

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.04.12

# 基于光频梳的乙炔稳频 1542 nm 激光 波长测量研究

夏传青<sup>1</sup>, 武腾飞<sup>1</sup>, 曹士英<sup>2</sup>, 赵春播<sup>1</sup>, 邢帅<sup>1</sup>

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;

2. 中国计量科学研究院 时间频率计量研究所, 北京 100029)

**摘要:** 利用光频梳对稳频激光波长进行测量是建立基于光频梳的波长基标准的必经程序。为了建立基于光频梳的波长标准, 并为开展激光波长校准工作提供技术准备, 利用自研光纤光频梳对乙炔稳频 1542 nm 激光波长进行了测量。利用光频梳产生参考激光与待测激光差拍, 通过简单的代数关系获得了乙炔稳频激光的绝对频率和真空波长, 并与相应的国际推荐值进行了对比。实测获得的乙炔稳频激光的真空波长值为 1542.38 371 235 742 nm, 在 CIPM 给定的不确定度范围内, 秒稳定度为  $4.13 \times 10^{-13}$ 。两台不同的光频梳对乙炔稳频激光波长的测量结果具有高度一致性, 进一步证明了光频梳对激光波长的测量准确性。本研究对于顺应国际长度基标准发展趋势, 加速光频梳在激光波长测量领域的应用进程具有重要意义。

**关键词:** 计量学; 真空波长测量; 拍频; 稳频激光; 光学频率梳

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)04-0083-06

## Wavelength measurement of acetylene-stabilized laser at 1542 nm using optical frequency combs

XIA Chuanqing<sup>1</sup>, WU Tengfei<sup>1</sup>, CAO Shiyong<sup>2</sup>, ZHAO Chunbo<sup>1</sup>, XING Shuai<sup>1</sup>

(1. National key Laboratory of Science and Technology on Metrology &amp; Calibration, Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;

2. Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Wavelength measurement of frequency-stabilized lasers using optical frequency combs (OFC) is a necessary procedure to establish OFC-based wavelength standards. In order to establish the wavelength standard based on OFC and provide technical preparations for laser wavelength calibration, the wavelength of an acetylene-stabilized laser at 1542 nm was measured using a self-developed fiber OFC. By means of frequency beating between the reference laser generated by the OFC and the laser to be measured, the absolute frequency and vacuum wavelength of the acetylene-stabilized laser were obtained through simple algebraic relationship and were compared with the corresponding internationally recommended values. The measured vacuum wavelength of the acetylene-stabilized laser was 1542.38371235742 nm, within the uncertainty range given by CIPM. The stability was measured to be  $4.13 \times 10^{-13}$  in 1 s. The wavelength measurement results of the acetylene-stabilized laser by two different OFCs were highly consistent, which further proved the accuracy of OFC-based wavelength measurement. This research is of great significance for conforming to the international development trend of length standards, and will accelerate the application of OFCs in the field of laser wavelength measurement.

**Key words:** metrology; vacuum wavelength measurement; frequency beating; frequency stabilized laser; optical frequency comb

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 航空科学基金(2017ZD44003)

引用格式: 夏传青, 武腾飞, 曹士英, 等. 基于光频梳的乙炔稳频 1542 nm 激光波长测量研究[J]. 计测技术, 2022, 42(4): 83-88.

Citation: XIA C Q, WU T F, CAO S Y, et al. Wavelength measurement of acetylene-stabilized laser at 1542 nm using optical frequency combs [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(4): 83-88.



## 0 引言

激光波长以及绝对频率的测量是光钟研制<sup>[1]</sup>、光谱精细结构分析<sup>[2]</sup>、长度基本单位复现<sup>[3]</sup>、激光雷达调制非线性校准<sup>[4]</sup>等领域必不可少的步骤,在现代计量科学中占据重要位置。传统的测量激光绝对频率的方法依靠谐波频率链,通过多次频率转换、锁频锁相的过程,将光学频率变换到微波频率,该方法装置极其复杂庞大,难以操作与维护<sup>[5]</sup>。2000年前后,随着光学频率梳(简称光频梳)的成功研制,激光波长测量获得了新的有力工具。在频域中,光频梳分布着一系列等间隔分布的谱线,犹如频率标尺的“刻度”,基于其进行激光波长频率测量简单而便捷。

