

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311793

用于激光频率参数测量的飞秒光学频率梳^{*}

韩 羿¹, 曹士英^{1,2}, 宋文霞¹, 左娅妮^{1,2}, 房 芳^{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. 国家市场监督管理总局
重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

摘 要:近年来随着光纤制造技术和飞秒激光技术的成熟,以掺铒(Er)光纤光学频率梳为代表的频率梳技术,逐步突破了光学频率测量领域,在长度测量、精密光谱分析、超低相位噪声微波频率产生、精密时间频率传递、温度测量等领域发挥出越来越重要的作用,已成为许多高端科研领域的基础性工具。但飞秒光学频率梳所解决的重要问题是对激光频率进行测量。本文主要面向激光频率参数测量的需求,研制基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳,在实现光学频率梳稳定运转的前提下,通过非线性光学频率变换技术,实现光谱范围从掺 Er 光纤光学频率梳的中心波长向各个待测激光波长的转换,并完成与多个不同波长激光的拍频信号探测。目前已验证的飞秒光梳可测频率范围为 500~2 000 nm;频率稳定度和准确度为 10^{-16} 量级;线宽为 Hz 量级。该指标满足了激光频率特性参数测量的需求,为激光绝对频率、频率漂移、线宽等参数的测量提供了基础性的测量工具。

关键词: 光学频率梳;频率测量;拍频;稳定度;线宽;绝对频率

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Femtosecond optical frequency comb for measuring laser frequency parameters

Han Yi¹, Cao Shiying^{1,2}, Song Wenxia¹, Zuo Yanni^{1,2}, Fang Fang^{1,2}

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

Abstract: In recent years, with the rapid development of fiber manufacturing technology and femtosecond laser technology, the femtosecond optical frequency combs (FOFCs) technology represented by Er-FOFCs has gradually advanced the field of optical frequency measurement. It is playing an increasingly important role in length measurement, precision spectral analysis, ultra-low phase noise microwave frequency generation, precision time-frequency transfer, temperature measurement, and many other fields. It has become an important fundamental tool in high-end scientific research. However, the important problem to be solved by the FOFCs is to measure the optical frequency. This article mainly focuses on the demand for measuring optical frequency parameters. An optical frequency comb based on the Er-doped fiber femtosecond laser has been developed. With the stable operation of the Er-FOFC, the nonlinear optical frequency conversion is used to transfer the spectrum from the central wavelength of the Er-FOFC to other wavelengths. The beat note between the broadened spectrum in the Er-FOFC and the measured laser is detected. The Er-FOFC has a spectral range of 500~2 000 nm, frequency instability and accuracy of the level of 10^{-16} , and a Hz-level comb tooth linewidth. These parameters meet the requirement for measuring laser frequency. The reported Er-FOFC provides a fundamental measurement tool for optical frequency, frequency drift, frequency linewidth, and other parameters.

Keywords: optical frequency comb; optical frequency measurement; beat note; frequency instability; optical linewidth; absolute optical frequency

0 引 言

光学频率梳^[1-2],简称“光梳”,主要是指基于飞秒激光技术产生的频率梳系统,利用了飞秒激光的时域和频域特性。飞秒激光在时域上呈现等间隔的脉冲串,由傅里叶变换关系可知,对应的频域呈现等间隔的梳齿序列。梳齿的强度由激光频域上的光谱形状所决定,梳齿的间隔由时域脉冲的重复频率所决定,通常以 f_r 表示。由于飞秒激光腔内脉冲的群速度和相速度不匹配,导致脉冲时域的载波和包络的峰值处存在一个相位偏移,在频域上体现为梳齿序列相对于零频率存在一个频率偏移,称之为载波包络偏移频率或系统偏移频率,通常以 f_0 表示。飞秒激光重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_0 都处于微波频率(MHz~GHz量级),当这两个信号都锁定到微波频率标准后,频域上每个梳齿的位置也就随之固定,形成自己的固定频率(THz量级)。此时飞秒激光成为了飞秒光梳,其频域梳齿的稳定度、准确度等指标直接与锁定的微波频率标准相关。

除了基于飞秒激光技术产生的频率梳,基于光电调制^[3]、微腔等技术^[4],也能够形成等间隔的梳齿状序列,在一些文献中也被称为光梳。此外一些未进行锁定和控制的自由运转的飞秒激光器在部分文献中也被称为飞秒光梳。本文中所提及的光梳,均是对重复频率和载波包络偏移频率进行探测和锁定的光梳。

近年来随着光纤制造技术和飞秒激光技术的成熟,以掺 Er 光纤光梳为代表的频率梳技术,逐步突破了光学频率测量领域的应用范围^[5-6],在长度测量^[7]、精密光谱分析^[8]、超低相位噪声微波频率产生^[9]、精密时间频率传递^[10]、温度测量^[11]等领域发挥出越来越重要的作用,已成为许多高端科研领域中重要的基础性工具。但总的来说,各个领域的应用主要利用光梳高稳定度的时域脉冲特性以及高稳定度、高准确度的频域梳齿特性。虽然光梳的应用领域越来越多,但自飞秒光梳诞生之日起,所解决的重要问题就是对激光绝对频率进行测量^[12]。因此,长期以来利用飞秒光梳对激光频率测量一直是飞秒光梳发展和应用过程中最重要的一项内容。从理论上讲,光梳所能够覆盖的任何波长,都可以通过光梳进行频率特性测量,但从实际应用考虑,如何实现光梳覆盖待测激光波长并获得能够满足频率测量要求的拍频信号是光梳应用过程中最关键的一个环节。

飞秒光梳用于激光绝对频率测量时,当锁定的微波频率标准与协调世界时(coordinated universal time, UTC)相连时,可以实现激光频率的实时国际比对和等效互认^[13]。飞秒光梳的光学频率测量范围广,利用一台飞秒光梳就可以实现其光谱扩展范围内的所有光学频率进行

直接测量,使包括可见光到近红外区域内的任意光学频率都可以直接溯源至微波频率,从而有效解决目前包括光钟在内各个激光频率以及各个稳频激光频率的量值溯源问题。当飞秒光梳与现行时间频率基准连接后,其测量的不确定度可达 10^{-16} 量级^[14-16],可以满足众多激光辐射频率的测量需求。

国际计量局和各个国家级计量院很早就认识到飞秒光梳在激光频率量值传递过程中的重要作用。从2000年开始,世界上多个国家的计量机构都相继建成了自溯源的飞秒光梳装置,并测量了包括冷原子光频标、单离子光频标和各种稳频激光器在内的多条光辐射谱线的绝对频率^[17-20]。如美国国家标准技术研究所(national institute of standards and technology, NIST)从2008年起,其所有激光波长的校准都已直接或间接地溯源到飞秒光梳,并且与校准的激光干涉仪形成现代长度计量的骨架^[21]。而基于光梳的真空波长测量有效地形成了美国国内长度测量溯源链的最顶部。

在国内,华东师范大学、清华大学、北京大学、中国科学院物理研究所、中国科学西安光学精密机械研究所、中国科学院国家授时中心等高校和科研单位都开展了光梳方面的工作。在计量领域,中国计量科学研究院、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、北京航天计量测试技术研究所、中国电子科技集团公司第四十一研究所也都在开展光梳方面的工作。中国计量科学研究院从2000年开始飞秒光梳的研制工作,先后开展了钛宝石光梳和掺 Er 光纤光梳的研制工作^[22-24],在关键技术上取得了一系列突破,已建成了完善的装置,其初衷是解决我国国家波长基准和各个激光频率的量值溯源问题。

本文主要面向激光频率特性参数测量的需求,研制了基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光梳,在实现光学频率稳定运转的前提下,通过非线性光学频率变换技术,实现光谱范围从掺 Er 光纤飞秒激光器的中心波长向各个待测激光波长的转移和覆盖,并实现掺 Er 光纤光梳与待测激光拍频信号的探测,最终满足激光频率特性参数测量的需求,为激光绝对频率、频率漂移、线宽等参数的测量提供基础性测量工具。

1 光梳测量激光频域参数的原理

1.1 光梳测量激光频率的原理

飞秒光梳测量激光频率原理,如图1所示。

在频域上,飞秒光梳的第 N 个梳齿的频率 f_N ,可以表示为: $f_N = N \cdot f_r \pm f_0$ 。对于任何频率的连续激光,只要其频率位于光梳的光谱覆盖范围之内,则可通过式(1)计算激光频率:

$$f_{cw} = N \cdot f_r \pm f_0 \pm f_b \quad (1)$$

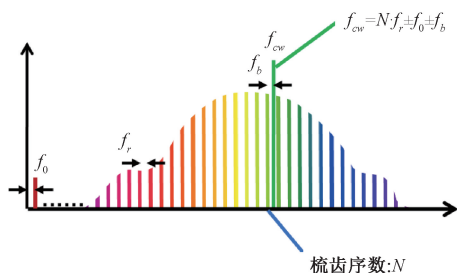


图1 飞秒光梳测量激光频率原理图

Fig. 1 Principle of laser frequency measurement with the FOFC

其中 f_{cw} 是待测激光频率值。通过锁相环将 f_r 和 f_0 锁定到频率综合器的输出频率上,两者均为频率综合器输出频率设定值, f_b 为待测激光与光梳临近梳齿的拍频频率,采用频率计数器进行测量, N 为光梳中与待测激光频率最接近梳齿的序号。

对于 f_b 前“ $\pm$ ”号的判断,可以采取在 f_r 和 f_0 锁定状态下,微调 f_r 的参考频率,观察 f_b 的频率变化。当增加 f_r 频率时若 f_b 频率减少(增加)则可判断 f_b 的符号为正(负);当减少 f_r 频率时若 f_b 频率增加(减少)则可判断 f_b 的符号为正(负)。为了在上述过程中保证 f_r 和 f_0 一直处于锁定状态,推荐 f_r 频率调谐步长为 1 Hz,此时若梳齿序号 $N = 10^6$ 则对应 f_b 频率的变化量约为 1 MHz。

