

全保偏光频梳系统的研制与噪声特性优化*

宗玉瑶^{1)2)3)#} 韩羿^{1)2)#} 刘佳伟¹⁾²⁾ 曹士英^{1)2)†}

1) (中国计量科学研究院, 时间频率计量科学研究所, 北京 100029)

2) (中国计量科学研究院, 国家市场监管重点实验室(时间频率与重力计量基准), 北京 100029)

3) (中国计量大学信息工程学院, 杭州 310018)

(2025年11月10日收到; 2025年12月22日收到修改稿)

光学频率梳是光钟频率传递的核心技术, 其噪声特性决定频率测量精度. 载波包络偏移频率 (f_{ceo}) 线宽是光梳噪声特性的关键表征, 因此通过噪声抑制实现 f_{ceo} 线宽压缩优化是该领域重要研究目标. 本文基于色散管理技术搭建了保偏9字腔锁模激光器 (F9L), 重复频率 197.8—200.65 MHz 连续可调. 与先前实验搭建的重复频率相同的非线性偏振旋转 (NPR) 锁模激光器的相位噪声进行对比, 以探究不同锁模机制对激光器噪声的影响. 实验结果表明, 在 1 Hz—1 MHz 积分范围内, F9L 表现出更优的相位噪声性能. 在 F9L 的基础上构建全保偏光学频率梳系统, 采用共线型 $f/2f$ 干涉仪成功获得 47 dB 信噪比的 f_{ceo} 信号. 测量 NPR 和 F9L 两种锁模机制下自由运转的 f_{ceo} 线宽分别为 221.5 kHz 和 11.4 kHz. 此外, 探究了泵浦电流噪声和 F9L 腔内波片角度对 f_{ceo} 线宽的影响, 经优化后自由运转下 f_{ceo} 线宽压缩至 6.6 kHz. 最后, 经两天连续锁定, 计算得重复频率和 f_{ceo} 频率偏差的标准差分别为 0.374 mHz 和 0.263 mHz.

关键词: 激光器, 非线性光纤光学, 光学频率梳, 超快激光**DOI:** 10.7498/aps.75.20251553**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251553

1 引言

光学频率梳 (简称“光频梳”或“光梳”) 作为连接光频频率和射频频率的桥梁, 凭借其卓越的频率稳定特性, 可精确实现光学频率向射频的传递, 进而为时间频率计量提供可计数的标准信号^[1,2], 并实现不同光学波段频率标准之间的精密比对^[3]. 除计量领域外, 光梳还在精密光谱测量^[4,5]、频率计量^[6,7]、阿秒科学^[8], 以及激光雷达^[9] 等多个前沿研究领域展现出重要的应用价值. 近年来, 基于被动锁模激光器的光纤光频梳凭借着低噪声、高集成度、高时间频率精度和强抗扰动性得到广泛研究^[10-12], 成为精密计量领域最具应用潜力的技术方案之一.

为实现光梳系统频率精度的跃升与长期稳定锁定的目标, 亟须制定策略以优化载波包络偏移频率 (carrier-envelope offset frequency, f_{ceo}) 的产生, 核心在于探索并整合能有效提升 f_{ceo} 信号质量 (即获得窄线宽与高信噪比) 的关键技术路径. 激光器的噪声特性是决定光梳系统性能的关键参数, 对 f_{ceo} 信号的频谱线宽和信噪比等核心指标有着重要影响^[13,14]. f_{ceo} 频谱线宽与重复频率 (repetition rate frequency, f_r) 相位噪声存在以下关系^[15]:

$$\Delta\nu_{\text{ceo}} \propto (2\pi \cdot \nu_{\text{opt}} \tau_p)^2 \cdot \left[\int_0^\infty S_{\phi, \text{opt}, \text{ST}}(f) f^2 df + \left(\frac{\nu_{\text{opt}}}{f_r} \right)^2 \int_0^\infty S_{\phi, t}(f) f^2 df \right], \quad (1)$$

其中 $\Delta\nu_{\text{ceo}}$ 为 f_{ceo} 频谱线宽, ν_{opt} 为激光中心频率,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFF0603801) 和中国计量科学研究院科研基金 (批准号: AKYZD2411, AKYZD2511) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

τ_p 为脉冲半高全宽, $S_{\varphi, \text{opt, ST}}(f)$ 为肖洛-汤斯极限下的光学相位噪声, $S_{\varphi, t}(f)$ 为 f_r 的相位噪声功率谱密度. 方程 (1) 中等号右边第 1 项为肖洛-汤斯极限下的单个纵模的光学相位噪声; 第 2 项为 f_r 相位噪声通过时序抖动的耦合, 映射到光学频域后对光学相位噪声的贡献, 即 f_r 相位噪声越强, 时序抖动引入的光学相位噪声分量越大, 最终导致 f_{ceo} 线宽越宽.

一方面, 不同的锁模机制会使激光器表现出不同的噪声特性^[16]. 在被广泛应用的被动锁模技术中, 基于克尔效应的非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 和非线性放大环形镜 (nonlinear amplifying loop mirror, NALM) 凭借着瞬时响应特性, 相较于可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 锁模能够更有效地抑制 f_r 相位噪声^[17-19]. 然而在 NPR 锁模机制中, 脉冲整形依赖偏振态的演化, 使得该类激光器通常基于非保偏结构, 较大程度限制了环境稳定性. 基于 NALM 的 9 字腔激光器 (Figure-9 laser, F9L) 可实现全保偏光纤结构, 对于低频噪声的抑制展现出显著优势^[20,21]. 另一方面, 泵浦源电流噪声、锁模调制深度、腔内损耗等因素也均会对 f_r 相位噪声产生影响.

