Zhou J Q, Cheng Z, Li S, Feng Y 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2370053
- [24] Li S, Zhou J Q, Cao X R, Cheng Z, Li X, Feng Y 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 2923
- [25] Kim Y, Kim S, Kim Y J, Hussein H, Kim S W 2009 *Opt. Express* **17** 11972
- [26] Kitajima S, Jung K, Nishizawa N 2024 *Sci. Rep.* **14** 7108
- [27] Shi J K, Dong D F, Pan Y L, Li G N, Li Y, Liu L T, Chen X M, Zhou W H 2021 *Chin. Phys. B* **30** 014206
- [28] Paschotta R, Schlatter A, Zeller S C, Telle H R, Keller U 2006 *Appl. Phys. B* **82** 265
- [29] Zhao D L, Tan G 2014 *Appl. Therm. Eng.* **66** 15
- [30] Pang L H, Han H N, Zhao Z B, Liu W J, Wei Z Y 2016 *Opt. Express* **24** 28993
- [31] Cao S Y, Lin B K, Yuan X D, Ding Y J, Meng F, Fang Z J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 074203 (in Chinese) [曹士英, 林百科, 袁小迪, 丁永今, 孟飞, 方占军 2021 *物理学报* **70** 074203]

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT • COVER ARTICLE

Ultra-stable erbium-doped fiber optical frequency comb with relative frequency stability on the order of 10^{-21} within 10000-second timescale*

MA Junyi^{1)2)#} SHAO Xiaodong^{1)2)#} LIU Sicong³⁾ LIU Jinjie³⁾
 LUO Yuanqiang³⁾ LI Chengzhi¹⁾²⁾ HAN Hainian^{1)3)4)†} WEI Zhiyi^{1)2)3)‡}

1) (Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

4) (Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

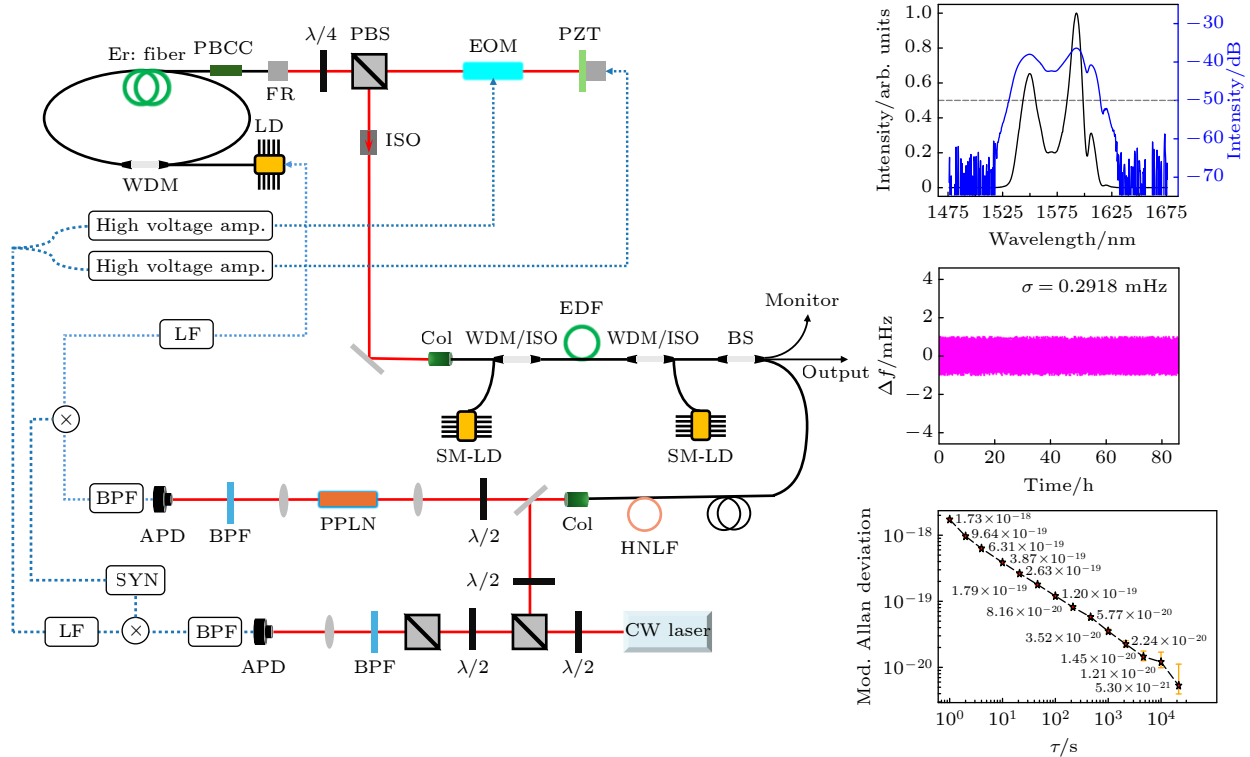
(Received 16 November 2025; revised manuscript received 15 December 2025)

