

光纤飞秒光学频率梳的研制及 绝对光学频率测量*

孟飞^{1)†} 曹士英¹⁾ 蔡岳²⁾ 王贵重²⁾ 曹建平¹⁾ 李天初¹⁾ 方占军¹⁾

1) (中国计量科学研究院, 信息与电子计量科学和测量技术研究所, 北京 100013)

2) (北京大学信息科学技术学院, 量子电子学研究所, 北京 100871)

(2011年3月28日收到; 2011年5月13日收到修改稿)

实验利用商品光纤飞秒激光器, 自行构建了一套完整的光学频率梳系统, 并获得了约 30 dB 信噪比的系统频移(f_{ceo})信号. 实现了光频梳重复频率(f_{rep})信号及系统频移(f_{ceo})信号的高稳定度锁定, 并通过实验验证了光频梳锁定的跟踪精度. 基于此稳定光频梳完成了对 1064 nm 碘稳频 Nd:YAG 固体激光器的绝对频率测量. 实验结果表明, f_{rep} 的跟踪精度在 100 s 取样时间时优于 3.7×10^{-14} , 测量得到的 1064 nm 激光器绝对频率为: 281630111757362 Hz. 这一测量结果与国际计量委员会 (CIPM) 给出的国际推荐值符合到不确定度之内.

关键词: 光纤光频梳, 稳频, 锁相技术, 光学频率计量

PACS: 06.20.-f, 06.30.Ft, 07.60Vg, 42.65.Re

1. 引言

随着以锁模飞秒激光器为核心的光学频率梳技术的成熟, 其已经被广泛应用于光学频率测量、高速异步光学采样、绝对距离测量以及天文光谱的波长校准等领域^[1-3]. 尤其在光频测量领域中, 光频梳已成为迄今为止最有效的绝对光学频率测量工具^[1], 它可以将铯原子微波频标与光频标准确、可靠且相对简单地直接联系起来. 在可见到近红外区域, 可实现以铯原子微波频标作为参考的任意光学频率合成.

传统钛宝石光频梳是目前光频测量领域应用最为广泛并且技术最为成熟的系统^[1], 但由于其结构复杂、体积庞大、成本昂贵、难于维护以及对工作环境要求苛刻等问题, 目前很难适应光频测量领域对简便运行及长期连续测量的诉求. 近年来, 基于光纤锁模飞秒激光器的光频梳, 由于其具有优秀的稳定性, 以及结构紧凑、价格低廉、易于维护等优点, 已经逐步引起重视. 因此, 本实验所研制的光纤飞秒光频梳系统, 对于替代钛宝石飞秒光频梳系

统, 完成“数天”量级的长时间连续测量, 探查近红外光谱的超精细结构以及实现近似“一键开机式”的简便操作等, 都具有现实意义. 利用此光纤光频梳, 中国计量科学研究院已经及准备开展多项时间频率计量领域的相关实验. 其中, 利用此光频梳配合氢钟等参考频率源, 可完成对稳频激光器频率长期连续的稳定性及准确性评估, 可长时间在其倍频程光谱覆盖范围内锁定多个波长激光器频率, 还可利用光纤网络远距离传输稳定时间频率信号. 光纤光频梳若配合超窄线宽激光器, 可产生高稳定度微波频率标准, 进而完成光钟与喷泉钟之间比对.

由于国外的光纤光频梳研究工作开展较早, 目前已出现多个将其用于光学绝对频率测量的成功实例^[4,5], 所测激光波长范围已覆盖紫外至近红外波段. 其中, 日本 AIST 的 Schibli 等人利用重复频率 86 MHz 的掺 Er 光纤光频梳对 1064 nm 碘分子 R(56)32-10 谱线稳频 Nd:YAG 固体激光器的绝对频率进行了测量, 结果与使用钛宝石光频梳系统得到的结果符合很好. 本实验内容与其类似, 并且测量结果与国际推荐值符合在不确定度之内. 国内目前在超快光纤激光方面研究开展较多^[6], 在光纤光

* 国家重大科学研究计划(批准号:2010CB922902)资助的课题.