为系统研究不同锁模机制的噪声特性差异, 本文搭建了基于 F9L 的掺铒光纤激光器, 与先前实验所搭建的 NPR 结构激光器^[22,23] 进行相位噪声对比分析, 两激光器的重复频率均为 200 MHz. 后续采用 F9L 作为种子源开展全保偏光纤光梳系统的研制, 并由共线型 $f/2f$ 自参考系统获得了信噪比达 47 dB 的 f_{ceo} 信号. 在相同室温、泵浦电流下驱动同一个泵浦激光二极管 (laser diode, LD), 结果表明, F9L 相较于 NPR 有更好的噪声特性, 自由运转下 f_{ceo} 线宽小于 NPR 激光器一个数量级. 选用 Thorlabs 公司的 CLD1015 与 LDC8020 两款电流源进行对比实验, 以探究电流源噪声对 f_{ceo} 信号的影响. 结果显示, CLD1015 驱动下的 LD 直接输出的相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 显著低于 LDC8020. 进一步, 两种电流源驱动相同 F9L 激光器, 在 1 Hz—1 MHz 积分区间内 f_r 时间抖动分别为 18.5 ps (LDC8020) 与 7.7 ps (CLD1015). 将 F9L 的电流源更换为噪声更低的 CLD1015 后, 自由运转状态下的 f_{ceo} 线宽可进一步压窄至 6.6 kHz. 在此基础上, 探究了 F9L 腔内 1/8 波片角度对于传输曲线调制深度、 f_r 相位噪声和 f_{ceo} 线宽的影响.

经优化后, 将光频梳系统进行两天的连续锁定, f_r 与 f_{ceo} 频率偏差的标准差分别为 0.374 mHz 和 0.263 mHz.

2 种子源研制及对比

F9L 的原理图如图 1 所示, 选取一段长度为 415 mm 的保偏掺铒光纤 (EDF1, Liekki Er80-4/125-PM) 作为增益光纤. 将该增益光纤的一端与一个 980/1550 nm 的波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 的公共端口相连接, 另一端与一个尾纤长度为 85 mm 的准直器 (collimator, Col)1 连接. 在非对称位置放置的增益光纤为顺时针和逆时针两路脉冲光提供不同的非线性相移. 一个 980 nm LD 作为泵浦源与 WDM 反射端口相连接, 其最高输出功率为 960 mW. WDM 的信号端口与一个尾纤长度为 210 mm 的 Col2 连接. 腔内各光纤均采用全保偏结构, 此时计算得腔内净色散为 -940 fs^2 .

空间光部分中, Col1 和 Col2 输出的线偏光经 PBS1 合束后偏振态相互正交并沿共线传输. 在通过法拉第旋转器和 1/8 波片组成的相移器后, 两偏振态各向同一方向旋转 45° 并引入一个固定的线性相位差. 此后, 光束投影在 PBS2 的 p 和 s 方向上并发生干涉, 之后经过反射镜 (M1) 反射进入第 2 轮循环.

当泵浦功率逐步增至 25 mW 时, 激光器开始产生连续波 (CW) 激光输出. 在 25—624 mW 的泵浦功率范围内, 连续波输出功率随泵浦功率的增大而线性增大, 并在泵浦功率达到 624 mW 时, 激光器实现自启动锁模. 随后, 逐步降低泵浦功率, 在泵浦功率降低至 249 mW 时激光器失去锁模状态, 输出功率随泵浦功率的变化关系如图 2(a) 所示. 图 2(b) 为泵浦功率为 624 mW 时采用光纤光谱仪 (Yokogawa AQ6370 D) 测得的锁模光谱, 其中心波长位于 1567.5 nm, 光谱顶部有明显凹陷且强度波动较大, 以 10 dB 带宽表征光谱宽度为 104.4 nm. 通过微调位移平台改变光程长度, 在维持锁模状态的前提下, 实现了重复频率在 197.8—200.65 MHz 范围内的连续调谐. 如图 2(c) 所示, 在此调谐范围内, 锁模光谱未发生显著变化.

为探究激光器锁模机制对于噪声性能的影响, 将本研究中搭建的 F9L 与此前研究中搭建的

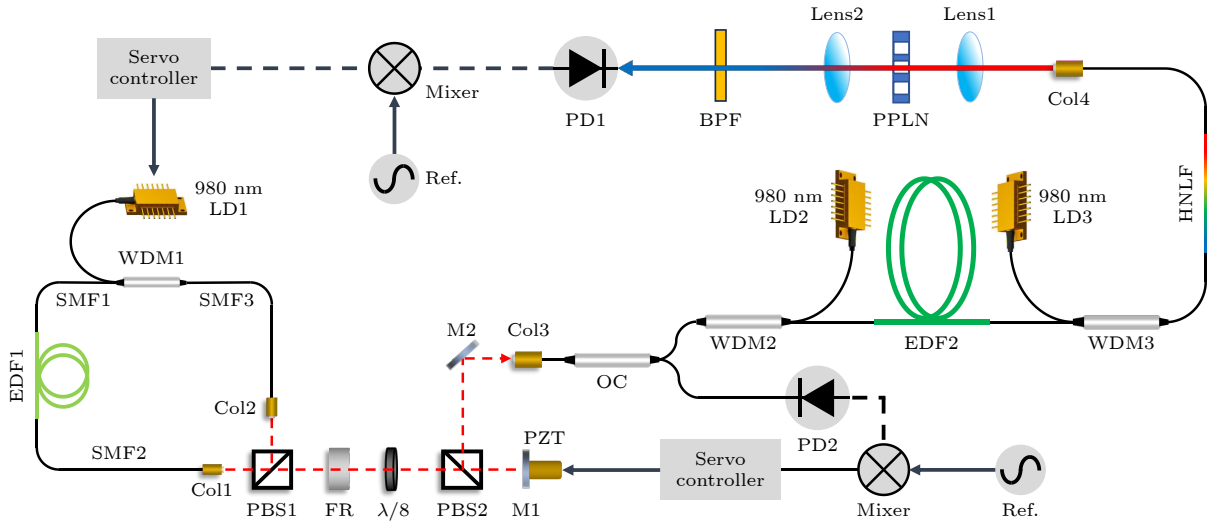


图 1 基于掺铒光纤激光器的光学频率梳, 其中, LD 为 980 nm 泵浦源, WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器件, Col 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片, FR 为法拉第旋光器, ISO 为空间隔离器, $\lambda/8$ 为 1/8 波片, M 为反射镜, OC 为光纤耦合器, HNLF 为高非线性光纤, BPF 为带通滤波片, Ref. 为参考信号, PD 为光电探测器, PZT 为压电陶瓷, PPLN 为周期性极化铌酸锂晶体