作为连接光学频率与微波频率的直接桥梁,光频梳可以把长度单位“米”直接溯源至时间单位“秒”,从而可以通过协调世界时实现不同地区的实时比对和等效互认;光频梳本身具有宽光谱的性质,在其光谱范围内可对多个波长进行测量与量值传递;光频梳测量的准确度与稳定度也非常高。随着科技的发展和工业水平的提高,人们对米单位复现的准确性要求越来越高,国际上出现了直接利用光频梳担任长度基标准的趋势,而不仅仅将光频梳单纯作为波长测量的简单工具,例如2009年,日本的国家长度基准由633 nm碘稳频激光改为光频梳,计量性能获得了大幅提升<sup>[6]</sup>。目前已经有越来越多的国家加入这一行列。

利用光频梳对已知稳频激光波长的测量验证是建立基于光频梳的波长基标准的必经程序。位于乙炔 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  P(16) ( $\nu_1+\nu_3$ ) 跃迁的1542 nm激光辐射于2001年由国际计量委员会(CIPM)推荐为复现米定义的激光辐射谱线之一<sup>[7]</sup>,其处于光纤通信的C波段,对于现代光纤通信器件与系统具有重要的意义。对乙炔稳频激光波长的精确测量一直是计量技术机构的重要研究课题<sup>[8-11]</sup>。本文利用自研的光纤光频梳实现对乙炔稳频1542 nm激光波长的精确测量,并与对应的国际推荐值进行比较,验证自研光频梳的测量能力,为未来开展基于光频梳的激光波长校准工作奠定技术基础。

## 1 基于光频梳的波长测量方法

基于光频梳的激光波长测量采用光学差拍的

原理,光频梳的某根梳齿谱线与待测激光进行差拍,根据拍频频率和光频梳的相关信息,即可通过简单的代数关系获得待测激光的波长,其原理如图1所示。待测激光的频率 $f$ 由图1中绿色线表示,它与光频梳的第 $N$ 根梳齿 $f_N$ 相差拍获得拍频频率 $f_b$ ,则待测激光的频率可表示为

$$f = Nf_r + f_0 + f_b \quad (1)$$

式中: $N$ 为梳齿序数,为正整数; $f_r$ 为光频梳的重复频率; $f_0$ 为光频梳的载波包络偏移频率,表征了梳齿频率对整数倍重复频率的偏离量。 $f_r$ 和 $f_0$ 是光频梳的两个自由度,当 $f_r$ 和 $f_0$ 锁定到微波频率标准后,光频梳就实现了锁定,其每一根梳齿均具有了和参考频率源同等的频率稳定度。

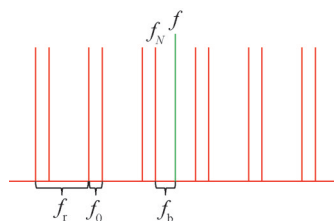


图1 基于光频梳的波长测量原理

Fig.1 Principle of wavelength measurement based on OFC

待测激光的真空波长值 $\lambda$ 可表示为

$$\lambda = c/f \quad (2)$$

式中: $c$ 为真空光速。在本文中,波长均指真空波长。

由于待测激光与它最近邻梳齿的相对位置不明以及光频梳载波相对包络的偏移不明,并且实验中获得的 $f_r$ ,  $f_0$ ,  $f_b$ 观测值总是非负数,故式(1)中待测激光频率更准确的表示形式为

$$f = Nf_r \pm f_0 \pm f_b \quad (3)$$

式(3)中梳齿序数 $N$ 和两个运算符的确定是实现基于光频梳的波长测量方法的关键。 $N$ 可以通过先验信息进行估算,或者通过高精度波长计提前对待测激光波长进行测量获取。本研究通过改变重复频率 $f_r$ ,观测拍频 $f_b$ 的变化量 $\Delta f_b$ 来计算 $N$ ,  $N = |\Delta f_b| / |\Delta f_r|$ 。采用如下方法确定式(3)中的运算符<sup>[12]</sup>:微调增大 $f_r$ ,如果 $f_b$ 增大,则 $f_b$ 前的运算符为“-”,如果 $f_b$ 减小,则 $f_b$ 前的运算符为“+”;随后微调增大 $f_0$ ,如果 $f_b$ 增大,则 $f_0$ 前的运算符与 $f_b$ 前的运算符相反,如果 $f_b$ 减小,则 $f_0$ 前的运算符与 $f_b$ 前的运算符相同。经过以上程序,