† E-mail: mfei@nim.ac.cn

2.1. f_{ceo} 信号的获得及锁定

由于飞秒激光腔内存在色散,因此光脉冲在腔内运行时,色散会导致激光的群速度与相速度产生相位差($\Delta\phi$),从而出现 f_{ceo} 信号^[10,11],其值等于

$$f_{\text{ceo}} = f_{\text{rep}} \frac{\Delta\phi}{2\pi}. \quad (2)$$

在光频梳系统中, f_{ceo} 信号的获得多采取“ $f-2f$ ”自参考的方法^[9,12],即首先将飞秒激光器输出光谱利用高非线性元件扩展到一个倍频程^[13]或通过特殊的激光器设计,使输出光谱宽度直接达到一个倍频程^[14],之后从中提取某一小段低频光谱进行倍频,再和光谱中频率相对应的高频成分进行拍频后获得.本实验中采用了一种“共光线式”干涉仪进行 f_{ceo} 信号的探测,其中倍频晶体采用了具有高非线性系数以及高损伤阈值的 MgO:PPLN 晶体.由于该晶体为准相位匹配,其基频光和倍频光在空间上不走离,所以可省略掉以往最常用的“双臂型 $f-2f$ ”干涉仪中的补偿系统^[9,11].因此此种结构更为紧凑,且具有更好的稳定性,利于光频梳长时间运行及光频测量.

实验装置如图 1 所示,激光器的 Port1 口输出光的平均功率约为 18 mW,无法直接通过高非线性光纤(HNLF)使光谱达到倍频程,因此需要进一步放大之后扩谱.由于系统中使用的飞秒激光器输出的光脉冲宽度极窄,因此直接放大光脉冲会使脉冲的能量还在很低时就具有很高的峰值功率,这会导致增益饱和效应,从而使激光脉冲从增益介质中抽取能量的效率降低,同时很高的峰值功率还有可能会导致对放大器中的元件造成一定的损伤.

因此,为了避免以上诸多不利,并且能够有效的放大飞秒脉冲激光,本实验采用了啁啾脉冲放大(CPA)技术^[15],即振荡器输出的种子光先经过一段正色散光纤 CF1,使光脉冲展宽至皮秒量级,然后将其送入两级串联的放大器进行放大,放大输出光经由 1/2 波片及 1/4 波片组成的波片组之后调整偏振态及其方向,最后再把放大后的光脉冲经过一段负色散光纤 CF2 压缩回飞秒量级.实验中经过上述自行搭建的放大器之后的输出光平均功率约为 350 mW,其中第一级放大输出平均功率约为 184 mW.两级放大器均采用后端抽运方式,可获得更大的抽运效率.抽运源为单模输出,每只抽运源的输出功率都约为 700 mW,抽运光中心波长为 976 nm.掺钕

增益光纤选用 LIEKKI 公司产品,第一级长度约为 60 cm,第二级长度约为 40 cm.补偿光纤 CF1 零色散波长为 1595 nm.补偿光纤 CF2 为普通单模 G652 光纤.

经过放大后的飞秒光脉冲被送入一段 HNLF1 进行光谱展宽.通过优化两段补偿光纤的长度以调整脉冲宽度及功率,同时配合调整波片组位置,优化偏振态及偏振方向,最终可以使其扩谱达到一个倍频程.其中,波片组损耗约 20%,HNLF1 的非线性系数为 $10.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$,色散斜率在 1550 nm 处为 $0.01 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km}^{-1})$,系统中使用了约 40 cm,其与单模光纤熔接损耗约为单点 20%.输出的超连续光谱从 1100 至 2200 nm,总功率约为 190 mW,光谱图如图 2 所示.

