

飞秒光梳和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量*

方占军[†] 王 强 王民明 孟 飞 林百科 李天初

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

(2006 年 11 月 28 日收到, 2006 年 12 月 19 日收到修改稿)

报道了中国计量科学研究院研制的基于掺钛蓝宝石 (Ti:Sapphire) 锁模飞秒脉冲激光器的飞秒光学频率梳装置, 并利用此装置测量了碘稳频 532 nm ($^{127}\text{I}_2$ R(56)S2-10) Nd:YAG 固体激光器的频率, 结果为 563260223512991 ± 20 Hz, 相对不确定度为 3.6×10^{-14} . 这一数值是直接溯源到铯原子微波频率基准的光学频率测量结果.

关键词: 计量, 光学频率计量, 飞秒光梳

PACC: 0620, 0630F, 4280W, 9570

1. 引 言

光学频率的精确测量对基础物理研究有着非常重要的意义, 19 世纪末 20 世纪初量子物理的建立与发展就和激光光谱的精确测量有着密切的关系^[1]. 目前的时间单位 s 的定义基于铯原子基态超精细能级间频率为 9.192631770 GHz 的微波跃迁^[2]. 然而光的频率为几百个 THz, 比铯原子钟的标准频率高 4 个数量级以上. 1999 年以前, 谐波光频链是将微波频标和光学频率连接起来的手段. 谐波光频链体积大、成本高、使用和维护都极其复杂, 世界上只有极少数国家建成了自己的谐波光频链装置, 而且一套这种频率链只能测量一个特定的光学频率^[3]. 为了满足实际需要, 国际计量委员会 (CIPM) 推荐了 12 条光辐射谱线作为光学频率标准参考^[4], 也可以用来复现国际单位制七个基本量中的 m.

光学频率标准和光学频率计量通常使用单频连续激光器. 1999 年, 德国马普量子光学研究所 Haensch 教授领导的研究小组^[5]率先报道了用飞秒脉冲激光测量铯原子 D_1 谱线的频率. 2000 年美国贝尔实验室研制成功微结构光纤, 并且利用微结构光纤的强非线性效应和特殊色散参数将钛宝石飞秒激光器的光谱宽度从十几个 THz 扩展到几百个 THz^[6], 获得大于一个光学倍频程的超连续光谱输出. 采用这一光谱扩展技术, 美国 JILA 的科学家很

快研制出自溯源的飞秒激光光学频率梳装置^[7]. 由于在精密激光光谱和飞秒光梳领域的突出贡献, 美国科罗拉多大学和美国标准技术研究院下属的实验室, 天体物理联合研究所的 Hall 博士和德国马普量子光学研究所 Haensch 教授共同获得了 2005 年度的诺贝尔物理学奖. 飞秒光梳体积小、成本低、使用和维护相对简单, 而且可以测量从可见光到近红外领域内所有光学频率, 因此飞秒光梳光学频率测量技术获得了迅速地推广与应用. 从 2000 年开始, 世界上多个国家的计量技术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、单离子存储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^[3]. 2002 年以来, 光钟成为世界计量科学研究的新热点^[8-10]. 冷原子/单离子存储光钟有潜力达到 10^{-18} 的频率准确度. 飞秒光梳是连接微波频标和光学频标的桥梁, 它可以将冷原子/离子存储光学频率标准的优异频率准确度下传到微波段, 因此是未来光钟的重要组成部分.

中国计量科学研究院 (NIM) 从 2002 年开始进行飞秒光梳的研究工作. 本文详细报道了 NIM 飞秒光梳光学频测量装置和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率测量的结果.

2. 飞秒光梳原理

飞秒激光脉冲是通过锁定飞秒激光器内所有能

* 科技部科技基础性工作专项资金 (批准号 2001DEA30028) 资助的课题.