式(3)等号右侧的所有量和运算符均可确定。

根据上述测量原理,建立了如图2所示的测量装置。将光频梳作为参考激光,调整待测1542 nm 稳频激光的输出光束,使两者完全准直重合,产生差拍现象,由光电探测器进行探测。由于待测激光不仅与最近邻的光频梳梳齿拍频,也会与次近邻以及更远的梳齿拍频,为了获得基频拍频信号,光电探测器测得的信号首先经过截止频率为1/2重频的低通滤波器,经滤波后由频率计数器进行测量与采集。光频梳的重复频率 $f_r$ 、载波包络偏移频率 $f_0$ 也同时由频率计数器进行测量与采集。频率计数器的外标输入需和光频梳锁定采用相同的参考源。根据式(3)与式(2)即可计算得出待测1542 nm 稳频激光的真空波长值。

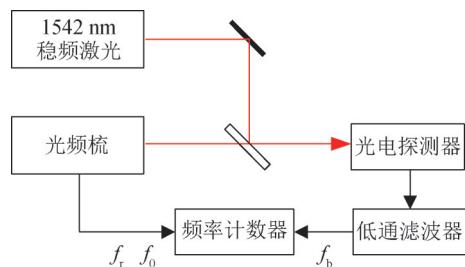


图2 激光波长测量装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of wavelength measurement system

## 2 自研光纤光频梳的基本情况

本研究采用的光频梳为自研的掺铒光纤飞秒光学频率梳<sup>[13]</sup>,实物系统如图3(a)所示。该光频梳光学系统由飞秒激光振荡器<sup>[14]</sup>、飞秒激光放大器<sup>[15]</sup>、超连续谱产生模块、重复频率和载波包络偏移频率探测模块<sup>[16]</sup>等部分组成,全部光学系统集成于50 cm × 38 cm × 13 cm的经特殊设计的箱体中,如图3(b)所示。光频梳控制装置组装在标准机柜内,包括自研的重复频率锁定模块和载波包络偏移频率锁定模块,以及频谱仪、示波器观察监测设备。相关装置的具体细节与工作状态参见课题组之前的工作<sup>[13-17]</sup>。光频梳振荡器重复频率为200 MHz,中心波长约为1560 nm,平均输出功率约20 mW,其输出光谱如图3(c)所示。可知光频梳的光谱范围较宽,涵盖稳频激光的1542 nm 波长,满足与稳频激光拍频的前提条件。

锁定后的光频梳才可成为一把精准的频率之

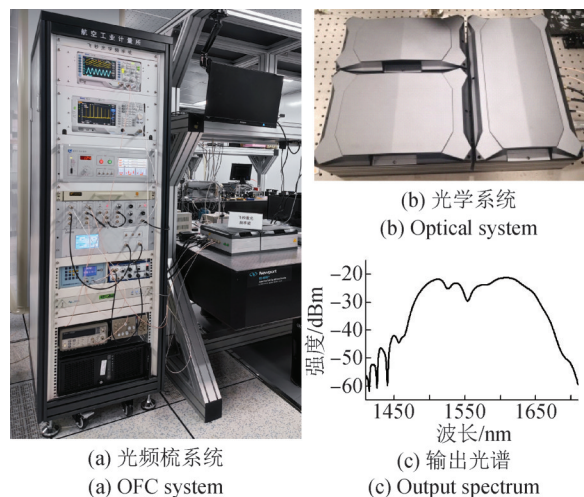


图3 光频梳实物系统与输出光谱

Fig.3 Actual system of OFC and its output spectrum

尺。频率梳的重复频率由飞秒激光振荡器内的压电陶瓷(PZT)通过改变激光器腔长而控制<sup>[17]</sup>,载波包络偏移频率由飞秒激光振荡器的泵浦驱动电流的大小来控制<sup>[16]</sup>。将重复频率和载波包络偏移频率分别与相应的参考频率鉴相,误差信号通过比例积分微分电路(PID)反馈到PZT与泵浦驱动电流上,实现锁定。