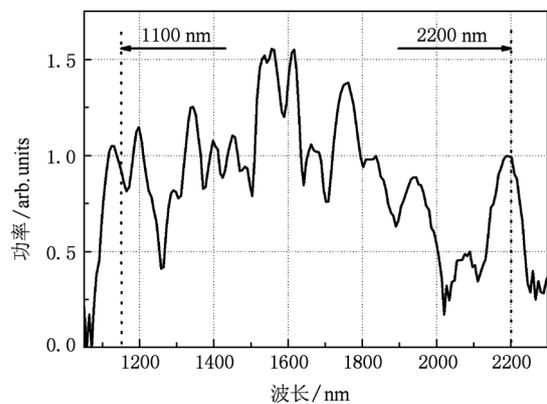


图 2 高非线性光纤输出倍频程超连续光谱图

高非线性光纤输出的宽谱空间光束由一非球面透镜准直,送往“共光线式 $f-2f$ ”干涉仪,产生 f_{ceo} 信号.首先,光束经一透镜聚焦后送入 MgO:PPLN 晶体,对宽谱光中的低频 2200 nm 附近的光谱成分进行倍频.之后,输出的新光谱变为平行光后通过一只中心波长为 1100 nm,带宽为 10 nm 的带通干涉滤波片,光谱中基频 1100 nm 部分光和倍频出来的 1100 nm 部分光最终在一只探测器(APD)上拍频得到 f_{ceo} 信号.如图 2 所示,获得信号的信噪比约为 30 dB,线宽小于 400 kHz,观测时频谱仪的分辨率带宽(RBW)为 300 kHz.其中,晶体选用台湾 HCP 公司生产的 fan-out 式 MgO:PPLN 晶体,通光长度为 2 mm,两端面镀红外波段增透膜.由于此种晶体含有多个准相位匹配极化周期,且不同周期的通道在垂直光轴方向上呈无间隔连续分布,实验中使用一维精密位移台沿垂直光轴方向仔细调节晶体位置,从而微小改变通光位置,以选择不同的晶体极化周期

进行倍频,进而改变倍频光波长.通过上述调节,可在超连续光谱中的一定范围内,选择不同的与倍频光相对应频率的高频光成分与倍频光进行拍频.由于光谱不平坦,因此上述操作可较为精确的选择拍频双方功率都较强的位置,从而可优化获得最高信噪比的 f_{ceo} 信号.同时,为了获得更高信噪比的 f_{ceo} 信号,实验选用了钢镓砷材料的雪崩二极管(APD),此探测器为thorlabs公司的APD110型,带宽50 MHz.