Fig. 1. Optical frequency comb based on erbium-doped fiber laser. LD is 980 nm laser diode, WDM is 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexing, Col is collimator, PBS is polarization beam splitter, FR is Faraday rotator, ISO is isolator, $\lambda/8$ is 1/8 waveplate, M is reflecting mirror, OC is optical coupler, HNLF is high nonlinear fiber, BPF is band-pass filter, Ref. is reference frequency, PD is photodetector, PZT is periodically poled lithium niobate, PPLN is periodically poled lithium niobate.

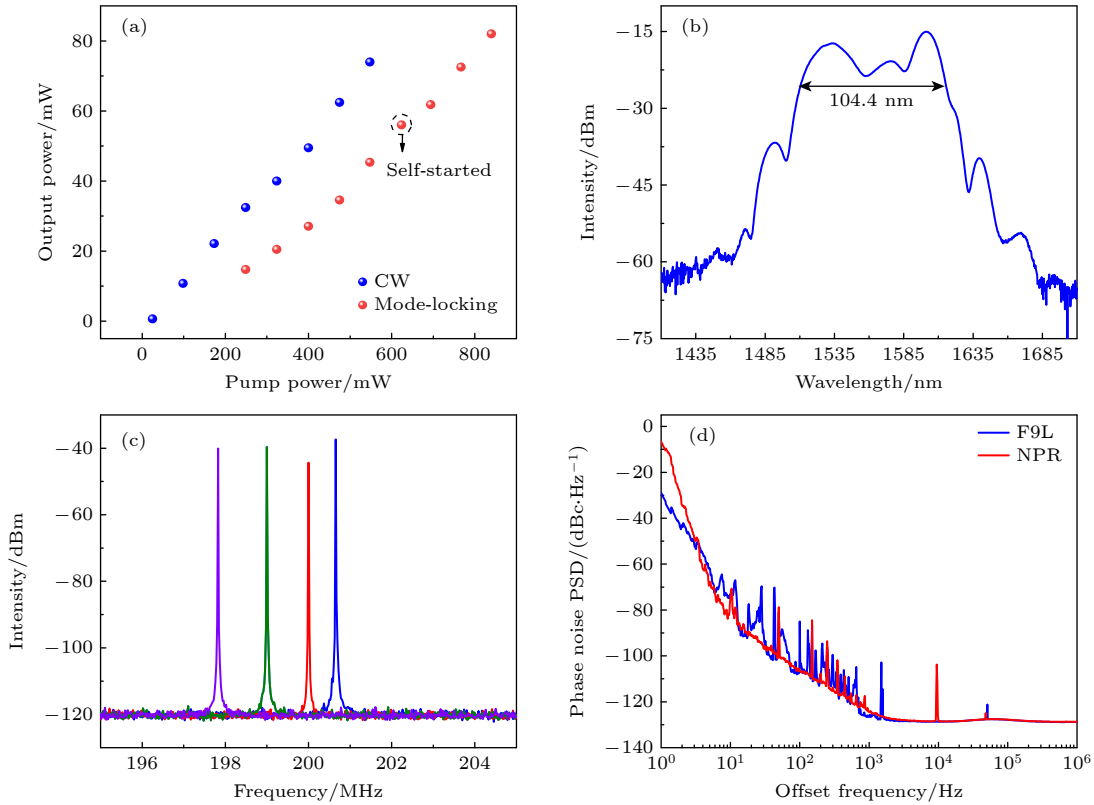


图 2 (a) 输出功率随泵浦功率变化关系; (b) 泵浦功率为 624 mW 时的锁模光谱; (c) 重复频率在 197.8—200.65 MHz 范围内连续调节的射频频谱; (d) F9L 和 NPR 激光器的相位噪声功率谱密度

Fig. 2. (a) Output power as a function of pump power; (b) mode-locked spectrum at a pump power of 624 mW; (c) RF spectrum with continuously adjustable repetition frequency within the range of 197.8–200.65 MHz; (d) phase noise power spectral density of the F9L and the NPR laser.

重复频率同样为 200 MHz 近零色散 NPR 锁模激光器的相位噪声进行对比. 在采用相同 LD 且输出电流一致的情况下, 通过放大光电探测器 (EOT ET-3000A) 和高精度信号源分析仪 (Agilent Technologies E5052 B) 测量了两台激光器在锁模状态下 f_r 信号的相位噪声功率谱. 如图 2(d) 所示, 图中红色曲线为 NPR 的相位噪声谱, 蓝色曲线为 F9L 的相位噪声谱. 在 1—10 Hz 的低频段内, F9L 表现出更优的抗环境扰动性. 在 1 Hz—1 MHz 积分范围内, NPR 和 F9L 的时间抖动分别为 222.4 ps 和 18.5 ps. 这一差异可能是全保偏结构有效抑制了环境扰动引起的相位噪声积累, 从而实现了更低的时间抖动和更强的系统鲁棒性.