[†] E-mail: zfang@nim.ac.cn

够振荡的激光纵模的相位而形成的周期性脉冲. 一般情况下, 谐振腔输出的飞秒激光脉冲的电场强度表示为

$$E(t) = A(t)e^{-i2\pi f_c t} + \text{c. c.}, \quad (1)$$

其中 $A(t)$ 为周期性的载波包络函数, f_c 为光载波频率, c. c. 代表前一项的复数共轭. 载波包络函数 $A(t)$ 可以用傅里叶级数展开为

$$A(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-i2\pi n f_r t}, \quad (2)$$

其中 $f_r = V_g/2L$ 是脉冲的重复频率, V_g 是群速度, L 是激光谐振腔的腔长. 将 (2) 式代入 (1) 式, 飞秒激光脉冲的电场强度表达式可以写成

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-i2\pi(f_c + n f_r)t} + \text{c. c.}, \quad (3)$$

在频域内, 这个电场是由一系列相等频率间隔 f_r 的窄谱线构成的梳状光谱. 如果不考虑包络与载波的相对相位问题, 则第 n 根光梳齿的频率 f_n 为脉冲重复频率 f_r 的整数倍, 即 $f_n = n f_r$. 但是激光谐振腔内的介质存在色散, 因此会造成包络以群速度而载波以相速度传播. 由于这两个速度不相同, 激光脉冲在谐振腔内往返一周, 载波相位和包络相位就会产生 $\Delta\varphi$ 的相位差 $2\pi > \Delta\varphi > 0$, 如图 1 所示. 根据激光谐振腔的自治场理论, 激光在谐振腔内往返一次后必须恢复到原来的初始状态, 因此载波相位必须满足

$$2\pi f_c T - \Delta\varphi = n2\pi, \quad (4)$$

其中 T 为激光在谐振腔内往返一次所需要的时间, n 为正整数. 满足这样条件的光载波频率, 也即光梳中第 n 个梳齿谱线的频率为

$$f_n = n f_r + f_0, \quad (5)$$

其中 $f_0 = \Delta\varphi/2\pi T$, 也可以表示为 $f_0 = \Delta\varphi f_r/2\pi$. 载波与包络的相对相位差使得各梳齿的频率并不恰好等于脉冲重复频率的整数倍, 而是有一个系统频移 f_0 . 在时域内, 飞秒激光的脉冲的重复频率为 f_r , 因为腔内介质的色散, 每经过一个脉冲载波相对于包络的相位就会超前 $\Delta\varphi$. 实验已经证实, 整个梳状光谱内的各部分光梳齿分布均匀, 梳齿间隔在 10^{-16} 精度内严格地等于飞秒脉冲激光的重复频率^[11], 这一实验结果为实现飞秒光梳测量光学频率奠定了基础.

脉冲重复频率 f_r 和系统频移 f_0 频率都在微波波段, 因此利用一个锁模飞秒脉冲激光器就可以将微波频率与光学频率连接起来. 如果将 f_r 和 f_0 都锁定到铯原子喷泉钟校准的氢钟的参考频率上, 那么

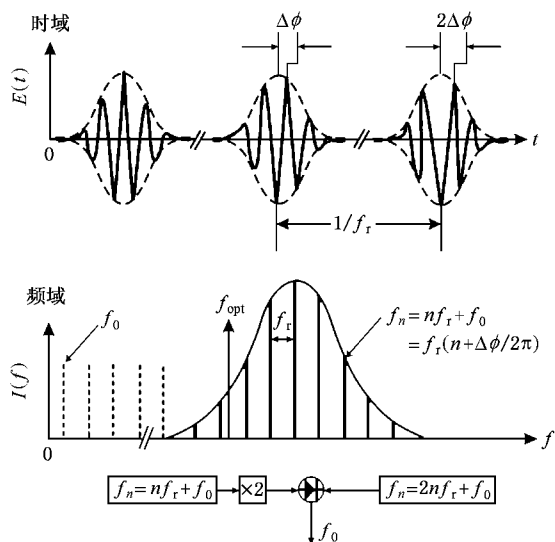


图 1 飞秒脉冲激光在时域和频域中表示

每一个梳齿都相当于一个频率稳定的激光器, 具有和氢钟几乎同等的频率准确度. 一般的飞秒脉冲激光器的输出光谱宽度在十几个 THz, 经过光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 扩展到超过一个光学倍频程后, 对应的光谱可以达到几百个 THz. 如果飞秒激光器的脉冲重复频率为 1 GHz, 则这样的倍频程宽的飞秒光梳就包含了几十万个频率稳定激光器. 那么对于任何未知的激光器, 只要其频率落在光梳的覆盖范围内, 就可通过与飞秒光梳直接进行拍频来测知它的光学频率, 计算公式为

$$f_1 = n f_r \pm f_0 \pm f_b, \quad (6)$$

其中 f_1 是未知激光器的频率, f_b 为拍频测量的结果, n 和式中的 \pm 号可以通过对 f_1 的粗测来获知. f_1 的粗测可以使用商用的光波长计来实现, 要求光波长计的分辨率优于飞秒激光脉冲重复频率 f_r 的一半.