使用氢钟(型号为VCH-1003M Option L,编号为No. 4850)的10 MHz信号作为信号源的外标输入。该氢钟由中国计量科学研究所的铯原子喷泉钟周期性地校准,其频率稳定度优于 $1 \times 10^{-13}$  (1 s),溯源到SI基本时间单位的不确定度优于 $5 \times 10^{-16}$ 。信号源的输出信号作为重复频率和载波包络偏移频率锁定的直接参考频率。按文献所述方法<sup>[16-17]</sup>锁定光频梳,重复频率锁定到199 999 970 Hz上,载波包络偏移频率锁定到 $2 \times 10^7$  Hz上。重复频率和载波包络偏移频率分别通过频率计数器采集,频率计数器的闸门时间设置为1 s,共采集4500 s的数据,光频梳锁定后的频率计数结果如图4所示,其中 $\delta f_r$ 为重复频率相对其平均值的偏离量, $\delta f_0$ 为载波包络偏移频率相对其平均值的偏离量。

由图4(a)可知,锁定后重复频率的波动基本处于 $\pm 2 \times 10^{-4}$  Hz范围内,标准偏差为 $0.752 \times 10^{-4}$  Hz。以1 s采样时间的相对艾伦偏差表征其秒稳定度,重复频率的秒稳定度为 $3.99 \times 10^{-13}$ 。由图4(b)可知,锁定后载波包络偏移频率的波动基本处于 $\pm 0.1$  Hz范围内,标准偏差为0.034 Hz,秒稳定

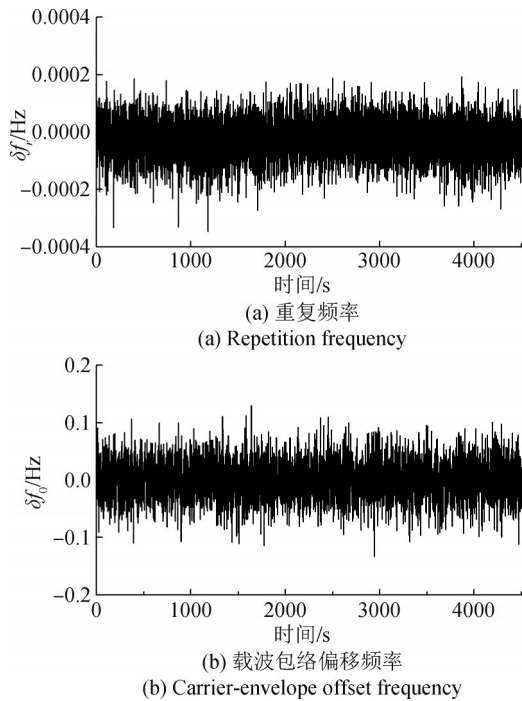


图4 光频梳锁定后的频率计数结果

Fig.4 Frequency counting results after OFC phase locking

度为  $1.79 \times 10^{-9}$ 。

载波包络偏移频率的稳定度远低于重复频率的稳定度，产生这种现象的原因在于：载波包络偏移频率的探测复杂且困难，涉及繁琐的光学过程，其信号本身就携带较多的噪声，对于锁定电路的带宽、灵敏度等要求也非常高。因此载波包络偏移频率锁定后的稳定度总是小于重复频率锁定后的稳定度。从深层次分析，重复频率对光频梳频率稳定度的影响远远大于偏移频率对光频梳频率稳定度的影响，且居于决定性地位。根据式(1)可知，偏移频率  $f_0$  前的系数为1，重复频率  $f_r$  前的系数为  $N \sim 10^6$ ，传导到光频后，偏移频率锁定稳定度的影响可忽略不计，因此光频梳的频率稳定度可直接由重复频率稳定度表示，为  $3.99 \times 10^{-13}$  (1 s)。就本例而言，偏移频率锁定效果导致的梳齿频率波动在0.2 Hz内（相对于光频小于  $1 \times 10^{-15}$ ），可完全满足本研究对波长测量的目的。