3 光纤光梳的搭建

光梳系统的原理图如图 1 所示, 使用噪声更低的 F9L 作为种子源, 放大器以及光谱扩展部分也均采用全保偏结构. 锁模脉冲经 Co3 耦合进入单模光纤, 耦合效率约 74%, 经 50:50 光纤耦合器分束后, 两路激光输出功率约为 18 mW, 其中一路用于 f_r 信号的实时监测与闭环锁定, 另一路进入双向泵浦的预啁啾放大系统中, 放大后脉冲平均输出功率可达 395 mW, 输出光谱的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 42 nm, 其理论上对应的变换极限脉宽为 85.2 fs. 通过精密调节 WDM2 与耦合器间的无源光纤长度, 优化预啁啾量, 有效拓宽光谱宽度以获得更窄的变换极限脉宽, 当光纤长度修剪为 60 cm 时, 光谱的 FWHM 扩展为 110 nm, 理论上可获得 30.4 fs 的变换极限脉宽. 放大后的高功率脉冲在色散和自相位调制的共同作用下, 在光纤中呈周期性演化, 基于这一特性, 通过控制 WDM3 尾纤长度使其对应演化过程中的最窄脉宽处, 进而实现脉冲压缩. 随着光纤长度逐渐剪短, 主峰两边存在的对称的脉冲旁瓣逐渐向中心靠拢, 在光纤长度为 41 cm 时并入主峰, 此时经高斯拟合后的脉冲宽度为 78 fs.

脉宽压缩后的超短脉冲通过光纤耦合进一段长度为 41.5 cm 的保偏 HNLf 中 (OFS HNLf-PM), 图 3(a) 为经 HNLf 后产生的超连续谱, 光谱范围完整覆盖 1000—2000 nm 波段. 脉冲经 Co4 输出进入共线型 $f2f$ 干涉仪中, 该部分空间光总间隔为 33.5 cm. 通过选择 PPLN 晶体通道, 可将

2000—2200 nm 长波成分倍频至 1000—1100 nm 波段. 之后倍频光与基频光通过一个 (1000 ± 5) nm 的带通滤波器 (band-pass filter, BPF) 耦合进入高速光电探测器 (photodetector, PD) 中, 滤出其他波长成分防止入射功率过高导致 PD 饱和. 通过精确调控 Co4 尾纤长度, 改善倍频光脉冲与基频光脉冲在时域的重合度, 从而获得最佳 f_{ceo} 信噪比. 当尾纤长度为 14.3 cm 时, 40 MHz 带宽、100 kHz 分辨率下 f_{ceo} 信噪比可达 47 dB, 射频频谱如图 3(b) 所示. 在 750—1050 mA 泵浦电流调节范围内, f_{ceo} 频率变化与泵浦电流呈线性关系, 为下一步频率锁定提供了关键条件.

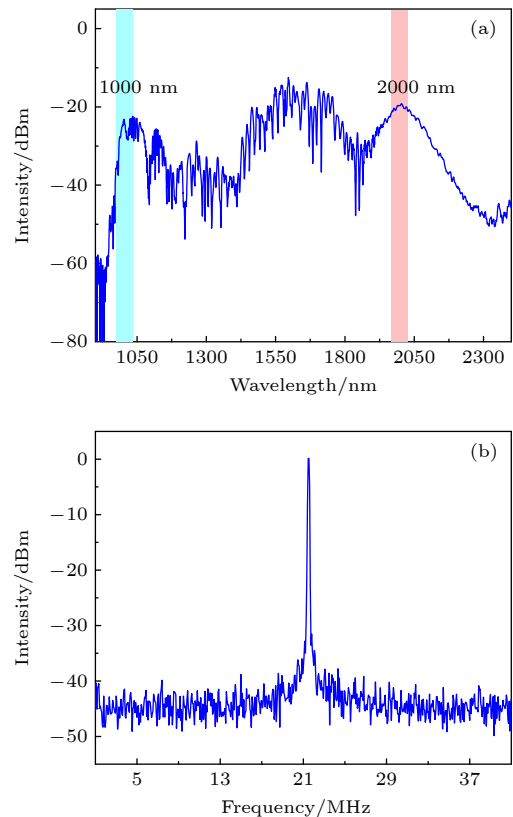


图 3 (a) 经 PM-HNLf 后的超连续谱; (b) 自由运转下 f_{ceo} 信号的射频频谱

Fig. 3. (a) Supercontinuum spectrum after PM-HNLf; (b) RF spectrum of the free-running f_{ceo} signal.

4 光梳线宽的优化及锁定

锁模激光器的噪声水平决定了 f_{ceo} 信号的线宽与信噪比, 进而对后续光梳的锁定效果以及频率稳定度产生影响. 其中泵浦控制器的电流波动会通过 LD 的 RIN 传递至锁模激光器的相位噪声和

RIN.本研究选用具有不同泵浦电流噪声的两款电流源 Thorlabs LDC8020 (20 μA RMS) 和 Thorlabs CLD1015 (10 μA RMS) 进行对比实验,以量化泵浦电流噪声对锁模激光器相位噪声乃至 f_{ceo} 信号线宽及信噪比的实际影响.在 25 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,两款电流源输出电流均设置为 600 mA,驱动同一个 980 nm LD (II-VI CM97-990-76),以对比泵浦电流噪声对 LD 输出 RIN 的影响.为避免输入光功率过高使 PD (Thorlabs PDA10 CS2) 饱和,在 PD 前端加入一个衰减片,通过精确调节衰减量,确保示波器监测到的 LD 平均输出电压稳定维持在 2.5 V.图 4(a) 所示为两种电流源下 LD 输出的 RIN 对比测试结果,结果显示,在 1 Hz—1 MHz 偏移频率范围内,使用 LDC8020 电流源驱动 LD 的 RIN 显著高于 CLD1015.在此积分范围内,计算 LD 输出的相对强度噪声波动分别为 0.66% (LDC8020) 和 0.27% (CLD1015).图 4(b) 为采用两款电流驱动时 F9L 的基频相位噪声,泵浦电流均为 600 mA.其中,红色和蓝色曲线分别为 LDC8020 和 CLD1015,