由于现行时间频率定义于铯原子的微波跃迁, 所有频率测量最终都必须以铯原子钟的微波频率标准为参考, 光学频率的测量也不例外. 由上面的讨论可知, 使用飞秒光梳测量光学频率, 必须首先探测到脉冲重复频率 f_r 和系统频移 f_0 , 并将二者锁定到铯原子微波频率标准上. 脉冲重复频率可以很容易地用快速光电二极管直接探测得到, 经过滤波放大和锁相环, 通过控制激光谐振腔的腔长将其锁定到微波参考频率上. 然而, 系统频移 f_0 的获得却复杂得多. 如果飞秒脉冲激光的输出光谱足够宽, 以至于能够覆盖包括 f_n 和 f_{2n} 在内的大于一个光学倍频程的

范围 f_0 则可以通过第 $2n$ 根光梳齿和第 n 根光梳齿的倍频的差频获得,即 $f_0 = f_{2n} - 2f_n$. 用 APD 探测系统频移 f_0 信号,经过带通滤波、放大和锁相环反馈,通过控制抽运激光的光强将 f_0 锁定到稳定的微波参考上.

目前,只有极少数几篇文献报道,可以用飞秒脉冲激光器直接产生大于一个倍频程的超连续光谱^[12,13],普遍的方法是利用 PCF 将飞秒脉冲激光器的光谱扩展,直至大于一个光学倍频程. PCF 的零色散波长可以调控到可见光区域. 一般的钛蓝宝石飞秒脉冲激光器的中心波长在 800 nm 左右,因此激光脉冲在 PCF 中可以传输较长的距离而保持脉冲宽度不变,与一般的非线性晶体相比非线性作用距离大幅增加. 同时,用于飞秒激光光谱扩展的 PCF 的芯径一般在 2.0 μm 左右,纤芯内的激光脉冲峰值功率密度很高,非线性效应很强. PCF 内参与光谱延展的非线性机理包括自相位调制、四波混频、孤子分裂、拉曼效应等等,详细的理论研究可以参见文献 [14,15].

3. NIM 飞秒光梳光学频率测量装置

NIM 飞秒激光光学频率梳装置如图 2 所示. 飞

秒脉冲激光器是 GigaOptics 公司研制的六镜环形腔型 GigaJet-20,抽运激光选用 Coherent 公司生产的半导体抽运钛酸钪倍频 532 nm 单横模单纵模固体激光器 Verdi-V8. 在 6.5 W 抽运功率时, GigaJet-20 激光器锁模输出的平均功率 450 mW 左右,中心波长为 780 nm,脉冲重复频率 760 MHz. GigaJet-20 直接输出的飞秒激光脉冲的 3 dB 光谱宽度为 40 nm,假设脉冲包络为高斯分布,根据转换极限条件下的时间-带宽积的估算公式 $\Delta\nu\Delta t_p = 0.441$ 推算出脉冲宽度约为 23 fs (其中 $\Delta\nu$ 和 Δt_p 分别为频谱宽度和脉冲宽度)这一结果与用双光子自相干仪(与天津大学超快激光研究室合作研制)测得的脉冲宽度一致. 由此可见, GigaJet-20 激光器直接输出的光脉冲的谱宽远远没有达到探测光梳系统频移 f_0 所需的一个光学倍频程的光谱宽度,因此必须使用 PCF 对 GigaJet-20 的光谱进行扩展.