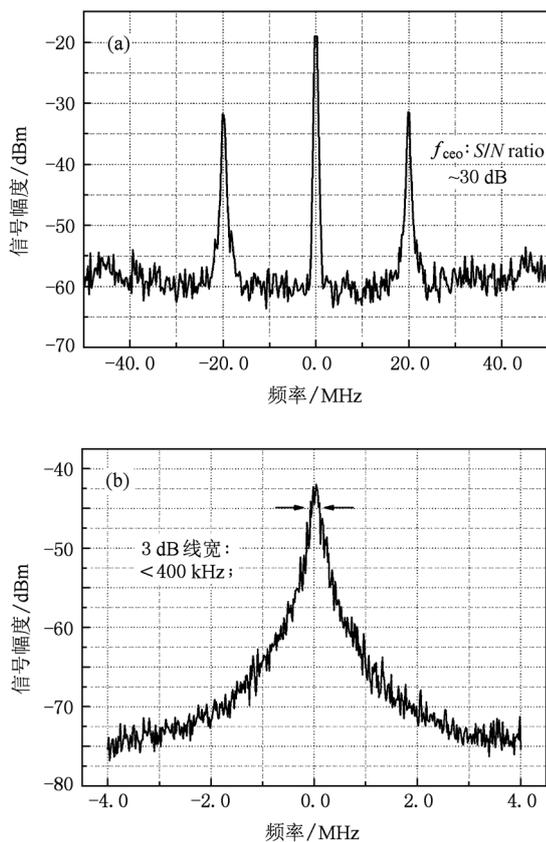


图3 (a)探测得到 f_{ceo} 信号,信噪比约为30 dB;(b) f_{ceo} 信号线宽小于400 kHz,频谱仪分辨率带宽为300 kHz

如前所述,由于飞秒激光腔内存在色散是出现 f_{ceo} 信号的最根本原因,而当 f_{ceo} 信号的频率值发生变化时,可通过改变激光器的抽运功率进行 f_{ceo} 信号频率的调节^[12].在得到较高信噪比的 f_{ceo} 信号之后,实验利用数字锁相环路将其锁定到了氢钟的标准参考信号上,从而实现对其频率的稳定及溯源.

实验采用如图1中所示 f_{ceo} 频率锁定系统对其进行稳频. f_{ceo} 信号的锁定参考信号频率为20 MHz,由氢钟信号经过低噪声放大、倍频及滤波之后产生.APD输出信号经过中心频率为20 MHz的带通

滤波器及25 dB低噪声放大器,送往自行研制的数字鉴相器与标准信号进行比较.由于 f_{ceo} 信号的频率及相位噪声较大,因此在锁定中需使用到数字鉴相器以保证环路稳定.此种鉴相器在锁定过程中,具有比传统模拟鉴相器更大的俘获及控制范围,系统容易进入锁定状态且不易失锁^[1].鉴相器比较上述两个信号之后输出一误差信号,经过自制的PI控制器后,反馈给光纤飞秒激光器的抽运电流驱动器,通过控制抽运光的驱动电流改变抽运光功率,从而实现将 f_{ceo} 信号锁定到氢钟的标准频率参考信号上.其中,由于激光器电流改变对功率变化的响应限制^[6],因此伺服环路PI控制器带宽设计小于25 kHz.

图4为系统锁定之后,使用计数器对 f_{ceo} 信号计数两小时的结果,其均值为20 MHz,使用1 s采样数据计算的标准偏差约为1 mHz,其对1064 nm碘稳频激光频率测量产生的影响相对值小于 4×10^{-18} .此结果对测量的误差贡献极小,足以满足实际测量需要.所用计数器为Agilent公司生产的53132型,其外参考为氢钟10MHz信号.

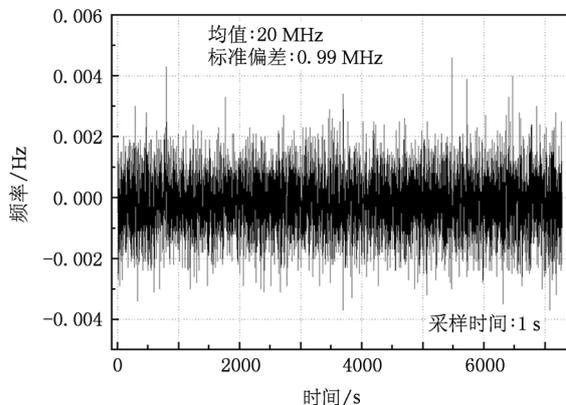


图4 f_{ceo} 信号锁定到氢钟的计数结果

2.2. f_{rep} 信号的锁定与评估

由于飞秒激光器 f_{rep} 的高次谐波中携带了更多的相位噪声信息,直接锁定其高次谐波,可抑制更多的激光器噪声,可从而提高 f_{rep} 信号的锁定精度^[8,16].因此,本实验也采用了锁定其4倍频的方案.如图1中 f_{rep} 信号锁定及评估系统框图的上部分所示, f_{rep} 信号的四倍频信号由快速PIN光电二极管PD1探测.氢钟信号经分配放大器后的一路10 MHz标准频率,用来同步第一台低噪声频率综合器(syn.