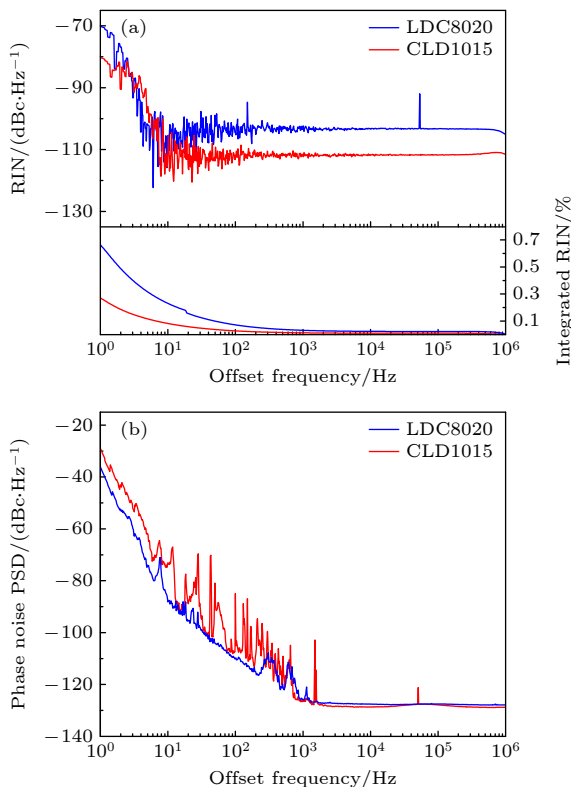


图 4 (a) 两种电流源下 LD 输出的相对强度噪声; (b) 两种电流源下种子源基频相位噪声

Fig. 4. (a) Relative intensity noise of the LD output with the two current sources; (b) f_r phase noise of the seed source under the two current sources.

在 1 Hz—1 MHz 积分带宽内, f_r 信号的时间抖动分别为 18.5 ps 和 7.7 ps.

进一步,对比采用不同锁模结构和采用不同电流驱动对 f_{ceo} 线宽的影响.在使用 LDC8020 电流源驱动时,1 MHz 带宽 300 Hz 分辨率下,NPR 和 F9L 自由运转 f_{ceo} 经洛伦兹拟合后的线宽分别为 221.5 kHz (图 5(a)) 和 11.4 kHz (图 5(b)),插图为对应的对数坐标,得益于优秀的抗环境扰动能力,自由运转下 F9L 的 f_{ceo} 线宽相较于 NPR 窄一个数量级.将泵浦电流源更换为噪声更低的 CLD1015 后,相同驱动电流下 F9L 的自由运转 f_{ceo} 线宽如图 5(c) 所示(插图为对应的对数坐标),1 MHz 带宽 300 Hz 分辨率下洛伦兹拟合后的线宽为 6.6 kHz,且频谱中的多峰结构消除,该结果证明优化泵浦电流源噪声对自由运转下 f_{ceo} 线宽压缩起积极作用.在此基础上,进一步探究 1/8 波片旋转角度对于 f_r 相位噪声和 f_{ceo} 线宽的影响.在保证锁模能够自启动状态下,45 $^{\circ}$ 、55 $^{\circ}$ 和 65 $^{\circ}$ 三种波片角度对应的传输曲线如图 5(d) 所示(3 个角度均表示波片快轴与水平 x 轴的夹角),其中横坐标为光纤环路内顺时针与逆时针光之间的非线性相位差,其与光强相关,因此在波片角度适当的情况下传输曲线可视为可饱和吸收曲线.随着波片角度由 45 $^{\circ}$ 旋转至 65 $^{\circ}$,最大透过率不变,但达到最大透过率所需非线性相移量增大,调制深度也随之增大.结合图 5(e) 中 3 种波片对应的相位噪声分析可知:当波片角度为 45 $^{\circ}$ 时,较低的调制深度导致 F9L 对放大自发辐射 (ASE) 等弱光抑制效果不足,提高 ASE 量子噪声;波片角度为 55 $^{\circ}$ 时,调制深度增大使得对弱光的抑制效果增强,ASE 量子噪声得到抑制,30 Hz—1 kHz 偏移频率范围内的相位噪声(红色谱线)低于 45 $^{\circ}$ 时的相位噪声(蓝色谱线);当波片角度为 65 $^{\circ}$ 时,过高的调制深度导致腔内损耗增大,自启动阈值提升至 767 mW,损耗增大打破了激光腔内的增益-损耗平衡,迫使掺铒光纤工作在更高增益水平,进而放大 ASE 量子噪声并耦合至脉冲相位,最终在中高频段体现为相位噪声的上升^[24],如绿色谱线所示.图 5(f) 为不同波片角度时对应自由运转下 f_{ceo} 的线宽,得到 $\text{linewidth}_{55^{\circ}} > \text{linewidth}_{45^{\circ}} > \text{linewidth}_{65^{\circ}}$,合适的波片角度能尽可能降低 f_r 相位噪声,进而获得最优的自由运转