GigaJet-20 的输出光经过一个 $1/2\lambda$ 波片和一个非球面透镜后注入进 PCF. $1/2\lambda$ 波片用来旋转飞秒脉冲激光相对于 PCF 的偏振方向,以达到最佳的光谱扩展效果. 非球面透镜选用 Thorlabs 公司生产的 C414-TM, 焦距 $f = 3.3$ mm, 数值孔径 $NA = 0.47$. PCF 为英国 Bath 大学赠送的,截面为蜂房式结构,芯径

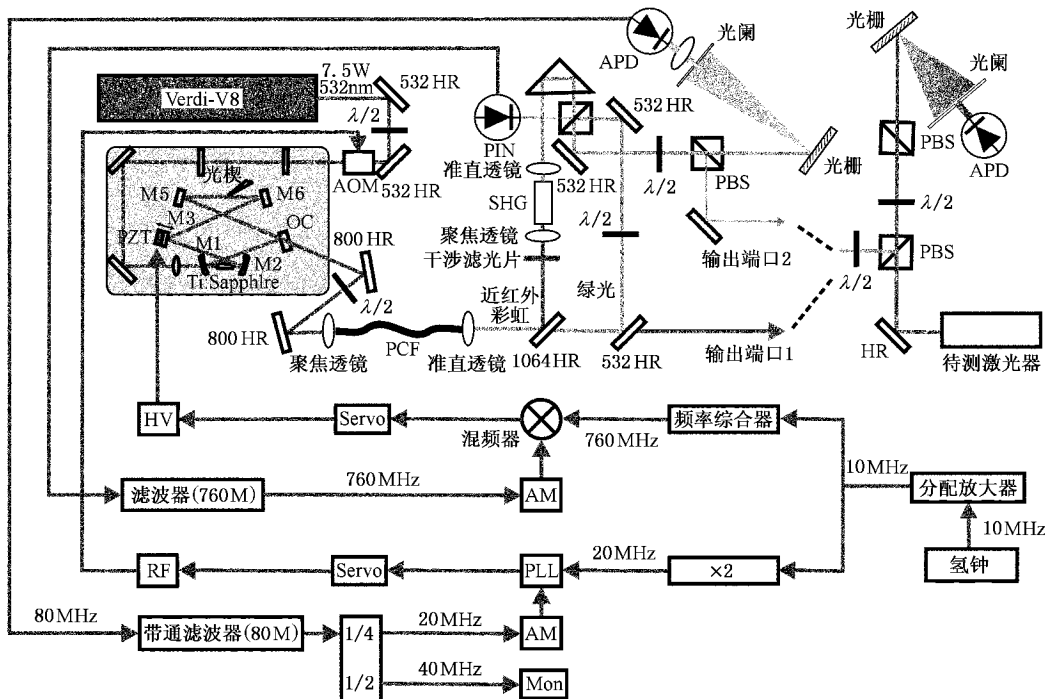


图 2 NIM 飞秒激光光学频率梳装置. PCF 为光子晶体光纤, PBS 为偏振分光镜, HR 为高反射镜, SHG 为倍频晶体, AOM 为声光晶体, APD 为雪崩光电二极管, PLL 为锁相环, AM 为信号放大器, RF 为射频驱动源, Mon 为监视示波器, HV 为高压驱动器, Servo 为伺服系统.

为 $2.1 \mu\text{m}$, 零色散波长为 735 nm , 实验使用长度 40 cm 左右. PCF 注入系统的耦合效率一般可以达到 25% 以上, 输出的倍频程超连续光谱的总功率为 110 mW 左右. PCF 产生的倍频程超连续覆盖了从 $500\text{—}1050 \text{ nm}$ 的范围, 如图 3 所示. 值得庆幸的是在倍频程的短波长和长波长两端的对应位置, 即 $500\text{—}550 \text{ nm}$ 和 $1020\text{—}1040 \text{ nm}$ 区间, 恰好是两个光谱峰, 因此非常利于提高系统频移 f_0 信号的信噪比.