### 3 乙炔稳频激光波长测量结果

采用丹麦国家计量院 (DFM) 制造的乙炔稳频激光器 (型号为 Stabilaser 1542) 产生激光，作为波长测量的对象。该激光器基于紧凑型超低噪声光纤激光研制，在 1542.3837 nm 处稳定到乙炔

$^{13}\text{C}_2\text{H}_2\text{P} (16) (\nu_1 + \nu_3)$  跃迁谱线上，满足 CIPM 关于推荐标准频率的条件，可以直接引用 CIPM 的推荐值，并按给定的不确定度使用。乙炔稳频激光国际推荐值绝对频率  $f = 194\,369\,569\,384 (5)$  kHz，波长  $\lambda = 1\,542\,383\,712.38 (4)$  fm，相对标准不确定度  $u_c/f = 2.6 \times 10^{-11}$ 。需要注意的是，由于该激光器内部声光调制器 (AOM) 的作用，激光输出时移频了 80 MHz，最终计算乙炔谱线稳频的激光绝对频率时，需要再加上 AOM 的调制频率。

按上文所述方法进行波长测量。搭建如图2所示的实验光路，稳频激光与光频梳在分束器上重合，调整光路准直后，获得合光光束，利用光电探测器 (型号为 ET3000A) 进行探测。参与拍频的 1542 nm 波长成分来自光频梳的掺铒光纤振荡器，功率约为 10 mW。由于光频梳中仅有 1542 nm 处极窄谱段与乙炔稳频激光产生拍频，为了降低背景噪声，提高拍频信号信噪比，在探测器前端利用光栅作为滤光元件滤出 1542 nm 成分。调整光路准直与偏振，提高拍频信号幅度。探测器输出的射频谱如图5所示，除 200 MHz 的重复频率信号外，中间的两个信号分别为  $f_0$  信号和  $f_r - f_0$  信号，可知拍频信号的信噪比达到 35 dB 以上，满足频率计数器对输入信号信噪比的要求。利用截止频率为 100 MHz 的低通滤波器滤出拍频信号  $f_0$ ，输入到频率计数器中。

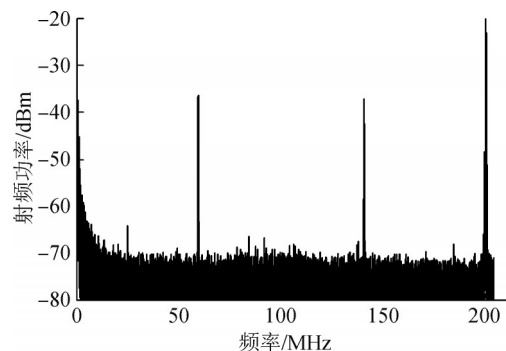


图5 拍频信号的射频谱

Fig.5 RF spectrum of beating signal

将频率计数器的闸门时间设为 1 s，连续采集 3000 s 的拍频数据，拍频的频率计数结果如图6所示。在本次 3000 s 的测量时间内，拍频频率的平均值为 61 457.841 kHz，标准偏差为 72.12 Hz。按本文第1节中所述的方法，确定了与乙炔稳频激光拍频的最近邻梳齿的梳齿序数  $N$  为 971 848，判明了

式(3)中两处符号均为减号。经计算乙炔稳频激光的绝对频率为194 369 569 386 719 Hz。

根据式(2)计算可得乙炔稳频激光的真空波长为1542.38 371 235 742 nm。绝对频率与真空波长的测量结果均在CIPM给定的不确定度范围内。

根据图6还可获得该乙炔稳频激光的频率稳定度,其秒稳定度为 $4.13 \times 10^{-13}$ ,与光频梳重复频率的稳定度相似。这说明对乙炔稳频激光频率稳定度的测量受限于光频梳自身的稳定度:利用本例中的光频梳对乙炔稳频激光频率稳定度的测量难以完全体现乙炔稳频激光应有的稳定性水平。