1),其产生约 1 GHz 频率信号,作为锁定 4 倍 f_{rep} 信号的参考.接收器 PD1 输出信号经过 1 GHz 带通滤波器滤除其余谐波信号及噪声,将其送入模拟混频器与上述参考信号进行鉴相,产生误差信号.再将此误差信号通过低通滤波器及放大器后送入自行研制的 PI 控制器,最后输出给 PZT 高压放大器,再通过控制振荡器内的 PZT 伸缩来改变腔长,从而实现 f_{rep} 信号的锁定.

如原理所述,光频梳梳齿频率的大部分频率数值由“ $N \times f_{\text{rep}}$ ”项贡献,而 N 通常为几十万至上百万量级,因此 f_{rep} 信号频率的稳定程度会强烈影响其光频梳梳齿频率的稳定度,进而影响到测量的稳定度.因此在测量高稳定激光器的绝对频率值时,需要 f_{rep} 的稳定度极高.由于实验中所使用计数器的计数位只有 12 位,因此用其直接对锁定后的 4 倍 f_{rep} 信号进行频率计数评估时,计数器最多只能显示到 mHz 位,即相对频率为 1×10^{-12} 量级,而 f_{rep} 信号的跟踪精度及氢钟参考信号的稳定度都高于此数值,所以如此评估的锁定精度会受限于计数器精度而无法显现其真实情况.考虑到以上因素,实验采用电外差法进行对 f_{rep} 信号锁定的评测,即使用另一稳定的微波参考信号和 4 倍 f_{rep} 信号混频至一较低频率后再行计数评估,以保证此评测结果更加有效.实验装置如图 1 中 f_{rep} 锁定及评估系统部分框图的下半部分所示,为了提高评测的可靠性,实验中选取测试了锁定环外 (out-of-loop) 的信号,用以评测 f_{rep} 信号的锁定跟踪精度,即将 Port2 口输出光的一小部分用另一探测器 PD2 接收,此器件噪声水平与锁定信号用探测器相当,锁定后的 4 倍 f_{rep} 信号与另一台频率参考到氢钟的低相位噪声频率综合器 (syn. 2) 混频至 1 kHz 后计数,并进行统计计算,从而得出锁定跟踪精度.如图 5(a) 所示,在 1 s 采样且连续采样大于 10000 s 时,频率均值约为 1 kHz, f_{rep} 信号锁定后的一倍标准偏差值为 0.49 mHz.如图 5(b) 所示,在采样 100s 时, f_{rep} 频率的相对 Allan 方差为 3.7×10^{-14} .实验在测量锁定跟踪精度的同时,还对两台频率综合器 syn. 1 和 syn. 2 进行了同样的外差法测量实验,如图 5(b) 所示,在不同采样时间点下,两个实验最终获得的数据均显示了几乎相同的稳定度及下降变化趋势,这表明实验测得的 f_{rep} 锁定跟踪精度已经趋同并受限于测试环境本底的稳定度水平,但此数据已经满足对碘稳频 1064 nm 激光器及大多数稳频激光器进行测量的要求.

Benkler 等人使用类似结构的光纤光频梳进行 f_{rep} 信号的稳频时,其跟踪精度在 1 s 采样时只为 1.3×10^{-11} [17],低于本实验结果,其主要原因是其所使用的 PZT 器件响应频率只有 500 Hz,而本实验所采用器件响应频率大于 60¹⁰ kHz,利于抑制更快的噪声,从而提升稳定度.在我们所知的国际报道中,光纤光频梳稳频跟踪精度的最好结果为 Peng 等人[8] 获得,其 f_{rep} 信号锁定跟踪精度为 1.3×10^{-14} (100 s 采样),本实验与其结果比较接近.