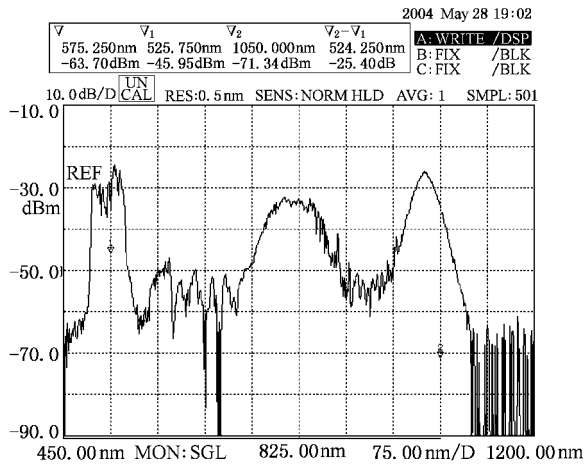


图 3 光谱分析仪记录的倍频程超连续光谱图

PCF 输出的倍频程超连续光先后入射到两个窄带高反射镜, 分别反射 1050 nm 附近和 525 nm 附近的光, 形成 $f_2 2f$ 非线性干涉仪的两臂. 1050 nm 附近的光经过一块 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体倍频, 用一个放在一维精密位移台上的全反射直角棱镜进行光程补偿, 然后和选择反射的超连续谱中原有的 525 nm 附近的光在偏振分光镜 PBS 上重合叠加, 最后用衍射光栅和 APD 探测 f_0 信号. $f_2 2f$ 脉冲激光的拍频干涉要求两臂的光在空间域和时间域上精确重合, 光程补偿延迟结构的调节精度要求达到微米量级. 衍射光栅和滤光片用来滤掉不需要的光谱分量, 从而改善探测信号的信噪比^[16]. 实验获得的 f_0 信号的信噪比优于 40 dB , 如图 4 所示. 脉冲重复频率信号 f_r 是用 PIN 光电二极管直接探测从 $f_2 2f$ 非线性干涉仪的第一个合光 PBS 泄漏的那个偏振分量的光, 可以很容易地获得足够高的信号信噪比.

重复频率和系统频移锁定的 10 MHz 参考信号来自中国计量院守时 MHM2010 (Symmetricom) 型主动氢钟. 氢钟的频率定期被 NIM4 铯原子喷泉

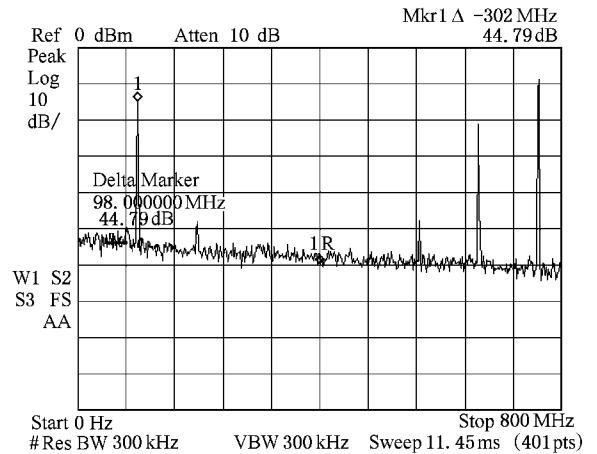


图 4 频谱分析仪记录的 $f_2 2f$ 方法测得的系统频移 f_0 信号. 左侧第一个峰为 f_0 信号, 第二个峰位 $f_r - f_0$ 信号, 第三个峰为 f_r 信号. f_0 信号信噪比优于 40 dB , 分辨率带宽为 300 kHz

钟国家时间频率基准校准. NIM4 铯原子喷泉钟的不确定度 5×10^{-14} ^[17], 校准后氢钟的频率不确定度 2×10^{-14} . 我们在 GigaJet-20 谐振腔中加入了一个光楔, 可以用来很方便地将探测得到的 f_0 的频率值调整到 80 MHz 附近. 将 80 MHz 的 f_0 信号的 4 分频和氢钟提供的 10 MHz 参考标准的 2 倍频输入一个锁相环, 使用抽运光路中声光调制器 AOM, 通过控制 GigaJet-20 的抽运光强, 将 f_0 锁定到氢钟的参考信号上. 脉冲重复频率的锁定采用类似的原理, 参考信号来自用氢钟 10 MHz 信号同步的 E4423B (Agilent) 低相位噪声频率综合器, 使用腔镜 M3 上的 PZT, 通过控制谐振腔长, 将 f_r 锁定到氢钟的参考信号上.