在 f_b 符号已知的情况下,开环(失锁) f_0 锁相环,仍保证 f_r 处于锁定状态,通过改变 f_0 频率,并观察 f_b 频率变化。当增加 f_0 频率时若 f_b 频率增加(减少)则可判断 f_0 符号与 f_b 相反(相同);当减少 f_0 频率时若 f_b 频率增加(减少)则可判断 f_0 符号与 f_b 相同(相反)。为了在上述过程中保证光梳一直处于锁模状态,推荐 f_0 频率最大调谐量应不高于 $f_r/10$ 。

对于 N 的确定,可以采用波长计、光谱仪,或者利用吸收谱线频率进行确定,也可以通过大范围调节重复频率来获取^[25]。

对于激光器频率稳定度的确定,通常以相对 Allan 偏差进行描述:

$$\sigma_A = \frac{1}{f_{cw}} \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [f_{b,i+1}(\tau) - f_{b,i}(\tau)]^2} \quad (2)$$

其中, $\sigma_A(\tau)$ 为相对 Allan 偏差, τ 为测量平均时间, n 为采样点数, $f_{b,i}(\tau)$ 为第 i 次采样测量的频率平均值。

1.2 光梳测量激光线宽的原理

目前微波原子钟输出的频率标准秒级稳定度最高在 10^{-14} 量级,当光梳锁定至该微波频率标准时,能够真实体现秒级 10^{-14} 量级激光的稳定度。更高指标的测量可以选取以光钟输出的光学频率作为参考。另一方面,由于受增益介质上能级寿命的影响,掺 Er 光纤光梳的梳齿

线宽一般在百 kHz 量级。为了实现光梳齿线宽的压窄,一种有效的方法是在激光器中增加快速响应的反馈器件,使光梳的伺服锁定带宽提高到百 kHz 以上,实现光梳向窄线宽光学频率的快速锁定。

当以窄线宽激光或超稳激光输出的光学频率作为参考时,激光器所具有的窄线宽、高稳定度的特性,可以通过光梳从一个光学频率传递到其他光学频率^[26-28]。与微波频率参考不同,光梳向光学频率标准的锁定中通过锁定光梳与一台窄线宽激光器的拍频信号 f_{b1} ,从而实现重复频率 f_r 的稳定,如图 2 所示。在此锁定过程中需要加入快环以抑制高频噪声,通常以电光调制器(electro-optic modulator, EOM)^[29-30]、磁光调制器(magneto-optic modulator, MOM)^[31]、高带宽压电陶瓷(piezoelectric transducer, PZT)^[32]、基于电光晶体马赫-曾德干涉仪^[33]等作为快环反馈器件。而 f_0 的锁定仍然采用常规锁定微波频率标准的方式。两个环路锁定后,光梳齿线宽得到压窄,梳齿线宽压窄后的光梳在一定波长范围内具有和窄线宽激光同等量级的线宽或稳定度。此时探测光梳与待测激光的拍频信号 f_{b2} ,则可以直接反应出待测激光的线宽,也可以通过对拍频信号的计数获取激光器的稳定度。

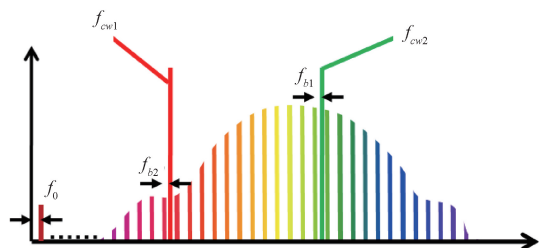


图2 飞秒光梳测量激光线宽的原理图

Fig. 2 Principle of laser linewidth measurement with the FOFC

2 激光频率测量对光梳的要求

常用的需要频域参数测量的激光可以分为 3 类,第 1 类:锁定到原子或分子吸收谱线,例如热稳频、 I_2 ^[34-37]、 C_2H_2 ^[38]、 CO_2 ^[39]、 Rb ^[40-41]、 Cs ^[42] 稳频激光器等,频率准确度在 $10^{-8} \sim 10^{-12}$ 量级。第 2 类:锁定到高精细度的法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)参考腔,短期频率稳定度可达 10^{-15} 甚至 10^{-17} 量级^[43-46]。第 3 类:锁定到离子阱囚禁的单离子或光晶格囚禁的多个中性原子的窄线宽光频跃迁^[47-50],频率稳定度和频率不确定度可达 10^{-18} 量级。

采用光梳测量激光频率参数,首先要求光梳的稳定度、准确度指标优于待测激光,否则测量结果无法真实反应激光特性。因此要求光梳处于锁定状态,即重复频率和载波包括偏移频率同时锁定。根据待测激光频率特

性,选取合适的参考源作为两个参数的参考。另一个重要要求是飞秒光梳的光谱需要覆盖待测激光波长。目前大部分飞秒光梳给出的指标只是光谱范围,而对于光梳应用的关键是要实现待测激光与飞秒光梳的拍频信号探测具有足够高的信噪比,以保证拍频频率计数的需要或者频率锁定的需要。这也是光梳应用于激光频率测量过程中的重要环节。

3 掺 Er 光纤光梳

3.1 掺 Er 光纤光梳结构

基于光梳的激光频率测量系统,如图 3 所示。其中核心部分是一台可覆盖可见光波段的高稳定度的掺 Er 光纤光梳^[51]。光梳与待测激光在拍频模块中进行拍频,获取拍频信号 f_b ,通过频率计数器记录拍频信号的频率数值。以中国计量科学研究院(national institute of metrology, NIM)保存的国家时间频率基准——激光冷却铯原子喷泉钟(NIM5)为信号^[52],通过其定期校准的 10 MHz 氢钟信号作为光梳的微波参考频率,也可以通过溯源到国际单位制(international system of units, SI)秒定义的氢钟提供的 10 MHz 信号作为光梳的微波参考频率。掺 Er 光纤光梳的重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_0 都锁定到参考到微波参考频率的频率综合器输出的微波频率信号上。前者形成独立自主的激光频率向国家时间频率基准的溯源,后者实现激光频率向 SI 秒定义的溯源,均形成了激光频率与时间频率基准的连接。氢钟输出 10 MHz 标准频率信号,1 s 频率稳定度优于 1×10^{-13} ,氢钟到 SI 秒定义链路不确定度优于 5×10^{-16} 。

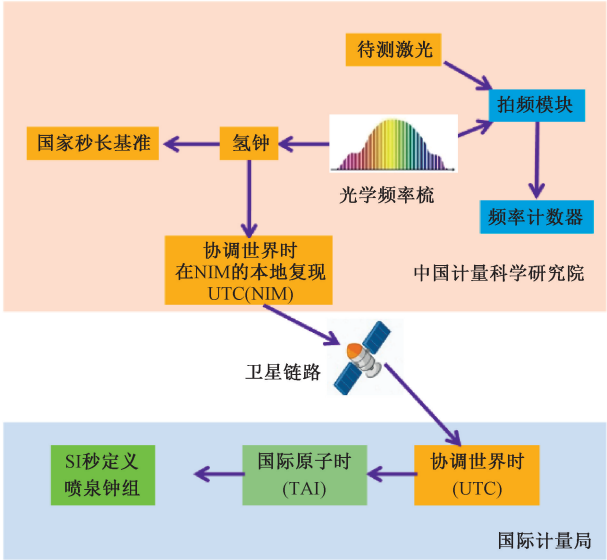


图3 基于光梳的激光频率测量系统图

Fig. 3 System of laser frequency measurement based on the FOFC

掺 Er 光纤光梳光学系统的基本结构,如图 4 所示。从掺 Er 光纤飞秒激光器输出的激光分成多路,经过光纤放大器、脉冲压缩器、频域扩谱、倍频等模块分别满足不同的需要。其中一路用于探测 f_0 信号,其他多路分别进行不同波长扩展,实现不同覆盖范围的光谱输出。在掺 Er 光纤光梳的光学系统中,通过对飞秒激光器输出的激光放大、频域扩谱和 $f-2f$ 干涉仪,可以探测到 40 dB 信噪比的 f_0 信号,如图 5 所示。其中,掺 Er 光纤飞秒激光器经过光纤放大器后输出功率 320 mW,压缩后脉冲宽度小于 50 fs。频域扩谱采用国产高非线性光纤(NL-1550-Zero, YOFC),1 550 nm 处色散 0.993 ps/(nm·km),色散斜率 0.019 ps/(nm²·km),光纤长度 35 cm。经过放大后的光脉冲耦合进入高非线性光纤可实现 1 100~2 200 nm 的光谱输出,输出功率 180 mW。 $f-2f$ 干涉仪中采用的扇形周期极化掺氧化镁铌酸锂(periodically poled lithium niobate, PPLN)晶体,其渐变通道为 21~35 μm ,可以在室温 25℃下实现对 1 610~2 340 nm 之间连续可调波长的倍频,避免了单或多通道的离散波长倍频。晶体截面尺寸为 1 mm×8.6 mm,通光长度为 2 mm,置于黄铜卡件上形成自然制冷。

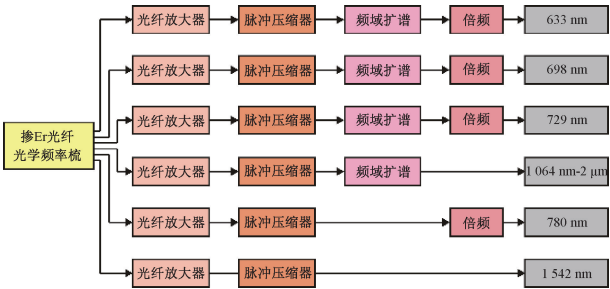


图4 掺 Er 光纤光梳光学系统的基本结构

Fig. 4 Structure of optical system in the Er-FOFC

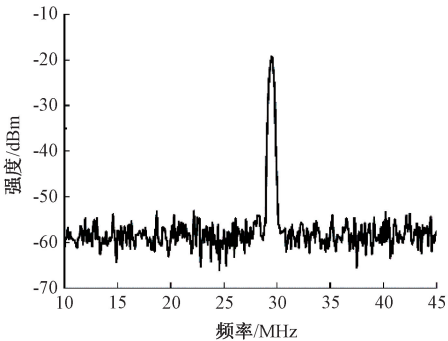


图5 掺 Er 光纤光梳探测的 f_0 信号,其中分辨率带宽(resolution bandwidth, RBW)为 300 kHz

Fig. 5 f_0 signal in the Er-FOFC at 300 kHz RBW

通过频率锁定技术,可实现激光器重复频率和载波包络偏移频率超过 30 天的长时间连续锁定。图 6 和 7 分别给出了 30 天连续锁定后的重复频率和载波包络偏移频率的变化和环内相对 Allan 偏差,其中数据采样时间为 1 s。锁定后重复频率的平均值为 200 MHz,标准偏差为 0.327 mHz。锁定后载波包络偏移频率的平均值为 20 MHz,标准偏差为 0.568 mHz。