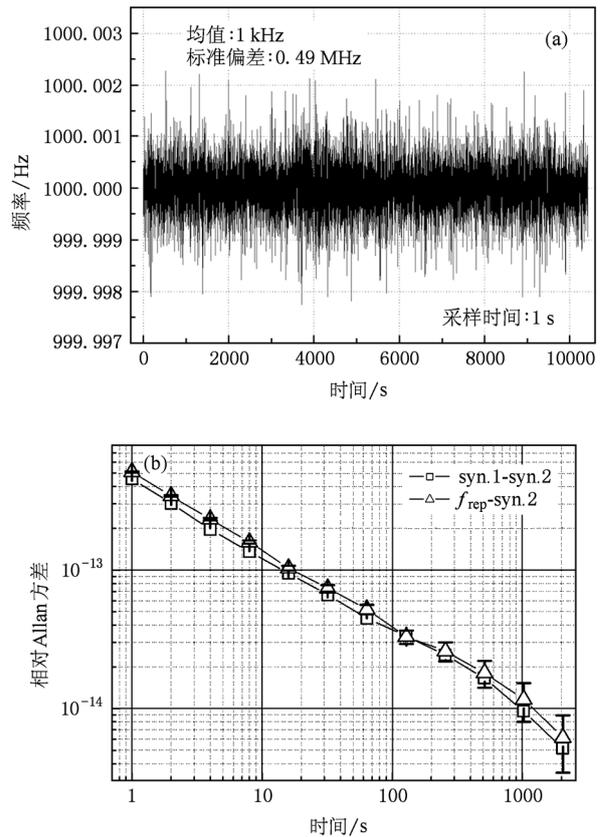


图 5 (a)使用电外差法对锁定 f_{rep} 信号评估的计数曲线;(b)使用电外差法对锁定 f_{rep} 信号评估的相对 Allan 方差曲线 (f_{rep} -syn. 2);使用电外差法对两台频率综合器评估的相对 Allan 方差曲线 (syn. 1-syn. 2)

2.3. 碘稳频 1064 nm Nd:YAG 光学绝对频率测量

被测 1064 nm 碘稳频 Nd:YAG 固体激光频率标准,由中国计量科学研究院信息电子所光频标实验室研制,激光输出频率利用调制转移光谱技术锁定到碘分子的 R(56)32—10 超精细谱线上[18].

实验测量光路原理如图 1 右下部分所示,Port2 输出光经过单级放大后功率约 200 mW,放大部分

设计与获得 f_{ceo} 信号部分相同. 经过波片组后功率约为 160 mW. 由于 HNLF1 无法将光谱扩展至 1064 nm, 因此, 我们改用另一段 HNLF2 进行光谱展宽. 扩谱之后的宽谱光和一光纤耦合器输入端熔接相连, 与从另一端口进入的 1064 nm 连续光进行合光并经一准直器输出成空间光束, 再由一 1800 线光栅分光, 将光谱中 1064 nm 成分光及连续光重叠部分用空间小孔光阑滤出, 之后用一光电接收器接受其拍频信号 f_{beat} . 拍频采用光纤器件合束, 此方法与空间光路拍频相比可更好的匹配拍频光的空间模式, 从而获得更高的信噪比. 输出电信号经低噪声放大器及带通滤波器后送往计数器计数, 同时送往频谱分析仪进行观测及监视. 实验中调整扩谱状态及

1064 nm 连续光输入偏振态及其方向, 最终使拍频信号 f_{beat} 的信噪比达到约 40 dB, 以保证计数正确.