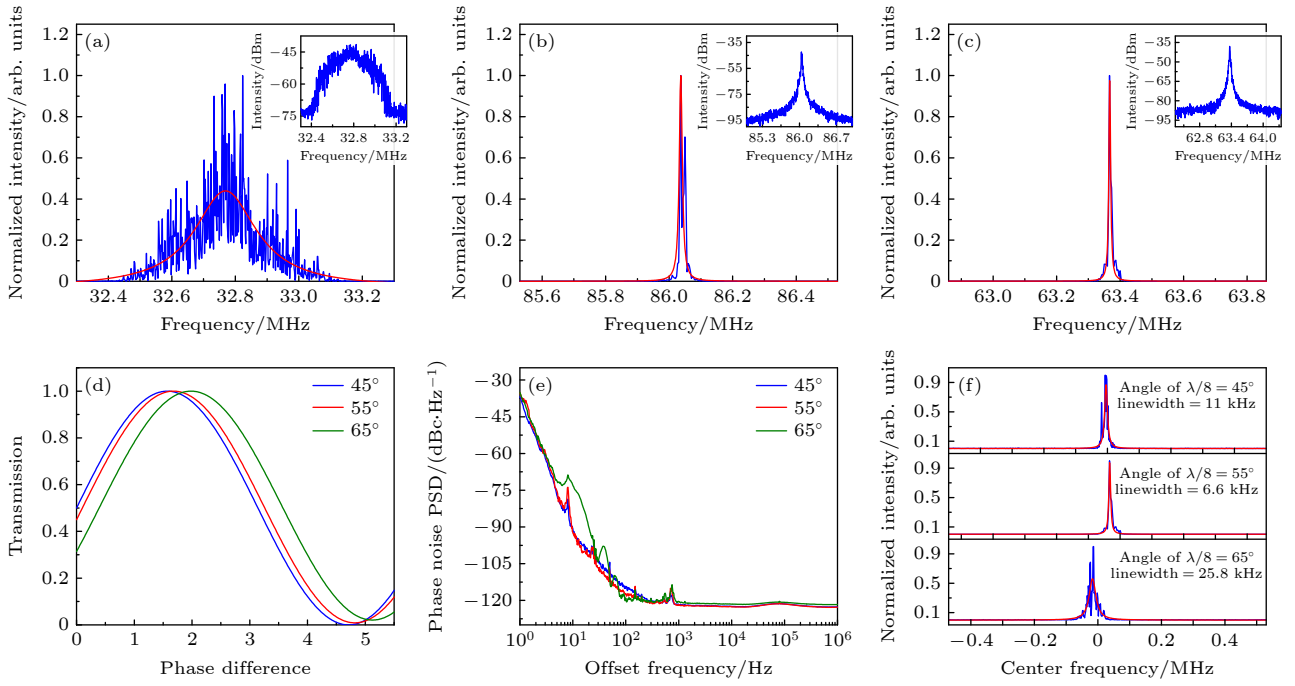


图5 自由运转时 (a) NPR 和 (b) F9L 的 f_{ceo} 线宽; (c) F9L 更换 CLD1015 电流源后 f_{ceo} 线宽; 45°, 55° 和 65° 波片角度下的 (d) F9L 传输曲线, (e) f_r 相位噪声对比曲线和 (f) f_{ceo} 线宽对比曲线

Fig. 5. Free-running f_{ceo} linewidth of (a) NPR and (b) F9L; (c) f_{ceo} linewidth of F9L with the CLD1015 current source; (d) transmission curves of F9L, (e) comparison of f_r phase noise, and (f) comparison of f_{ceo} linewidths under waveplate angles of 45°, 55°, and 65°.

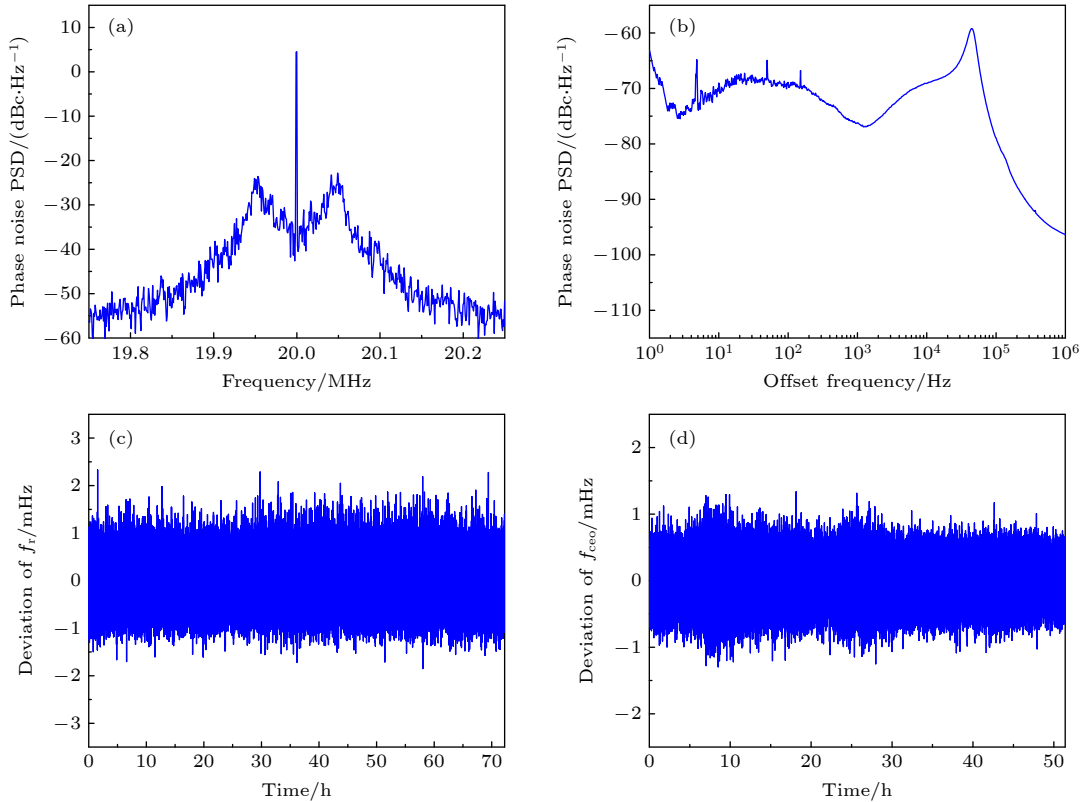


图6 (a) 环内 f_{ceo} 信号的射频频谱; (b) f_{ceo} 锁定后的单边相位噪声谱; (c) 锁定后 f_r 信号的频率偏差; (d) 锁定后 f_{ceo} 信号的频率偏差

Fig. 6. (a) In-loop RF spectrum of f_{ceo} signal; (b) single-side phase noise spectrum of the locked f_{ceo} ; (c) frequency deviation of the locked f_r ; (d) frequency deviation of the locked f_{ceo} .

f_{ceo} 线宽, 更利于实现更高的频率精度和光梳的长期稳定锁定.