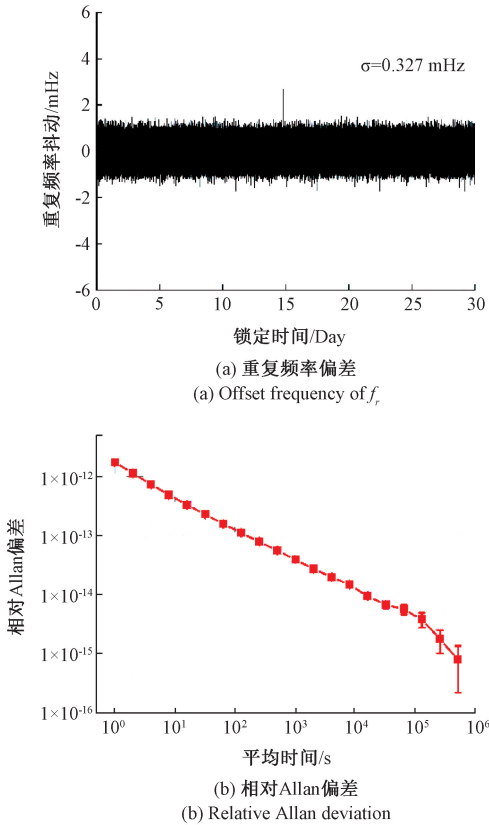


图 6 光纤光梳重复频率 30 天的连续锁定
Fig. 6 Continuous phase-locking of the repetition rate of the Er-FOFC for 30 days

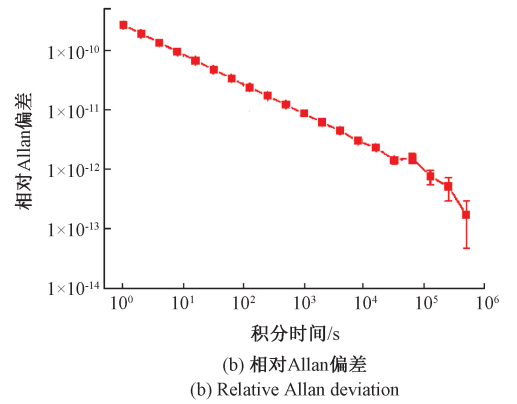
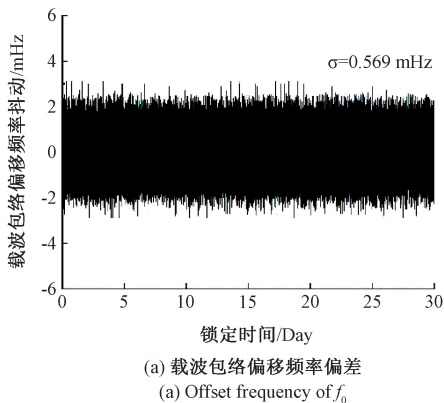


图 7 光纤光梳载波包络偏移频率 30 天的连续锁定
Fig. 7 Continuous phase-locking of the carrier-envelope offset frequency of the Er-FOFC for 30 days

3.2 掺 Er 光纤光梳向不同波长的扩展

为了满足不同波长激光频率的测量需求,需要对掺 Er 光纤光梳直接输出光谱进行频率扩展或变换。掺 Er 光纤光梳向不同波长的扩展有两种方式:一种是放大-倍频-扩谱方案^[51],另一种是放大-扩谱-倍频方案^[53]。第 1 种方式通常采用光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 扩谱直接形成一个覆盖可见光到近红外波段宽带光谱,但由于 PCF 光纤纤芯较细,加之空间耦合方案,会导致长时间测量时输出光谱不稳定,引起拍频信号信噪比下降,从而导致大量错误计数,如图 8 所示,此时往往需要去除掉大量错误数据。第 2 种方案避免了 PCF 光纤的使用,通过直接选取扩谱后特定波长点进行倍频以匹配待测激光波长。其特点是输出的光谱宽度较窄,只适合特定单一波长激光测量,但拍频信号稳定度较高,更适合长时间频率测量和监测。

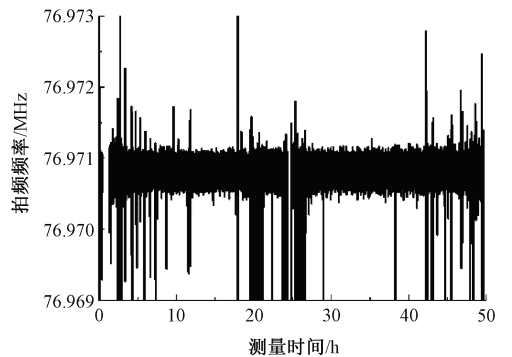


图 8 采用 PCF 扩谱后与激光拍频计数结果
Fig. 8 Frequency of beat note between a continuous wave laser and the broadened spectrum with a PCF in the Er-FOFC

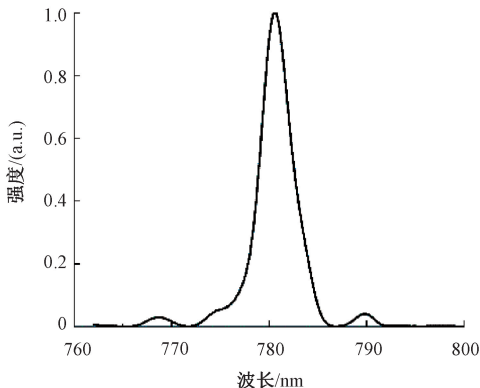
1) 采用光子晶体光纤进行光谱展宽

采用光子晶体光纤进行光谱展宽首先需要对掺 Er 光纤飞秒激光器的种子光进行功率放大和压缩,提高脉冲峰值功率,此后通过非线性晶体进行倍频,实现波长从 1 550~775 nm 的转换后耦合进入光子晶体光纤进行光谱展宽。

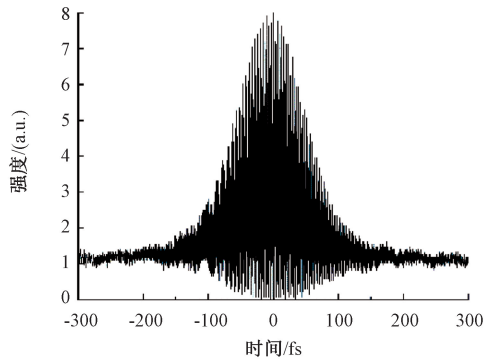
从掺 Er 光纤飞秒激光器输出的激光分束后,其中的一路光作为可见光扩谱单元的种子源,平均功率为 7 mW。采用单级放大双向抽运方式进行功率放大,当前向抽运功率为 1 313 mW,后向抽运功率为 1 292 mW 时,放大后输出功率为 531 mW。由于脉冲的时域宽度与光谱宽度成反比关系,为了使放大后脉冲宽度能够压缩至最窄,在放大器的设计过程中要避免放大过程中的增益窄化现象的发生,同时通过合理的色散设计使放大过程中存在最窄脉冲,利用放大器中光纤自身的非线性效应使放大后光谱保持足够的宽度。

种子光放大后进入倍频晶体实现频率转换。实验中采用的倍频晶体为多通道结构的 PPLN(MSHG1550-0.5-1, Conversion)。晶体通道结构为 18.5~20.9 μm 。晶体通光截面尺寸为 0.5 mm $\times$ 8 mm,通光长度为 1 mm。经过系统优化后,倍频后激光的输出功率为 170 mW,倍频效率为 32%,倍频后激光光谱如图 9(a) 所示。此光谱可以直接用于对 780 nm 激光进行频率测量。采用干涉自相关仪,测量倍频后激光的脉冲宽度为 85 fs,相关曲线如图 9(b) 所示。从相关曲线的形状可以看出,当倍频效率达到最大时,倍频后的激光脉冲二阶色散等到补偿,且高阶色散得到最大抑制。

倍频后的激光通过 PCF 进行光谱展宽。在 170 mW 入射功率下,展宽后的光谱如图 10 所示。光谱覆盖了 500~1 000 nm,输出功率为 85 mW,耦合效率 50%。通过优化入射光偏振和耦合状态可以使展宽光谱在不同波长处具有较大强度,以满足不同激光频率的测量需求。



(a) 光谱形状
(a) Spectral profile



(b) 自相关曲线
(b) Interferometric autocorrelation trace

图 9 飞秒激光倍频后的光谱和自相关曲线
Fig. 9 Spectrum and interferometric autocorrelation trace of the frequency-doubling laser

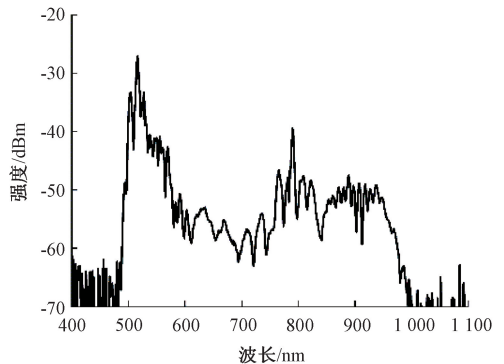


图 10 PCF 扩谱获得的光谱曲线
Fig. 10 Broadened spectrum after a PCF

2) 采用高非线性光纤进行光谱展宽

掺 Er 光纤飞秒激光器的波长位于 1.5 μm 附近,有 30 nm 的光谱宽度,如图 11 所示。因此掺 Er 光纤飞秒激光器输出的光可以直接用来对 1.5 μm 附近的激光进行频率测量,如 C₂H₂ 稳频激光器、1 542 nm 窄线宽激光器 等。