图 6 为使用稳定光纤光频梳对碘稳频 1064 nm 激光器绝对频率测量的结果. 其中, f_{beat} 信号均值为 156.567 MHz, 计数器闸门采数时间为 1 s, 测量时间为 6000 s, $f_{\text{rep}} = 250.0022$ MHz, $f_{\text{ceo}} = 20$ MHz, 1064 nm 激光 AOM 移频值 $f_{\text{AOM}} = 20$ MHz, 由 1064 nm 激光频率粗测值估算的梳齿序数 $N = 1126511$, 氢钟的频率修正值 $f_m = 354.9$ Hz, 用公式计算得出 1064 nm Nd:YAG 激光的频率 (100 s 平均时间) 为

$$\begin{aligned} f_{1064} &= Nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} + f_{\text{aom}} - f_{\text{beat}} + f_m \\ &= 281630111757362 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

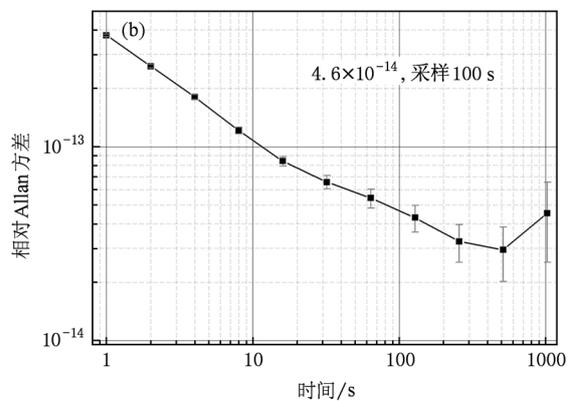
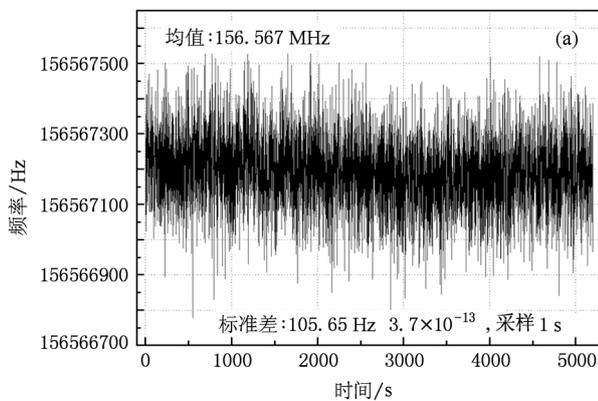


图 6 (a) f_{beat} 频率计数曲线; (b) 计算得到的相对 Allan 方差曲线

3. 结果讨论

本实验进行的光学绝对频率测量的不确定度来源主要有: f_{ceo} 信号跟踪锁定精度、 f_{rep} 信号的跟踪锁定精度、氢钟参考信号、声光器件移频、激光拍频测量以及被测激光的稳定度等几个方面. 其中, f_{ceo} 信号的锁定精度相对于激光频率的不确定度如前所述, 为 1×10^{-18} 量级, 可忽略不计; 在采样时间为 100 s 时, f_{rep} 信号锁定引入的 B 类不确定度分量优

于 3.7×10^{-14} . 除此之外, 在采样时间为 100 s 时, 其余几项带来的不确定度都小于 3×10^{-14} , 因此, 最终测量的合成不确定度小于 6×10^{-14} , 折合绝对频率为 17 Hz. 碘稳频 1064 nm Nd:YAG 激光的国际推荐频率值不确定度为 8.9×10^{-12} , 推荐值为: 281630111756.5 ± 2.5 kHz. 上述激光实际测量频率值与国际推荐值符合到不确定度之内.

衷心感谢与台湾工研院彭锦龙研究员及北京大学张志刚教授的有益讨论及愉快合作.