NIM 飞秒光梳装置为用户提供了两个使用窗口. 窗口 1 含有从 $550\text{—}1000 \text{ nm}$ 的光, 包含了几何量干涉测量领域广泛使用的 633 nm He-Ne 激光, 其中 800 nm 附近是一个光谱峰. 窗口 2 含有 532 nm 附近的光, 可用于碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量.

飞秒光梳装置的连续锁定工作时间主要受限于系统频移信号 f_0 的幅度和信噪比的下降. 由于 PCF 光纤的芯径通常只有 $2 \mu\text{m}$ 左右, 因此光纤注入耦合系统的效率对环境噪声很敏感, 特别是震动 (包括音频噪声) 和温度漂移. NIM 飞秒光梳装置的锁定时间通常为几十分钟左右, 最长纪录为 100 min . 为了延长飞秒光梳的连续锁定工作时间, 我们提出并尝试了 PCF 光纤注入耦合系统的伺服反馈控制技术. 初步实验结果显示 f_0 的幅度和信噪比在 2 h 内无明显下降.

4. 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光的绝对频率测量

被测碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光频率标准是中国计量科学研究院电学量子所光频室研制的. 激光器为自己设计的半导体抽运 Nd:YAG 半非平面单块环形激光器^[18], 倍频晶体为单次通过 PPKTP, 可输出 2 W 的 1064 nm 红外光和 100 mW 的 532 nm 绿光, 采用调制转移光谱技术锁定到碘¹²⁷I₂(R 56)32-10 超精细谱线上^[19]. 此碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光频率标准装置 2005 年通过专家鉴定, 用两套相同的系统拍频测量, 100 s 平均时间的频率稳定度 5×10^{-15} , 达到世界先进水平.

NIM 飞秒光梳装置测量碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的光路原理如图 2 所示. 飞秒光梳第 2 窗口输出的光与碘稳频 532 nm Nd:YAG 的激光输出在偏振分光镜 PBS 上合光, 然后经过 $1/2\lambda$ 和另一个偏振分光镜, 最后在衍射光栅的帮助下用雪崩光电二极管 APD 探测拍频信号. 根据估算, 飞秒光梳每一个光梳齿的平均功率很小, 只有 nW 量级, 拍频信号很弱^[20]. 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光输出用于拍频测量部分的功率为 5 mW 左右. 由于只有与 532 nm Nd:YAG 激光频率最近的光梳齿的拍频才是最终需要的信号, 与其他光梳齿或其他光梳齿之间的相互拍频都只会产生噪声^[21], 因此使用 1800 线/mm 的衍射光栅将其他的光梳齿过滤掉. 经过仔细调整光路, 实验获得的 532 nm 激光与飞秒光梳拍频信号的信

噪比一般为 30 dB 左右, 可以完全满足频率计数测量的要求. 这一拍频信号经过带通滤波放大后, 送入 Agilent 53132A 进行频率计数测量. 计算机通过 GPIB 接口读入频率计数器的测量数据, 自己编制的基于 LabView 的软件计算出被测激光的绝对频率和 Allan 偏差. 计算 Allan 偏差所使用的公式为

$$\sigma_A(\tau) = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [f_{i+1}(\tau) - f_i(\tau)]^2}, \quad (7)$$

其中 τ 为频率测量平均时间, ν 为被测激光的光学频率, n 为取样点数, $f_i(\tau)$ 为第 i 次取样平均的频率值. 下面给出一组测量时间为 32 min 的 532 nm Nd:YAG 激光频率测量的实验结果, 测量数据和计算得出的 532 nm Nd:YAG 激光的 Allan 偏差曲线如图 5 所示. 100 s 平均时间得 Allan 偏差为 2.8×10^{-14} . 主要实验测量参数为: 53132A 计数器的闸门时间 1 s, 测量时间 32 min, 测量点数 1912, 脉冲重复频率 $f_r = 761054400$ Hz, 系统频移 $f_0 = 80000000$ Hz, 532 nm Nd:YAG 激光 AOM 移频 $f_{AOM} = 40000000$ Hz, 拍频频率平均值 $f_b = 176800636$ Hz, 由 532 nm Nd:YAG 激光频率粗测值估算的梳齿序数 $n = 740105$, 氢钟的频率修正值 $f_m = 354.9$ Hz, 用公式(6)计算得出 532 nm Nd:YAG 激光的频率(100 s 平均时间)为

$$\begin{aligned} f_{532} &= nf_r - f_b - f_0 + f_{AOM} + f_m \\ &= 563260223512991 \pm 20 \text{ (Hz)}. \end{aligned}$$