掺 Er 光纤光梳输出的激光分束后一路功率约为 7 mW 的激光首先进入两级放大器。两级放大器均采用后向抽运方式,抽运源最大抽运功率 750 mW。两级放大器采用的增益光纤在 1 530 nm 处的吸收率为 80 dB/m (Er80-4/125, LIEKKI),其中一级放大器增益光纤的长度为 50 cm,二级放大器增益光纤的长度为 85 cm。在 7 mW 入射光功率的条件下,经过一级放大后功率可以提升至 111 mW,经过二级放大后功率可提升至 356 mW,压缩后脉冲宽度小于 50 fs。

采用与 f_0 信号探测所需光谱展宽中同样参数的高非线性光纤作为光谱展宽器件。高非线性光纤长度 40 cm。

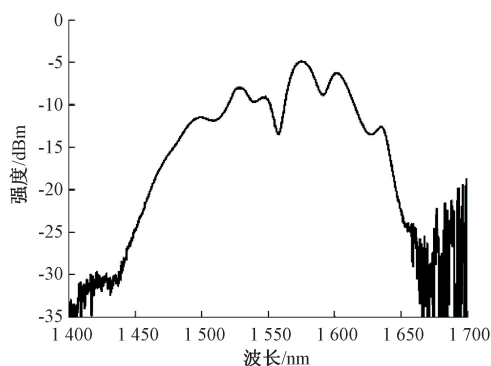


图 11 掺 Er 光纤飞秒激光器直接输出光谱

Fig. 11 Spectrum from the Er-fiber femtosecond laser

放大器输出激光经波片组合后进入高非线性光纤,经高非线性光纤扩谱后功率为 185 mW。通过优化入射光偏振状态可以实现对扩谱后光谱形状的微调。光谱短波可以覆盖至 1 μm 波段,长波可延伸至 2.2 μm 以上,如图 12 所示。此光谱可用于对碘稳频 532 nm 激光的基频光 1 064 nm, CO_2 稳频的 2 μm 激光进行频率特性测量,同时该光谱可以作为后续单点倍频的基频光光源。

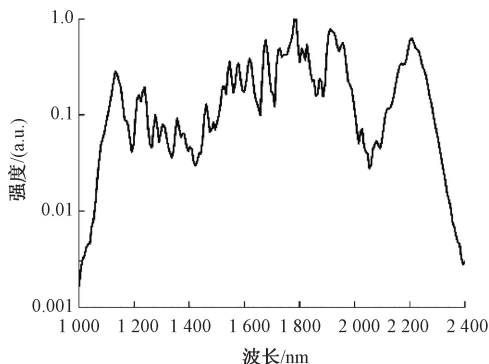


图 12 高非线性光纤扩谱后的光谱

Fig. 12 Broadened spectrum after a highly nonlinear fiber

3) 单点倍频

掺 Er 光纤光梳通过高非线性光纤扩谱可以实现 1 000~2 200 nm 的宽带光谱输出,但该光谱处于红外波段,很难满足可见光激光波长的测量需求。采用放大-倍频-扩谱技术,可以实现掺 Er 光纤光梳输出光谱向可见光波长扩展,但 PCF 会存在长时间光谱漂移造成拍频信号信噪比下降的风险,不利于对激光的长时间频率测量。

目前需要测量的激光大部分处于可见光波段,如里德堡原子电磁场计量所需的 510 nm 激光、碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光、543 nm 稳频激光、612 nm 稳频激光、633 nm 稳频激光、铯原子光钟 698 nm 激光、钙离子光钟 729 nm 激光、铷原子稳频 780 nm 激光、铯原子稳频 852 nm、镱离子光钟 871 nm、镱离子光钟 934 nm 激光等

等。上述这些激光的可分别由掺 Er 光纤光梳直接扩谱形成的 1 000~2 200 nm 超宽带光谱中特定波长点倍频获得。目前本系统已经实现了对 532、633、698、729、780、871 和 934 nm 激光的频率测量。

掺 Er 光纤光梳输出的 1.5 μm 激光先经过放大和光谱展宽,形成如图 12 所示的光谱。利用此宽带光谱作为光源,分别选择 1 064、1 266、1 396、1 458、1 742 和 1 868 nm 波长点进行倍频。采用短焦距透镜将扩谱后的激光聚焦至 PPLN 上产生倍频光,此后再次通过短焦距透镜进行光路准直。晶体通光截面尺寸为 1 mm $\times$ 8 mm,通光长度为 2 mm。对于 1 266、1 396、1 458、1 560、1 742 和 1 868 nm 的倍频分别选取周期为 11.65、15.10、16.82、19.66、24.54 和 27.55 μm 的晶体,在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下可实现 633、698、729、780、871 和 934 nm 的激光输出,所得到的光谱经过归一化处理,如图 13 所示。

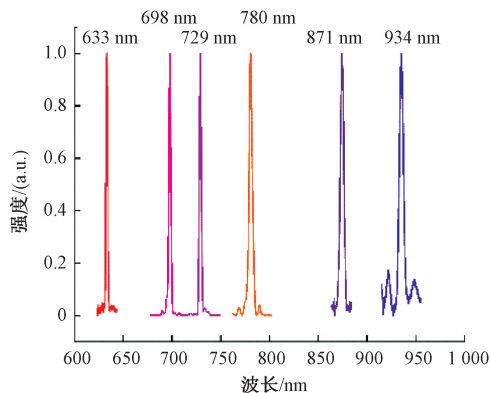


图 13 单点倍频获得的不同波长激光光谱

Fig. 13 Spectra of different wavelengths obtained by single point frequency doubling technique

4) 级联放大再倍频

虽然采用 PCF 扩谱方案可以实现掺 Er 光纤光梳光谱覆盖到 500 nm 波段,但长时间测量稳定性受到影响,而采用高非线性光纤扩谱可以直接覆盖到 1 μm 波段。但此波长点输出功率较低,直接提取此波长点进行倍频,理论上可以实现 532 nm 波长输出,但由于峰值功率低,加之倍频效率,直接将 1 064 nm (1 020 nm) 倍频到 532 nm (510 nm) 后与激光拍频难度较大。与其他基频光缺少合适的增益光纤不同,1 μm 波段可以级联接入掺 Yb 光纤放大器,通过对扩谱后的 1 μm 波段光谱成分进行放大后再倍频,从而提高光梳在此波长点的输出功率。本系统目前已在 532 nm 波长点处进行了方案验证。

掺 Er 光纤光梳输出的激光经过两级掺 Yb 光纤放大器进行功率放大。两级放大采用相同参数的增益光纤 (SCF-YB550-4/125-19, Coractive),其中一级放大器增益光纤长度为 27 cm,经过放大后脉冲平均功率为

390 mW, 二级放大器增益光纤长度为 23 cm, 放大后平均功率达到 601 mW。经过放大后, 整体功率集中在 1 μm 附近, 此后激光经光栅 (T-1000-3212-94, Lightsymth) 进行脉宽压缩, 压缩后脉宽 131.3 fs, 输出功率 485 mW。采用通光长度 40 mm 的多通道 PPLN 晶体 (MSHG1064-1-40, Coersion) 对放大后的 1 μm 激光进行倍频, 通过优化晶体工作温度点以及通道位置, 倍频后可实现 71 mW 的 532 nm 激光输出, 光谱如图 14 所示。进一步微调晶体控温, 可以实现输出光在 532 nm 附近小范围的波长调节。此输出光不仅可以满足 532 nm 激光的绝对频率测量需求, 还可以用于其他需要高稳定度、高功率 532 nm 激光的应用场景。

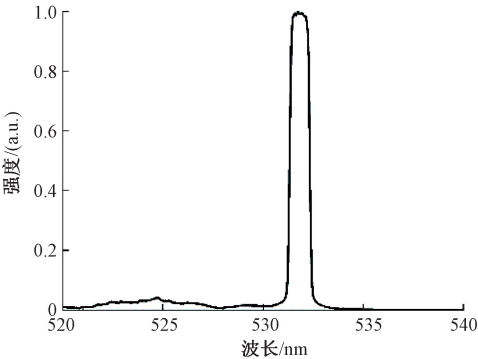


图 14 级联掺 Yb 放大器后倍频获得的光谱

Fig. 14 Spectra obtained by frequency doubling after cascading the Yb-doped amplifiers

4 光梳与不同频率激光的连接

为了验证掺 Er 光纤光梳对不同激光的拍频和计数效果, 解决光梳对激光频率测量的“最后一公里”问题, 掺 Er 光纤光梳对各个波长激光的拍频采用模块化设计。本系统建立了可见光波段拍频模块和近红外光拍频模块。其中可见光拍频模块可用于掺 Er 光纤光梳与 532、633、698、729 和 780 nm 等激光进行分时切换拍频, 探测器采用硅 (Si) 光电二极管 (C5658, Hamamatsu)。近红外光拍频模块可用于掺 Er 光纤光梳与 1 064 nm、1 542 nm、2 μm 等激光进行分时切换拍频, 其中探测器采用铟镓砷 (InGaAs) 光电二极管 (ET3000A, EOT)。

掺 Er 光纤光梳与待测激光拍频模块的光路, 如图 15 所示。掺 Er 光纤光梳输出的激光通过高反镜与待测激光在偏振分光镜 (polarization beam splitter, PBS) 上进行合束。两路光分别通过 1/2 波片进行偏振旋转, 形成相互垂直的偏振状态。从第 1 个 PBS 透射的光再次经过 1/2 波片使两束光在同一偏振状态下存在投影, 此后通过第 2 个 PBS 形成具有一致的偏振状态。利用反射式光

栅将光谱成分空间分开, 选取待测激光的频率成分通过高反镜耦合进入探测器 (photodetector, PD) 中。为了保证两路光在探测器接收处具有较小光斑, 在探测器前加一焦距为 100 mm 的透镜 (L)。由于两个拍频模块探测器前采用了光栅滤波, 因此不同波长入射时, 需要微调光栅角度以保证待测激光准确地耦合进入探测器中。

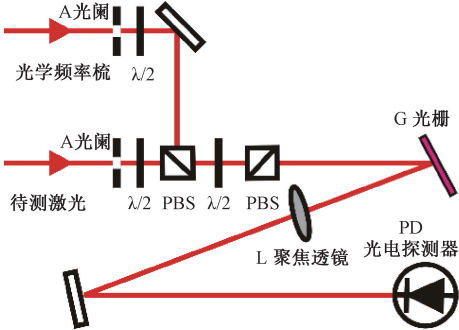


图 15 掺 Er 光纤光梳与待测激光的拍频光路结构图
Fig. 15 Optical scheme of the beat note module between the Er-FOFC and the measured laser