[1] Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Haensch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
 [2] Nicolas Schuhler, Yves Salvadé, Samuel Lévêque, René Dändliker, Ronald Holzwarth 2006 *Optics Letters* **31** issue 21, 3101 – 3103

[3] Li C H, Benedick A J, Fendel P, Glenday A G, Kärtner F X, Phillips D F, Sasselov D, Szentgyorgyi A, Walsworth R L 2008 *Nature* **452** 610
 [4] Florian Adler, Konstantinos Moutzouris, Alfred Leitenstorfer, Harald Schnatz, Burghard Lipphardt, Gesine Grosche, Florian

- Tauser 2004 *Optics Express* **12** 5782
- [5] Ryu H Y, Lee S H, Lee W K, Moon H S, Suh H S 2008 *Opt. Express* **3** 2867
- [6] Hu M L, Wang Q Y, Wang Z, Li Y F, Wang Z, Zhang Z G, Chai L, Zhang R B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4243 (in Chinese) [胡名列、王清月、王专、栗岩峰、王专、张志刚、柴路、章若冰 2004 物理学报 **53** 4243]
- [7] Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Meng F, Zhang Z G, Fang Z J, Li T C 2010 *Acta Phys. Sin.* **60** 073401 (in Chinese) [曹士英、蔡岳、王贵重、孟飞、张志刚、方占军、李天初 2011 物理学报 **60** 073401]
- [8] Peng J L, Ahn H, Shu R H, Chui H C, Nicholson J W 2007 *Appl. Phys.* **B** 86 49
- [9] Jiang Y Y, Bi Z Y, L Robertsson, Ma L S 2005 *Metrologia* **42** 304
- [10] Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, Stenger J, Sutter D H, Keller u 1999 *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **69** 327
- [11] Fang Z J, Wang Q, Wang M M, Meng F, Lin B K, Li T C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 10 (in Chinese) [方占军、王强、王民明、孟飞、林百科、李天初 2007 物理学报 **56** 10]
- [12] Washburn B R, Fox R W, Newbury N R, Nicholson J W, Feder K, Westbrook P S, Jørgensen C G 2004 *Optics Express* **12** 4999
- [13] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **19** 1547
- [14] T M Fortier, A Bartels, S A Diddams 2006 *Optics Letters* **31** 1011
- [15] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Comm.* **56** 219
- [16] Han H N, Zhang W, Wang P, Li D H, Wei Z Y, Shen N C, Nie Y X, Gao Y P, Zhang S G, Li S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5 (in Chinese) [韩海年、张炜、王鹏、李德华、魏志义、沈乃澈、聂玉昕、高玉平、张首钢、李师群 2005 物理学报 **54** 5]
- [17] Benkler E, Telle H R, Zach A, Tauser F 2005 *Opt. Express* **13** 5662
- [18] Zang E J, Cao J P, Li C Y, Li Y 2004 *China Laser* **31** 931 (in Chinese) [臧二军、曹建平、李成阳、李焯 2004 中国激光 **31** 931]

Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement*

Meng Fei^{1)†} Cao Shi-Ying¹⁾ Cai Yue²⁾ Wang Gui-Zhong²⁾ Cao Jian-Ping¹⁾ Li Tian-Chu¹⁾ Fang Zhan-Jun¹⁾

1) (Division of Electronics and Information Technology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

2) (Institute of Quantum Electronics, School of Electromics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 28 March 2011; revised manuscript received 13 May 2011)

Abstract

An optical frequency comb is built by using a commercial femtosecond laser and signal-noise (S/N) ratio of the f_{ceo} signal is obtained to be about 30 dB. Its repetition rate frequency and offset frequency are highly stable and the tracking stability is verified. An absolute frequency measurement of a 1064 nm Nd: YAG laser is realized by using this stabilized optical frequency comb. The tracking stability of the repetition rate frequency is superior to 3.7×10^{-14} at 100 s and the absolute frequency of the laser is 281630111757362 Hz. The experimental result is in accordance with the recommended value by International Committee of Weights & Measures (CIPM).

Keywords: fiber optical comb, frequency stabilization, phase-locked technology, optical frequency metrology

PACS: 06. 20. - f, 06. 30. Ft, 07. 60Vg, 42. 65. Re

* Project supported by the National Major Research Program, China (Grant No. 2010CB922902).

† E-mail: mfei@nim.ac.cn