Abstract

High frequency stability and low phase noise are two critical metrics for evaluating the performance of optical frequency combs. Highly stable femtosecond optical frequency combs play a significant role in frontier fields such as precision measurement physics, spectroscopy, optical clocks, and attosecond science. In recent years, the figure-9 fiber cavity configuration has emerged as the preferred design for low-noise fiber-based frequency combs. Research efforts have focused on suppressing phase noise, narrowing linewidth, and improving overall stability. Significant progress in reducing phase noise and linewidth has been achieved through

techniques including the suppression of pump laser current noise, control of femtosecond laser dispersion, and feedback control by using fast actuators, meeting the requirements for most time-frequency applications. Regarding long-term stability, although considerable engineering optimizations and temperature drift control measures have been implemented, there is still room for further improvement.

On this basis, this paper proposes a highly stable erbium-doped fiber optical frequency comb with long-term stability of 10^{-21} level which is implemented based on a nonlinear amplification loop mirror mode-locking technique. A self-built 100 MHz repetition rate (f_r) erbium (Er) doped fiber femtosecond laser outputs 290 mW, 67 fs pulses. A carrier-envelope offset (f_{ceo}) signal with a signal-to-noise ratio of approximately 35 dB is detected using a collinear f-2f self-referencing technique. Both f_{ceo} and the beat note signal with a continuous-wave laser are simultaneously locked to a microwave reference by using phase-locked loops that control a fast intra-cavity electro-optic modulator, a piezoelectric transducer, and the pump current. Once locked, the phase noise of f_{ceo} is 421 mrad, with in-loop relative frequency stability of 5.24×10^{-17} at 1 s. The beat note exhibits a phase noise of 129 mrad and in-loop relative frequency stability of 1.73×10^{-18} at 1 s, which further improves to 5.30×10^{-21} at 20000 s. This high-stability, low-noise fiber comb system provides an ideal tool for studying high-precision optical clocks, optical frequency comparisons, and time-frequency transfer.



Keywords: erbium-doped fiber femtosecond laser, nonlinear amplifying loop mirror mode-locked, high stability fiber optical frequency comb

DOI: 10.7498/aps.75.20251560

CSTR: 32037.14.aps.75.20251560

* Project supported by the Innovation for Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Program (Grant No. 2021ZD0300904), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62435013, 62305373), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB4601100).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: hnhan@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn



万秒环内相对频率稳定度达 10^{-21} 量级的掺铒光纤光学频率梳

马骏逸 邵晓东 刘思聪 刘巾杰 罗远强 李呈志 韩海年 魏志义

Ultra-stable erbium-doped fiber optical frequency comb with relative frequency stability on the order of 10^{-21} within 10000-second timescale

MA Junyi SHAO Xiaodong LIU Sicong LIU Jinjie LUO Yuanqiang LI Chengzhi HAN Hainian WEI Zhiyi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 070402 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251560

CSTR: 32037.14.aps.75.20251560

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251560>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于光腔衰荡光谱测量的多支路掺铒光纤飞秒光梳系统

Multi-branch erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb for measurement of cavity ring-down spectroscopy
物理学报. 2022, 71(8): 084203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212162>

正常色散高非线性石英光纤优化设计及平坦光频率梳产生

Design of normal dispersion high nonlinear silica fiber and generation of flat optical frequency comb
物理学报. 2022, 71(23): 234209 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221115>

GHz重复频率亚百飞秒克尔透镜锁模Yb:CaYAlO₄激光器

Sub-100 fs Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:CaYAlO₄ laser with GHz repetition rate
物理学报. 2023, 72(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222297>

基于直调激光器和全光锁模产生微波频率梳

Generation of microwave frequency combs based on directly modulated laser and all-optical mode-locking
物理学报. 2026, 75(2): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251232>

百兆赫兹重频的轨道角动量模式飞秒光纤激光器

Orbital angular momentum mode femtosecond fiber laser with over 100 MHz repetition rate
物理学报. 2024, 73(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231085>

基于锁模光学频率梳的高速数据传输

High-speed data transmission based on mode-locked optical frequency comb
物理学报. 2024, 73(4): 044204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231384>