在光梳锁定方面, 1/8 波片角度固定为 55° , 采用两台参考至高稳定度氢钟信号的频率综合器作为参考基准, 通过锁相环路将光梳的 f_r 和 f_{ceo} 精确锁定在射频参考上. 将 f_r 和 f_{ceo} 信号分别与外部参考源信号混频, 获得误差信号, 并分别传递至 New-Focus LB1005 高速伺服控制器和 Vescent D2-135 高速伺服控制器, 输出控制电压分别反馈至压电陶瓷和泵浦电流源, 通过压电陶瓷调节激光器物理腔长实现对 f_r 信号的调节和锁定; 通过调节泵浦电流实现对 f_{ceo} 信号的锁定. 图 6(a) 为 f_{ceo} 被精确锁定至 20 MHz 处的射频频谱, 分辨率带宽为 1 kHz, 锁定伺服带宽为 50 kHz. 图 6(b) 为 f_{ceo} 锁定后的单边相位噪声功率谱, 在 2 Hz—50 kHz 偏移频率范围内噪声得到抑制. 对光梳进行连续两天的连续锁定, f_r 和 f_{ceo} 的频率偏差分别如图 6(c), (d) 所示, 计算得到的标准差分别为 0.374 和 0.263 mHz.

5 结 论

本文搭建了基于 F9L 的全保偏掺铒光纤激光器, 实现了重复频率 200 MHz, 中心波长 1567.5 nm 处 FWHM 达 83.4 nm 的近零色散锁模. 通过与重复频率同样为 200 MHz 的近零色散 NPR 激光器的相位噪声对比发现, 在 1 Hz—1 MHz 范围内, F9L 表现出更低的时间抖动. 进一步使用低噪声 F9L 作为种子源搭建光梳系统, 自由运转下 f_{ceo} 的信噪比达 47 dB, 线宽为 11.4 kHz. 得益于种子源低噪声特性, f_{ceo} 线宽相较于相同泵浦电流驱动的 NPR 光纤光梳显著降低. 此外, 优化泵浦电流噪声和调节波片角度平衡 F9L 腔内调制深度与损耗均能进一步降低 f_r 相位噪声, 优化后的 f_{ceo} 线宽进一步压缩至 6.6 kHz. 通过外部锁相环路将 f_r 和 f_{ceo} 连续锁定两天, 计算两信号频率偏差的标准差分别为 0.374 mHz 和 0.263 mHz. 这种具有较窄线宽的全保偏光梳系统有望为光钟精密测量技术的发展提供有力支持.

参考文献

- [1] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E, Schmidt P O 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 637
- [2] Prehn A, Glöckner R, Rempe G, Zeppenfeld M 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 033101
- [3] Zhang P, Zhang Y Y, Li M K, Rao B J, Yan L L, Chen F X, Jiang H F, Zhang S G 2022 *Chin. Phys. B* **31** 054210
- [4] Foltynowicz A, Masłowski P, Ban T, Adler F, Cossel K C, Briles T C, Ye J 2011 *Faraday Discuss.* **150** 23
- [5] Leopardi H, Davila-Rodriguez J, Quinlan F, Olson J, Sherman J A, Diddams S A, Fortier T M 2017 *Optica* **4** 879
- [6] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, Minoshima K, Nagatsuma T, Araki T 2010 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 191
- [7] Lee C, Chu S T, Little B E, Bland-Hawthorn J, Leon-Saval S 2012 *Opt. Express* **20** 16671
- [8] Pupeza I, Zhang C, Högnér M, Ye J 2021 *Nat. Photonics* **15** 175
- [9] Kanno A, Sekine N, Uzawa Y, Hosako I, Kawanishi T 2015 *European Microwave Conference (EuMC)* Paris, France, September 7–10, 2015 p558
- [10] Sinclair L C, Deschênes J D, Sonderhouse L, Swann W C, Khader I H, Baumann E, Newbury N R, Coddington I 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 081301
- [11] Baumann E, Giorgetta F R, Nicholson J W, Swann W C, Coddington I, Newbury N R 2009 *Opt. Lett.* **34** 638
- [12] Li X, Reber M A, Corder C, Chen Y, Zhao P, Allison T K 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 093114
- [13] Wang T, Yang Y D, Hao Y Z, Zhang Z N, Sh, Y, Chen Y L, Xiao J L, Huang Y Z 2023 *Opt. Express* **31** 12200
- [14] Endo M, Shoji T D, Schibli T R 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 1
- [15] Paschotta R, Schlatter A, Zeller S C, Telle H R, Keller U 2006 *Appl. Phys. B* **82** 265
- [16] Raabe N, Feng T L, Mero M, Tian H C, Song Y J, Hänsel W, Holzwarth R, Sell A, Zach A, Steinmeyer G 2017 *Opt. Lett.* **42** 1068
- [17] Zhang Y Y, Fan S T, Yan L L, Zhang L, Zhang X F, Guo W G, Zhang S G, Jiang H F 2017 *Opt. Express* **25** 21719
- [18] Xiong S P, Luo D P, Liu Y, Wang W C, Deng Z J, Tang Z Q, Xie G H, Zhou L, Zuo Z, Gu C G, Li W X 2022 *Opt. Express* **31** 514
- [19] Kim J W, Song Y J 2016 *Adv. Opt. Photonics* **8** 465
- [20] Liu G Y, Jiang X G, Wang A M, Chang G Q, Kaertner F, Zhang Z G 2018 *Opt. Express* **26** 26003
- [21] Ren B, Li C, Wang T, Guo K, Zhou P 2022 *Opt. Express* **30** 26464
- [22] Cao S Y, Han Y, Ding Y J, Lin B K, Fang Z J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 074207
- [23] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J, Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134205 (in Chinese) [曹士英, 孟非, 林百科, 方占军, 李天初 2012 *物理学报* **61** 134205]
- [24] Liao R Y, Chao M, Song Y J, Demircan A, Steinmeyer G 2020 *Phys. Rev. A* **102** 013506