通过对掺 Er 光纤光梳输出激光以及待测激光的偏振态、光谱形状、功率、空间重合等参数进行系统优化, 在 100 kHz 分辨率带宽下掺 Er 光纤光梳与 532 nm、633 nm、698 nm、729 nm、780 nm、1 064 nm、1 542 nm、2 μm 激光拍频信噪比如图 16 所示。为了便于比较, 将各个波长激光拍频信号的基底进行处理形成了共同基底, 同时对拍频信号的频率进行了调整。目前 633 nm 激光拍频信号信噪比在 30 dB 附近, 其他几个波长的拍频信号信噪比在 35~40 dB 之间。

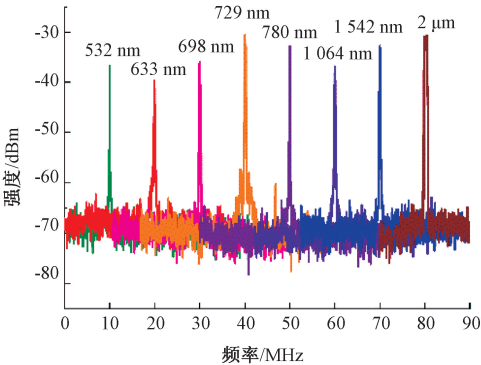


图 16 掺 Er 光纤光梳与不同波长激光的拍频信号
Fig. 16 Beat note signals between the Er-FOFC and the measured laser at different wavelengths

由于掺 Er 光纤光梳稳定度高, 特别是全光纤的扩谱放大结构, 使得扩谱后光谱非常稳定, 与待测激光拍频信号信噪比保持恒定, 可以满足数天以上长时间的连续监测。

5 光梳对激光频率参数的测量

5.1 掺 Er 光纤光梳对稳频激光绝对频率的测量

光学频率测量是光梳的重要应用之一。对于任何未知频率的连续激光,只要其频率在光梳的输出光谱范围内,则可通过式(1)计算出激光的频率值。

常用的需要测量绝对频率的激光如(2)部分中提到的第1类:锁定到原子或分子吸收谱线的激光以及第3类:锁定到离子阱囚禁的单离子或光晶格囚禁的多个中性原子的窄线宽光频跃迁的激光。

第1类激光的频率不确定度在 $10^{-8} \sim 10^{-12}$ 量级,而当光梳溯源至喷泉钟或国际喷泉钟组时,参考源的不确定度可以达到 10^{-16} 量级,氢钟到 SI 秒定义链路不确定度优于 5×10^{-16} 。对激光进行频率测量时,链路和参考源引入的不确定度可以忽略。而对于第3类激光,其频率稳定性和频率不确定度可达 10^{-18} 量级。因此参考源、传递链路、频率综合器、激光器连续工作时段等因素引入的不确定度和偏差都必须给予考虑^[54]。

利用该系统对锁在具有国际推荐值的分(原)子特定吸收线上的激光进行绝对频率测量,以验证测量结果是否真实有效。乙炔($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$)的 $\text{P}(16)(\nu_1 + \nu_3)$ 吸收线的国际推荐值为 $194\,369\,569\,384 \pm 5$ kHz,不确定度 2.6×10^{-11} 。本文选取 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频的 1 542 nm 激光(Stabilaser 1 542 ϵ , DFM)作为验证。在稳频系统中, $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频的 1 542 nm 激光中声光调制器移频 80 MHz。在判断 f_0 和 f_b 前符号的基础上,通过记录 f_b 值,利用式(1)可以得到待测激光的绝对频率。此后,去除待测激光中声光调制器移频后,可以得到 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 的 $\text{P}(16)(\nu_1 + \nu_3)$ 吸收线的频率值。

对于 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频 1 542 nm 激光,每秒采集一个拍频数据,每次测量采样时长为 10 000 s。光梳重复频率 $f_r = 199\,972.878\,8$ kHz,载波包络偏移频率 $f_0 = 20\,000$ kHz,单次拍频频率的平均值 $f_b = 70\,623.408\,32$ kHz。由 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频 1 542 nm 激光频率的国际推荐值可计算出梳齿序数 $N = 971\,979$ 。由此可以得出 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 的 $\text{P}(16)(\nu_1 + \nu_3)$ 吸收线的频率为 $194\,369\,569\,386.554$ kHz。在此基础上,本文在一定时期内,分别重复 10 次测量,测量结果的平均值为 $194\,369\,569\,386.497$ kHz,标准偏差 0.021 kHz,如图 17 所示。该测量值符合国际推荐值 $194\,369\,569\,384 \pm 5$ kHz 的不确定度范围之内。

对于 729 nm 激光,该激光锁定在钙离子的跃迁谱线上^[54],系统不确定度可以达到 1.3×10^{-17} 。采用光梳测量该激光时,以 1 s 采样间隔连续记录 84 672 个点,计算得到的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 18 所示,其中

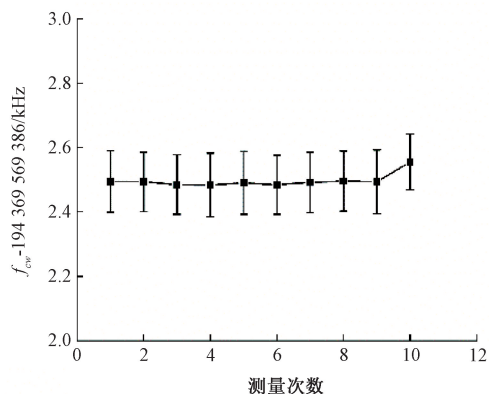


图 17 掺 Er 光纤光梳对 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 的 $\text{P}(16)(\nu_1 + \nu_3)$ 吸收线的频率测量

Fig. 17 Frequency measurement of $\text{P}(16)(\nu_1 + \nu_3)$ absorption line frequency of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$

1 s 稳定度可以达到 9.85×10^{-14} 。由于激光的稳定度高于参考源的稳定度,因此测量的结果受限于微波参考源。对上述激光器的测量主要是获得激光的绝对频率。

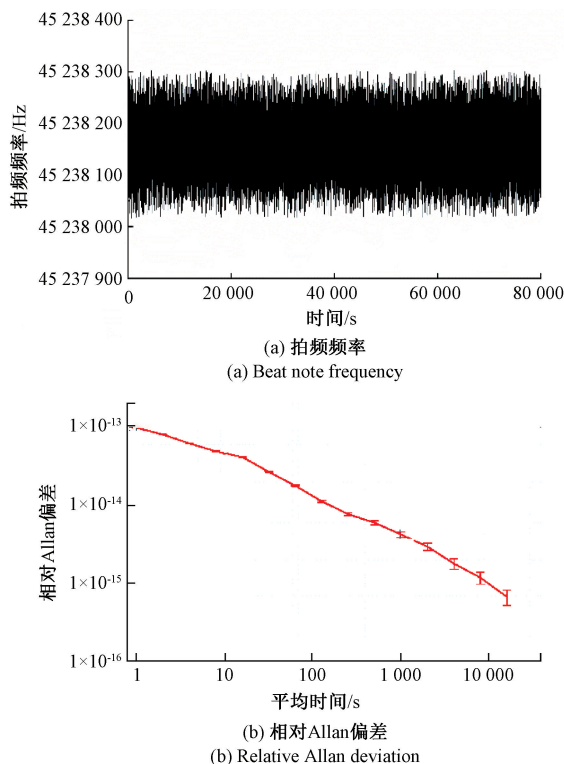


图 18 掺 Er 光纤光梳对 729 nm 激光的频率测量

Fig. 18 Optical frequency measurement of 729 nm laser with the Er-FOFC

采用光梳对一台可搬运小型化钙离子光钟进行了 35 天的长时间频率测量,直接测量结果为 $411\,042\,129\,776\,424.167(51)$ Hz,经过链路参数修正,参考的国际 SI 喷泉钟组的测量值为 $411\,042\,129\,776\,400.15(22)$ Hz,不确定度 5.3×10^{-16} ^[55]。对另一台钙离子光

钟进行绝对频率测量, 获得的结果为 411 042 129 776 400. 41(23) Hz, 不确定度 5.6×10^{-16} [56]。2023 年进一步提升至 411 042 129 776 400. 26(13) Hz, 不确定度 3.2×10^{-16} [57]。

5.2 多台掺 Er 光纤光梳对同一激光频率测量

为了验证光梳对激光频率测量的一致性, 采用多台掺 Er 光纤光梳同时测量一台激光频率进行验证。考虑掺 Er 光纤光梳的直接输出光谱范围, 被测对象仍选取 5.1 中所使用的 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频激光器。该激光输出激光一分三路, 分别进入 3 个光梳的拍频模块, 调节拍频模块, 使得拍频信号信噪比保持在 40 dB。

3 个光梳为完全独立的状态, 采用相同的 10 MHz 氢钟信号作为外参考, 在相同的时间段内同时记录各自的拍频值, 从而获取每个光梳对激光器频率的测量结果。

3 个光梳的重复频率分别为 200.998、190.996 和 199.972 MHz, 尽管 3 个光梳的重复频率不一致, 锁定状态也并非完全一样, 如 3 个光梳测量出的结果的标准差分别为 91.79、56.78 和 57.66 Hz, 但同一时间段所获得的平均值相差在 ± 1 Hz, 如图 19 所示。该误差一方面由于 3 个光梳采用的计数器的测量精度有关, 另一方面 3 个光梳采样的计数器并不能保持完全一致, 考虑 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$

稳频激光器自身的不确定度影响, 可以认为对该数量级指标激光器的频率测量, 常规锁定操作可以满足测量需求。

5.3 掺 Er 光纤光梳对激光短期稳定度测量

由于参考源的秒稳定度优于 1×10^{-13} , 当待测激光的稳定度高于参考源的稳定度时, 所测量的结果会受限于参考源。这时的测量更多的是为了得到激光绝对频率或监测激光频率漂移。当待测激光的稳定度低于参考源的稳定度时, 所测量的结果体现为待测激光的稳定度。这时的测量除了可以得到激光绝对频率或监测激光频率漂移, 还可以得到激光的稳定度。更高指标频率稳定度测量可以采取 5.4 所述的以光学频率作为参考进行测量。