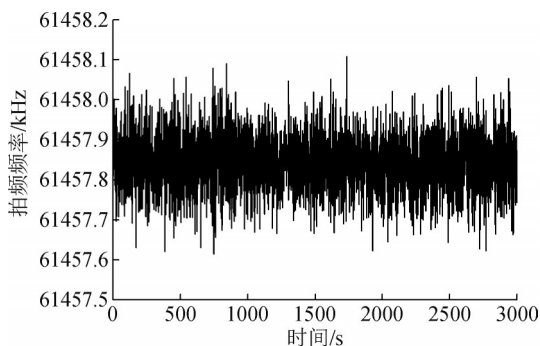


图6 拍频的频率计数结果

Fig.6 Frequency counting results of  $f_b$

为了进一步验证光频梳对激光波长的测量能力,采用两台光频梳同时对同一台乙炔稳频激光器产生的激光进行波长测量。其中一台光频梳即为上文使用的这台(记为CIMM光频梳),另一台为中国计量科学研究院时间频率计量研究所研制的光频梳,重复频率约为201 MHz(记为NIM光频梳)。两台装置的工作原理相同,由两个单位各自独立搭建。利用CIMM光频梳与NIM光频梳同时对乙炔稳频激光的真空波长进行测量,将乙炔稳频激光的输出通过分束器一分为二,两台光频梳各自采用如图2所示的装置同时进行测量,测量方法以及处理步骤与上文相同,三次测量结果如表1所示。

表1 波长测量结果

Tab.1 Wavelength measurement results

测量次数	测量结果/nm CIMM光频梳	测量结果/nm NIM光频梳
1	1542.38 371 235 742	1542.38 371 235 922
2	1542.38 371 235 746	1542.38 371 235 923
3	1542.38 371 235 747	1542.38 371 235 919

由表1可知,CIMM光频梳与NIM光频梳的测量结果一致性很高,频率测量值最大仅相差227 Hz,一致程度达到了 $1.2 \times 10^{-12}$ 。为了更形象直观地进行对比,根据表1作图7,由图7可知所有测量结果均符合国际推荐的不确定度范围要求。图7中数据点上的误差线(Error bar)由单次测量中一组数据(如图6中数据)的三倍标准差表示,误差线也均处于不确定度区间之内,这说明光频梳可以准确测量乙炔稳频激光的波长,反映了光频梳的计量性能。综合这三次测量结果,本文自研光频梳获得的乙炔稳频激光真空波长的测量平均值为1542.38 371 235 745 nm。

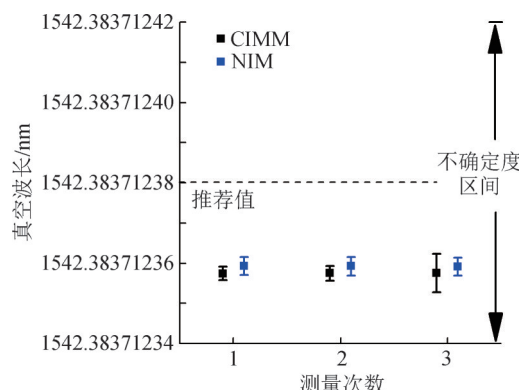


图7 不同光频梳的波长测量结果

Fig.7 Wavelength measurement results of different OFCs

虽然CIMM光频梳与NIM光频梳的波长测量结果均低于乙炔稳频波长的国际推荐数值,但需要注意的是国际推荐值需配合其不确定度一同使用,本文中的测量结果均处于不确定度区间内,证明该乙炔稳频激光器满足CIPM约定的复现米定义的要求。

#### 4 结论

针对基于光频梳建立波长标准的趋势和稳频激光波长校准的需求,利用自研的光纤光频梳开展了对乙炔稳频激光波长的测量研究。自研光频梳的重复频率为200 MHz,频率稳定度为 $3.99 \times 10^{-13}$  (1 s),对乙炔稳频激光波长的测量通过拍频过程完成。乙炔稳频激光真空波长的测量平均值为1542.38 371 235 742 nm,符合CIPM推荐值的不确定度范围要求。乙炔稳频激光频率稳定度的测量结果为 $4.13 \times 10^{-13}$  (1 s),主要受限于光频梳的稳定度。利用CIMM光频梳与NIM光频梳对该乙炔稳频激光进行测量,测量结果一致性非常高,均符