Development and noise characterization optimization of a fully polarization-maintaining optical frequency comb*

ZONG Yuyao^{1)2)3)#} HAN Yi^{1)2)#} LIU Jiawei¹⁾²⁾ CAO Shiying^{1)2)†}

1) (*Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*)

2) (*Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*)

3) (*College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

(Received 10 November 2025; revised manuscript received 22 December 2025)

Abstract

Optical frequency combs serve as a core technology for optical clocks and frequency transfer, with its noise characteristics determining the precision of frequency measurement. The linewidth of the carrier-envelope offset frequency (f_{ceo}) is a key characterization of the noise properties of the optical frequency comb. Therefore, achieving linewidth compression and optimization of f_{ceo} through noise suppression represents a critical research objective in this field. The noise of laser can significantly affects the performance of the f_{ceo} , and different mode-locking mechanisms of the laser result in distinct noise properties. Additionally, intensity fluctuations in the pump source can also affect the phase noise of the laser.

In this work, a polarization-maintaining figure-9 mode-locked laser (F9L) is established based on dispersion management technology, with a continuously tunable repetition rate in a range of 197.8–200.65 MHz. Compared with a previously developed nonlinear polarization rotation (NPR) mode-locked laser of the same repetition rate, the F9L exhibits superior phase noise performance. Within the 1 Hz–1 MHz integration range, the phase noise of NPR and F9L are 222.4 ps and 18.5 ps, respectively.

Using the F9L, a fully polarization-maintaining optical frequency comb system is built. The spatial light from the laser is coupled into the fiber through a collimator, and the average output power after a bidirectional pumping amplifier reaches 395 mW. The length of the amplifier-output pigtail fiber is controlled to manipulate the evolution of higher-order solitons. When the output fiber length is trimmed to 41 cm, the pulse width measured after Gaussian fitting is 78 fs. The pulsed light is launched into a section of highly nonlinear fiber, generating a supercontinuum spectrum that fully covers a range of 1000–2000 nm. A f_{ceo} signal with a signal-to-noise ratio of 47 dB is successfully obtained with a common path f - $2f$ interferometer.

Under the same LDC8020 pump source, the free-running f_{ceo} linewidths of the NPR and F9L mode-locked lasers are measured to be 221.5 kHz and 11.4 kHz, respectively. Additionally, the effects of pump current noise and the angle of the 1/8 waveplate inside the F9L cavity on the f_{ceo} linewidth are systematically studied. For the pump current noise analysis, two types of current sources with different noise levels, namely Thorlabs LDC8020 (20 μA RMS) and Thorlabs CLD1015 (10 μA RMS), are employed. The experimental results show that the CLD1015 produces lower relative intensity noise from the same laser diode and lower phase noise from the same F9L than the LDC8020. When the F9L is driven by the lower-noise CLD1015 current source, the free-

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFF0603801) and the Scientific Research Foundation of National Institute of Metrology, China (Grant Nos. AKYZD2411, AKYZD2511).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

running f_{ceo} linewidth is further narrowed to 6.6 kHz, and the multi-peak structure in the spectrum is eliminated, demonstrating a positive role in optimizing pump current noise in linewidth compression. Regarding the waveplate angle, the experiments are conducted at angles of 45° , 55° , and 65° . It is found that an appropriate waveplate angle (55° in this case) can balance the modulation depth and intracavity loss, effectively suppressing amplified spontaneous emission (ASE) quantum noise and minimizing phase noise, thereby achieving the optimal f_{ceo} linewidth. Finally, under two consecutive days of locking, the standard frequency deviations of the repetition rate and f_{ceo} are 0.374 mHz and 0.263 mHz, respectively.

Keywords: laser, nonlinear fiber optics, optical frequency comb, ultrafast laser

DOI: [10.7498/aps.75.20251553](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251553)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251553](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20251553)

全保偏光频梳系统的研制与噪声特性优化

宗玉瑶 韩羿 刘佳伟 曹士英

Development and noise characterization optimization of a fully polarization-maintaining optical frequency comb

ZONG Yuyao HAN Yi LIU Jiawei CAO Shiyong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050401 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251553

CSTR: 32037.14.aps.75.20251553

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251553>

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

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>

基于光注入下脉冲电流调制1550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带可调谐光学频率梳

Broadband and tunable optical frequency comb based on 1550 nm verticalcavity surface-emitting laser under pulsed current modulation and optical injection

物理学报. 2023, 72(1): 014207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221709>

基于光谱增强技术实现对532 nm波长激光频率标定

Realization of frequency calibration for 532 nm wavelength laser based on spectral enhancement technology

物理学报. 2024, 73(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240106>

基于可饱和吸收体锁模激光器中的呼吸子

Breathers in mode-locked lasers based on saturable absorbers

物理学报. 2025, 74(4): 044206 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241505>

重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距

Absolute distance measurement using cross correlation interferometer with a repetition rate multiplication frequency comb

物理学报. 2022, 71(9): 090602 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073>

氟化镁微瓶腔光频梳光谱分析及优化

Analysis and optimization of optical frequency comb spectra of magnesium fluoride microbottle resonator

物理学报. 2024, 73(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231126>