对于所测量的 633 nm 激光采用一台热稳频激光。以 1 s 采样间隔连续记录 13 291 个点, 在测量时间内, 数据散发约为 4 MHz, 计算得到的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 20 所示, 其中 1 s 稳定度为 7.01×10^{-10} , 如图 20 所示。由于激光器稳定度远低于参考源稳定度, 因此可以认为测量结果直接体现为热稳频 633 nm 激光的稳定度。

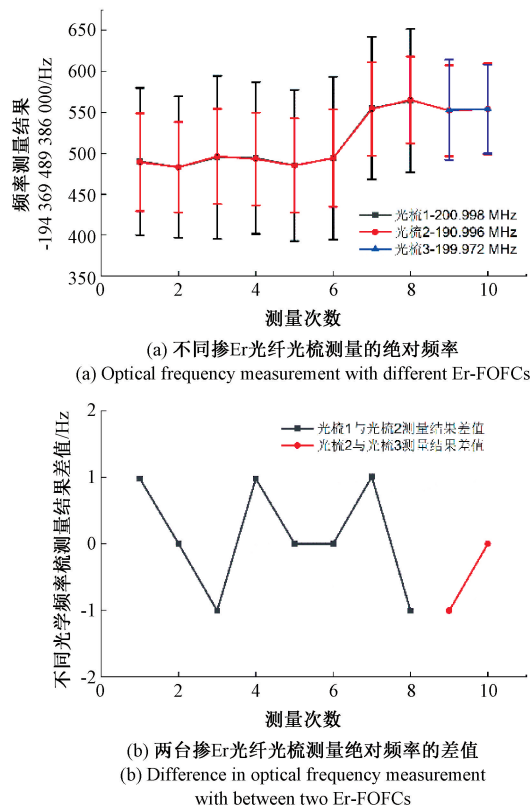


图 19 不同掺 Er 光纤光梳对同一台激光测量结果
Fig. 19 Measurement results difference of the same laser with different Er-FOFCs

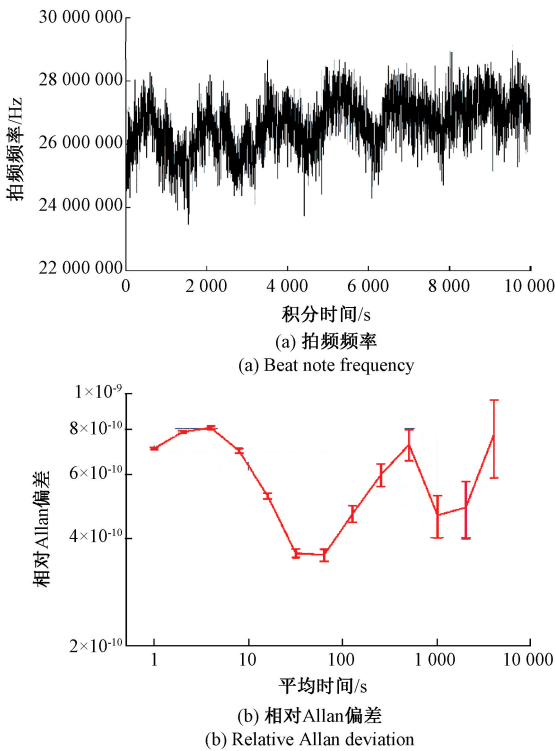


图 20 掺 Er 光纤光梳对 633 nm 激光的频率测量
Fig. 20 Optical frequency measurement of 633 nm laser with the Er-FOFC

对于 780 nm 激光, 该激光锁定到了参考到秒级稳定度为 10^{-12} 量级铷钟的光梳上。采用本光梳测量 780 nm 激光时, 以 1 s 采样间隔连续记录 14 396 个点, 计算得到

的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 21 所示,其中 1 s 稳定度为 6.18×10^{-12} ,体现为 780 nm 激光的稳定度。

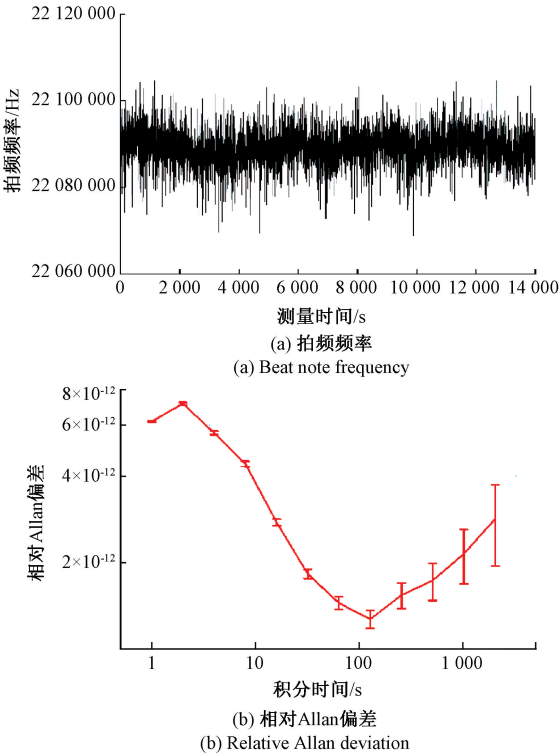


图 21 掺 Er 光纤光梳对 780 nm 激光的频率测量
Fig. 21 Optical frequency measurement of 780 nm laser with the Er-FOFC

5.4 掺 Er 光纤光梳对激光频率漂移率的测量

对于锁定在高 Q 值的 F-P 腔上的激光,由于腔长的变动直接影响输出激光频率漂移,对激光频率漂移的测量不仅可以完成对锁定系统的优化,也可以在一定程度上评价出腔本身的控温、隔振效果。

对于 698 nm 和 1 542 nm 激光,测量时这两个激光都只锁定到了高 Q 值的 F-P 腔上。对 698 nm 激光测量时,以 1 s 采样间隔连续记录 20 221 个点,计算得到的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 22 所示。由于在测量期间 698 nm 激光的参考腔腔内控温还未达到平衡,因此锁定后的激光频率漂移较大,其线性漂移约为 6 Hz/s,1 s 稳定度为 3.5×10^{-13} 。

对 1 542 nm 激光测量时,以 1 s 采样间隔连续记录 5 671 个点,计算得到的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 23 所示。从图中可以得到 1 542 nm 激光线性漂移约为 0.05 Hz/s,1 s 稳定度为 1.42×10^{-13} 。

对于 CO₂ 稳频的 2 μm 激光,MHz 以下量级的频率异常波动很难通过波长计进行分辨,而基于光梳的频率特性测量可以给出 Hz 位置处激光频率的变动,为锁频激光参数的评价以及更高指标的优化提供参考。图 24 给

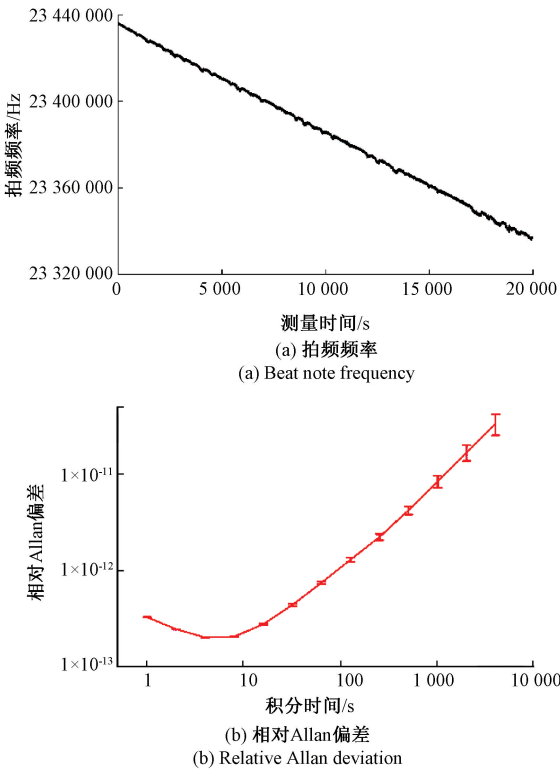


图 22 掺 Er 光纤光梳对 698 nm 激光的频率测量
Fig. 22 Optical frequency measurement of 698 nm laser with the Er-FOFC

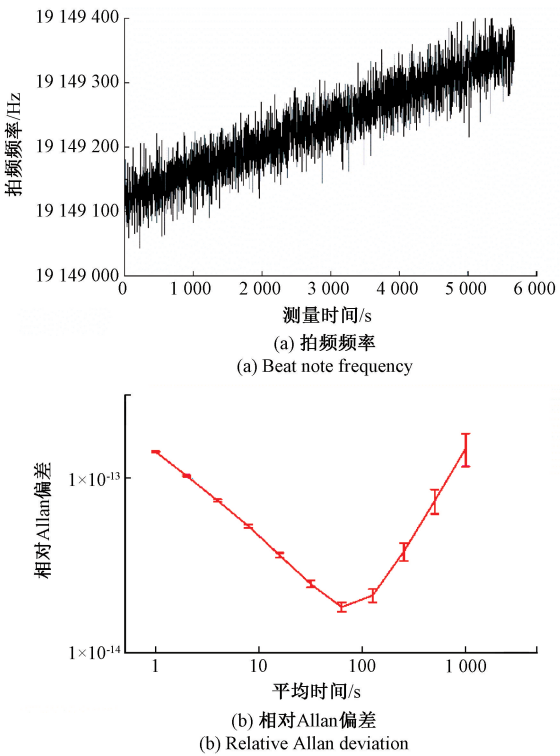


图 23 掺 Er 光纤光梳对 1 542 nm 激光的频率测量
Fig. 23 Optical frequency measurement of 1 542 nm laser with the Er-FOFC

出了采用光梳对一台 CO_2 稳频的 $2\ \mu\text{m}$ 激光的频率特性测量结果,从图中可以看出,反馈电路的周期震荡直接体现在激光拍频上,变动幅度达到 $4\ \text{MHz}$ 。