合CIPM推荐值的不确定度范围,有力地证明了光频梳对稳频激光波长测量的高准确性,为后续建立基于光频梳的波长标准、开展激光波长校准工作提供了重要支撑。

### 参考文献

- [1] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, 369(6501): 3676.
- [2] DREWSSEN M. High-resolution direct optical frequency comb Raman spectroscopy of single ions: from atomic fine structures to rotational spectra of molecular ions[C]//Optical, Opto-Atomic, and Entanglement-Enhanced Precision Metrology II. SPIE, 2020.
- [3] ZAKHARENKO Y G, KONONOVA N A, FEDORIN V L, et al. Outlook for the development of the standards base of the Russian Federation in the field of measurements of length[J]. *Measurement techniques*, 2020, 63(2): 77-80.
- [4] 武腾飞, 赵春播, 薛莉. 宽带可调谐光源瞬时波长测量方法研究[J]. *计测技术*, 2022, 42(3): 23-29.  
WU T F, ZHAO C B, XUE L. Research on instantaneous wavelength measurement method of broad-band tunable light source [J]. *Metrology and measurement technology*, 2022, 42(3): 23-29. (in Chinese)
- [5] 李天初, 方占军. 从长度米到时间秒: 稳频激光-铯喷泉钟-飞秒光梳-锶光晶格钟[J]. *科学通报*, 2011, 56(10): 709-716.  
LI T C, FANG Z J. From meter to second at NIM: stabilized lasers-Cs fountain clocks-fs optical frequency combs-Sr lattice clock[J]. *Chinese science bulletin*, 2011, 56: 709-716. (in Chinese)
- [6] The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. "National standard of length" becomes a new method [EB/OL]. [2009-07-16]. [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_r-lease/pr2009/pr20090716/pr20090716.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_r-lease/pr2009/pr20090716/pr20090716.html).
- [7] QUINN T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) [J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 103.
- [8] BALLING P, FISCHER M, KUBINA P, et al. Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542 nm: acetylene stabilized DFB laser[J]. *Optics express*, 2005, 13(23): 9196-9201.
- [9] RYU H Y, LEE S H, LEE W K, et al. Absolute frequency measurement of an acetylene stabilized laser using a selected single mode from a femtosecond fiber laser comb[J]. *Optics express*, 2008, 16(5): 2867-2873.
- [10] WANG J, YIN C, QIAN J, et al. 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength standard based on acetylene saturated absorption at NIM [C]//2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. IEEE, 2020.
- [11] CAO S Y, HAN Y, DING Y, et al. Precise determination of characteristic laser frequencies by an Er-doped fibre optical frequency comb [J]. *Chinese physics B*, 2022, 31(7): 74207.
- [12] XIA C Q, WU T F, XING S, et al. Frequency stabilization and absolute measurement of a near-infrared CW laser by optical frequency combs [C]//4th Optics Young Scientist Summit. SPIE, 2021.
- [13] XIA C Q, WU T F, ZHAO C B, et al. A stabilized optical frequency comb based on an Er-doped fiber femtosecond laser [C]//Young Scientists Forum 2017. SPIE, 2018.
- [14] 国佳帅, 武腾飞, 梁志国, 等. 163 fs 被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器[J]. *计测技术*, 2015, 35(4): 27-29.  
GUO J S, WU T F, LIANG Z G, et al. 163 fs passively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser [J]. *Metrology and measurement technology*, 2015, 35(4): 27-29. (in Chinese)
- [15] LI S Y, WU T F, ZHANG L, et al. Optimization of erbium-doped fiber length based on variable gain coefficient in femtosecond pulse amplification system [C]//Fifth International Symposium on Laser Interaction with Matter. SPIE, 2019.
- [16] 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.  
XIA C Q, WU T F, ZHAO C B, et al. Experiment study on carrier-envelope offset frequency locking in an femtosecond fiber comb [J]. *Laser and optoelectronics progress*, 2016, 53(12): 123201. (in Chinese)
- [17] 赵春播, 武腾飞, 梁志国. 飞秒激光器脉冲重复频率的锁定技术研究[J]. *计测技术*, 2014, 34(6): 22-25.  
ZHAO C B, WU T F, LIANG Z G. Research on repetition rate locking system of femtosecond laser [J]. *Metrology and measurement technology*, 2014, 34(6): 22-25. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 夏传青 (1989—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为飞秒激光测量技术。