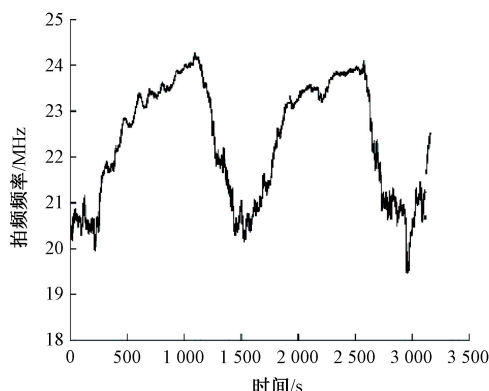


图 24 掺 Er 光纤光梳对 $2\ \mu\text{m}$ 激光的频率测量

Fig. 24 Optical frequency measurement of $2\ \mu\text{m}$ laser with the Er-FOFC

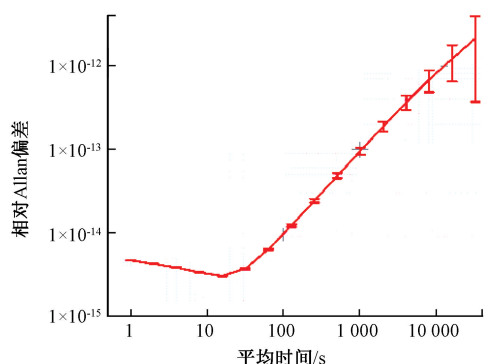
5.5 掺 Er 光纤光梳对激光线宽的测量

在光梳加入快速反馈器件,实现光梳向窄线宽激光的锁定,从而实现光梳齿线宽的压窄。为了验证光梳齿线宽压窄效果,光梳与锁定激光波长不同的窄线宽激光拍频获取拍频信号 f_{b2} ,取线性坐标 3 dB 处宽度。本实验中光梳锁定激光为一台 $698\ \text{nm}$ 窄线宽激光,其频率稳定度在 10^{-16} 量级^[58],验证测量用的激光为 $1542\ \text{nm}$ 窄线宽激光。经过对光梳 f_0 和 f_{b1} 锁定系统环路参数的综合调试和优化, f_0 和 f_{b1} 信号可以实现长时间的同时锁定。

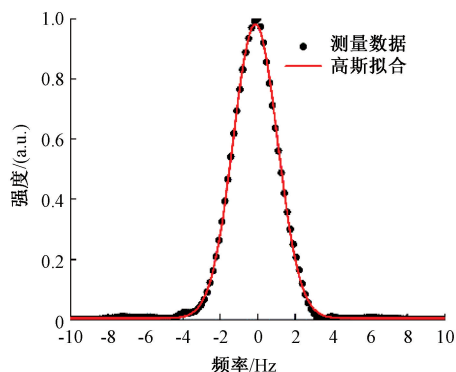
由于在实验过程中, $698\ \text{nm}$ 激光和 $1542\ \text{nm}$ 激光都只是锁定在参考腔上,不可避免地存在着激光漂移。本实验目前只关心锁定后的线宽和秒级稳定度。对 $1542\ \text{nm}$ 窄线宽激光进行长时间测量时,以 $1\ \text{s}$ 采样间隔连续记录 227 182 个点,计算得到的拍频信号的相对 Allan 偏差曲线如图 25(a) 所示,其中 $1\ \text{s}$ 稳定度为 4.72×10^{-15} 。

光梳向 $698\ \text{nm}$ 窄线宽激光锁定后,其与 $1542\ \text{nm}$ 窄线宽激光拍频信号 f_{b2} 如图 25(b) 所示。在线性坐标下,采用高斯曲线拟合,其梳齿半高全宽为 $2.38\ \text{Hz}$ 。这说明光梳在 $1542\ \text{nm}$ 波长处梳齿线宽不低于 $2.38\ \text{Hz}$,即当光梳在 $698\ \text{nm}$ 梳齿处锁定至于 Hz 量级激光器时,梳齿的窄线宽特性可以跨越 $780\ \text{nm}$ 波长宽度,实现在 $1542\ \text{nm}$ 处的 Hz 量级线宽的梳齿输出。

由于在本实验中光梳、 $698\ \text{nm}$ 窄线宽激光、 $1542\ \text{nm}$ 窄线宽激光处于不同实验室,分别通过 50 和 $30\ \text{m}$ 长的保偏光纤传输至光梳所在光学平台,并且尚未对传输过程中的激光进行消噪声处理,因此 $2.38\ \text{Hz}$ 的拍频线宽



(a) 相对Allan偏差
(a) Relative Allan deviation



(b) 梳齿线宽
(b) Comb teeth linewidth

图 25 光梳对 $1542\ \text{nm}$ 窄线宽激光频率稳定性和线宽测量

Fig. 25 Measurement of frequency stability and linewidth of $1542\ \text{nm}$ narrow linewidth laser using the Er-FOFC

还包含光纤传输过程引入的噪声。后续通过加入消噪声系统,梳齿线宽有望得到进一步压窄。

在此基础上,采用相同的方式对镱离子光钟 E2 跃迁钟激光系统进行了评估。镱离子光钟 $436\ \text{nm}$ 四极跃迁的激发和探测倍频激光器的种子光 $871\ \text{nm}$ 激光锁定到超稳腔。超稳腔为 $10\ \text{cm}$ 长的 F-P 腔,真空为 $1 \times 10^{-5}\ \text{Pa}$,温控在 25°C ,置于主动隔振平台。运用 (pound-dreverhall, PDH) 稳频技术将激光器锁定。采用相同的方法进行频率计数和拍频线宽探测,在频率计数时连续记录 500 个点,计算得到 $1 \sim 100\ \text{s}$ 频率稳定度为 2×10^{-15} ,线宽小于 $0.5\ \text{Hz}$,达到了所用腔的热力学噪声极限,如图 26 所示。

6 结 论

近年来随着光纤制造技术和飞秒激光技术的成熟,以掺 Er 光纤光梳为代表的频率梳技术,逐步突破了光学频率测量领域,在长度测量、精密光谱分析、超低相位噪声微波频率产生、精密时间频率传递、温度测量等领域发

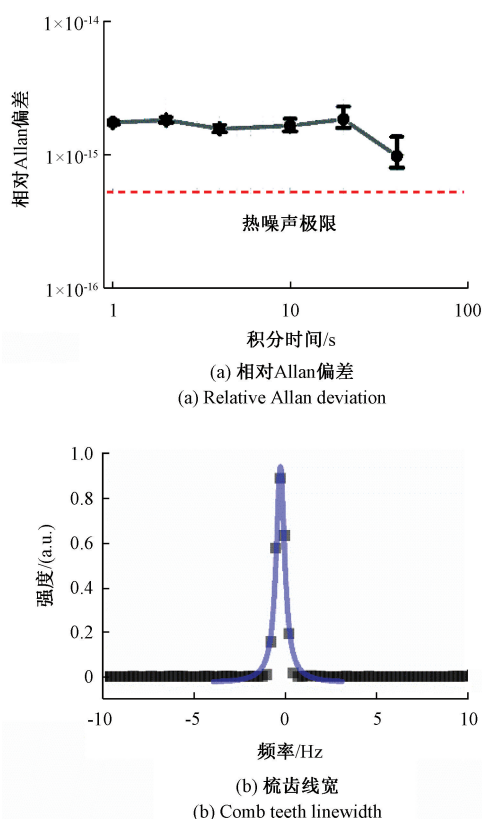


图 26 光梳对 871 nm 窄线宽激光频率稳定性和线宽测量
Fig. 26 Measurement of frequency stability and linewidth of 871 nm narrow linewidth laser using the Er-FOFC

挥出越来越重要的作用,已成为许多高端科研领域的基础性工具。

飞秒光梳的基本应用是解决激光频率参数的测量问题。以掺 Er 光纤光梳为代表的频率梳技术在激光频域参数测量方面的工作应用最为广泛。本文主要介绍了光学频率测量对光梳的要求,在实现光学频率稳定运转的前提下,通过 PCF 扩谱技术实现了 500~1 000 nm 的超连续光谱输出,通过高非线性光纤扩谱技术实现了 1 000~2 200 nm 的宽带光谱输出,通过单点倍频技术实现了在 532、633、698、729、780、871 和 934 nm 等多个波长点的输出。在以上光谱的基础上进一步与 532 nm、633 nm、698 nm、729 nm、780 nm、1 064 nm、1 542 nm、2 μ m 激光优于 30 dB 信噪比的拍频信号获取。

通过将掺 Er 光纤光梳锁定至微波频率验证了对热稳频 633 nm 激光、锁至光梳的 780 nm 激光的频率稳定度测量,对 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 稳频 1 542 nm 激光、钙离子光钟的 729 nm 激光的绝对频率测量,对锁定至 F-P 腔的 698 nm 激光、1 542 nm 激光的频率漂移测量。通过将掺 Er 光纤光梳锁定至光学频率验证了对锁定至 F-P 腔的 1 542 nm 激光和 871 nm 激光的短期稳定性和线宽测量结果。本

文的工作在技术上满足激光频率特性参数测量的需求,为激光绝对频率、频率漂移、线宽等参数的测量提供基础性测量工具。

总之,飞秒光梳已成为迄今为止最有效的光学频率测量手段。飞秒光梳可测频率稳定度、准确度和线宽,取决于参考源。目前已验证的飞秒光梳可测频率范围:500~2 000 nm;频率稳定度和准确度为 10^{-16} 量级;线宽为 Hz 量级。对于 10^{-14} 量级以下稳定度的激光测量,可以采取微波频率作为参考,更高频率稳定度测量,可采用光学频率作为参考。飞秒光梳扩谱后光谱的相干性,以及通过光学方法实现高信噪比拍频信号输出仍是应用难点。关于飞秒光梳的仪器校准以及关于飞秒光梳使用的标准规范目前还有待形成,以确保在频率参数测量过程中的规范性和统一性。

致谢

此文感怀李天初院士在时间频率领域做出的卓越贡献,特别是长期以来他对飞秒光学频率梳研制、评测以及飞秒光学频率梳在时间频率和其他诸多领域应用的方向指引和总体指导。

参考文献

- [1] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology [J]. Nature, 2002, 416 (6877): 233-237.
- [2] 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.
- [3] KUSE N, FERMAN M E. Electro-optic comb based real time ultra-high sensitivity phase noise measurement system for high frequency microwaves [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 2847.
- [4] GAETA A L, LIPSON M, KIPPENBERG T J. Photonic-chip-based frequency combs [J]. Nature Photonics, 2019, 13: 158-169.
- [5] HALL J. Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6 (6): 1136-1144.
- [6] 李岩, 光频梳在精密测量中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1841-1858.
- LI Y. Precision measurement and spectroscopic applications of femtosecond optical frequency combs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8):

- 1841-1858.
- [7] YOKOYAMA S, YOKOYAMA T, HAGIHARA Y, et al. A distance meter using a terahertz intermode beat in an optical frequency comb [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17324-17337.
 - [8] SCHLIESSER A, BREHM M, KEILMANN F, et al. Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9029-9038.
 - [9] MILLO J, BOUDOT R, LOURS M, et al. Ultra-low-noise microwave extraction from fiber-based optical frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3707-3709.
 - [10] GIORGETTA F, SWANN W, SINCLAIR L, et al. Optical two-way time and frequency transfer over free space[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 434-438.
 - [11] YANG K G, LI H, GONG H, et al. Temperature measurement based on adaptive dual-comb absorption spectral detection [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(5): 051401.
 - [12] UDEM T, REICHERT J, HOLZWARTH R. Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 Line with a mode-locked laser[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(18): 3568-3571.
 - [13] HACHISU H, PETIT G, NAKAGAWA F, et al. SI-traceable measurement of an optical frequency at the low 10^{-16} level without a local primary standard [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8511-8523.
 - [14] MCGREW W F, ZHANG X, LEOPARDI H, et al. Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit [J]. *Optica*, 2019, 6(4): 448-454.
 - [15] NEMITZ N, GOTOH T, NAKAGAWA F, et al. Absolute frequency of ^{87}Sr at 1.8×10^{-16} uncertainty by reference to remote primary frequency standards [J]. *Metrologia*, 2021, 58(2): 025006.
 - [16] LUO L, QIAO H, AI D, et al. Absolute frequency measurement of an Yb optical clock at the 10^{-16} level using International Atomic Time [J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065017.
 - [17] REICHERT J, HOLZWARTH R, UDEM T, et al. Measuring the frequency of light with mode-locked lasers [J]. *Optics Communications*, 1999, 172: 59-68.
 - [18] LEA S N, ROWLEY W R C, MARGOLIS H S, et al. Absolute frequency measurements of 633 nm iodine-stabilized helium-neon lasers [J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 84-88.
 - [19] MARIAN A, STOWE M C, FELINTO D, et al. Direct frequency comb measurements of absolute optical frequencies and population transfer dynamics [J]. *Physical Review Letters*. 2005, 95(2): 023001.
 - [20] HAMID R, SAHIN E, CELIK M, et al. 10^{-12} level reproducibility of an iodine-stabilized He-Ne laser endorsed by absolute frequency measurements in the BIPM and UME [J]. *Metrologia*, 2006, 43(1): 106-108.
 - [21] STONE J A, EGAN P. An optical frequency comb tied to GPS for laser frequency/wavelength calibration [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2010, 115(6): 413-431.
 - [22] 方占军, 王强, 王民明, 等. 飞秒光学频率梳和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量 [J]. *物理学报*, 2007, 56(10): 5684-5690.
 - FANG ZH J, WANG Q, WANG M M, et al. Femtosecond frequency comb and optical frequency measurement of 532 nm Nd:YAG laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5648-5690.
 - [23] 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 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.
 - CAO SH Y, CAI Y, WANG G ZH, et al. Precise frequency control of an Er-doped fiber comb [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 134205.
 - [24] CAO S Y, LIN B K, HAN Y, et al. Narrow-linewidth frequency transfer from 698 nm to 1 542 nm based on Er-doped fiber optical frequency comb [J]. *Optics Communications*, 2022, 524: 128792.
 - [25] ZHANG J, LU Z H, WANG Y H et al. Exact frequency comb mode number determination in precision optical frequency measurements [J]. *Laser Physics*, 2007, 17(7): 1025-1028.
 - [26] 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.
 - [27] SCHIBLI T R, HARTL I, YOST D C, et al. Optical frequency comb with submillihertz linewidth and more than 10 W average power [J]. *Nature Photonic*, 2008,

- 2; 355-359.
- [28] NICOLODI D, ARGENCE B, ZHANG W, et al. Spectral purity transfer between optical wavelengths at the 10^{-18} level[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 219-223.
- [29] HUDSON D D, HOLMAN K W, JONES R J, et al. Mode-locked fiber laser frequency-controlled with an intracavity electro-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2948-2950.
- [30] IWAKUNI K, INABA H, NAKAJIMA Y, et al. Narrow linewidth comb realized with a mode-locked fiber laser using an intra-cavity waveguide electro-optic modulator for high-speed control [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13769-13776.
- [31] NAKAMURA T, TANI S, ITO I, et al. Magneto-optic modulator for high bandwidth cavity length stabilization[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4994-5000.
- [32] TRAVIS C B, DYLAN C YT, ARMAN C, et al. Simple piezoelectric-actuated mirror with 180 kHz servo bandwidth[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9739-9746.
- [33] HÄNSEL W, GIUNTA M, LEZIUS M, et al. Electro-optic modulator for rapid control of the carrier envelope offset frequency [C]. 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, United States, 2017.
- [34] BERNARD J E, MADEJ A A, SIEMSEN K J, et al. Absolute frequency measurement of the HeNe/I₂ standard at 633 nm [J]. *Optics Communications*, 2001, 187: 211-218.
- [35] NEVSKY A Y, HOLZWARTH R, REICHERT J, et al. Frequency comparison and absolute frequency measurement of I₂ - stabilized lasers at 532 nm [J]. *Optics Communications*, 2001, 192: 263-272.
- [36] CÉREZ P, BENNETT S J. Helium-neon laser stabilized by saturated absorption in iodine at 612 nm[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(7): 1079-1083.
- [37] FREDIN-PICARD S, RAZET A. On the hyperfine structure of ¹²⁷I₂ lines at the 543 nm wavelength of the He-Ne laser [J]. *Optics Communications*, 1990, 78(2): 149-152.
- [38] BALLING P, FISCHER M, KUBINA PH, et al. Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1 542 nm: Acetylene-stabilized DFB laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9196-9201.
- [39] CURTIS E A, BRADLEY T, BARWOOD G P, et al. Laser frequency stabilization and spectroscopy at 2051 nm using a compact CO₂-filled Kagome hollow core fiber gas-cell system[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28621-28633.
- [40] STRANGFELD A, WIEGAND B, KLUGE J, et al. Compact plug and play optical frequency reference device based on Doppler-free spectroscopy of rubidium vapor[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 12039-12047.
- [41] LEMKE N D, MARTIN K W, BEARD R, et al. Measurement of optical rubidium clock frequency spanning 65 days[J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 1982.
- [42] GUSCHING A, MILLO J, RYGER I, et al. Cs microcell optical reference with frequency stability in the low 10^{-13} range at 1 s[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(6): 1526-1529.
- [43] HE L, ZHANG J, WANG Z, et al. Ultra-stable cryogenic sapphire cavity laser with an instability reaching 2×10^{-16} based on a low vibration level cryostat [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(10): 2519-2522.
- [44] DIDIER A, IGNATOVICH S, BENKLER E, et al. 946 nm Nd:YAG digital-locked laser at 1.1×10^{-16} in 1 s and transfer-locked to a cryogenic silicon cavity [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1781-1784.
- [45] MATEI D G, LEGERO T, HÄFNER S, et al. 1.5 μ m lasers with Sub-10 mHz linewidth [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(26): 263202.
- [46] YAN C, SHI H, YAO Y, et al. Automatic, long-term frequency-stabilized lasers with sub-hertz linewidth and 10^{-16} frequency instability [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(7): 070201.
- [47] BOTHWELL T, KEDAR D, OELKER E, et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18} [J]. *Metrologia*, 2019, 56(6): 065004.
- [48] BREWER S, CHEN J S, HANKIN A, et al. ²⁷Al + quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033201.
- [49] HUNTEMANN N, SANNER C, LIPPHARDT B, et al. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063001.
- [50] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the

- centimetre level [J]. *Nature*, 2018, 564 (7734): 87-90.
- [51] 刘欢, 曹士英, 孟飞, 等. 覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳[J]. *物理学报*, 2015, 64(9): 094204.
- LIU H, CAO SH Y, MENG F, et al. Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9): 094204.
- [52] FANG F, LI M S, LIN P W, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation[J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454-468.
- [53] LIU H, CAO S, MENG F, et al. Continuously tunable wavelength output from an Er-doped fiber femtosecond optical frequency comb with single-point frequency-doubling technique[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(7): 075105.
- [54] LIN Y, WANG Q, MENG F, et al. A ^{87}Sr optical lattice clock with 2.9×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 035010.
- [55] CAO J, YUAN J, WANG S, et al. A compact, transportable optical clock with 1×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(5): 054003.
- [56] HUANG Y, ZHANG H, ZHANG B, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca^+ optical clock[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(5): 058020 (R).
- [57] ZHANG H, HUANG Y, ZHANG B, et al. Absolute frequency measurements with a robust, transportable $^{40}\text{Ca}^+$ optical clock [J]. *Metrologia*, 2023, 60(3): 035004.

- [58] LI Y, LIN Y, WANG Q, et al. An improved strontium lattice clock with 10^{-16} level laser frequency stabilization[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 051402.

作者简介



韩羿, 2017 年于河南工业大学获得学士学位, 2020 年于华南师范大学获得硕士学位, 现为华南理工大学博士研究生, 主要研究方向为光纤激光器、非线性光学、飞秒激光频率梳。

E-mail: 18538025543@163.com

Han Yi received his B. Sc. degree from Henan University of Technology in 2017, and received his M. Sc. degree from South China Normal University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at South China University of Technology. His main research interests include fiber lasers, nonlinear optics, and femtosecond optical frequency comb.



曹士英(通信作者), 2001 年、2004 年和 2007 年分别于天津大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为中国计量科学研究院时间频率计量科学研究所研究员, 主要研究方向为飞秒光学频率梳及其应用。

E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

Cao Shiying (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Tianjin University in 2001, 2004, and 2007 respectively. He is currently a researcher at National Institute of Metrology. His main research interests include femtosecond optical frequency comb and the relative applications.