测量结果的不确定度主要有: 飞秒光梳与碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光拍频测量的 A 类不确定度

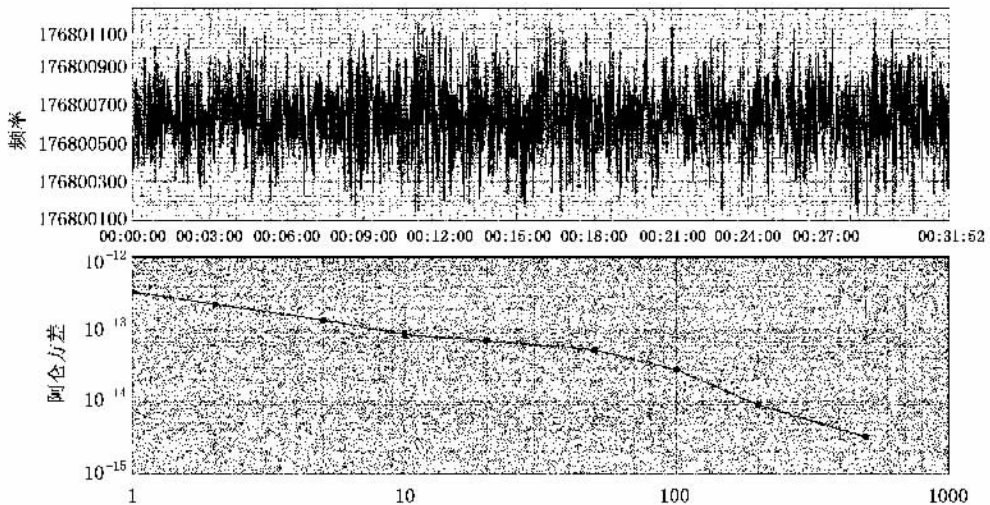


图 5 飞秒光梳装置测量碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光的频率的 Allan 偏差曲线. 计数器为 Agilent 53132A, 测量时间 32 min, 计数器闸门时间为 1 s.

分量 2.8×10^{-14} , 氢钟参考信号引入的 B 类不确定度分量 2.2×10^{-14} , 光梳锁定跟踪氢钟的不确定度在 10^{-16} 量级^[22], 这里忽略不计. 合成的测量标准不确定度为 3.6×10^{-14} , 绝对值为 ± 25 Hz. 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光的国际推荐波长不确定度为 8.9×10^{-14} ^[41], 上述碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光实际测量频率值与国际推荐值符合到不确定度之内. 据我们所知, 碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光频率标准直接溯源到铯原子微波频率标准的此类光学频率测量, 在国内还是第一次实现.

5. 结果讨论

1983 年国际计量大会(CGPM)颁布了基于真空光速的新的长度单位“m”的定义:m 是光在真空中在 $1/299792458$ s 时间间隔内所传输的距离, 这里真空中的光速 c 被定义为无误差的普适常数, 数值为 299792458 m/s. 国际计量委员会陆续推荐了十二条稳频激光谱线作为 m 定义复现的实际手段^[41], 因此将 m 定义的复现工作与稳频激光的频率测量直接联系起来. m 定义的复现精度取决于光学频率的测量精度. 直至 1999 年飞秒光梳技术的诞生, 谐波光频链是完成这一工作的唯一工具. 20 世纪八、九十

年代中国计量科学研究院曾经试图研制我国的谐波光频链装置, 终因投资过大、装置过于复杂而放弃. 本文报道的飞秒激光光学频率梳的研制完成, 可以将我国 m 定义复现使用的稳频激光光源的频率直接溯源到国家铯原子时间频率基准, 解决了必须通过 BIPM 组织的国际比对才能实现溯源的问题. 从传统谐波光频链到飞秒光学频率梳, 装置的体积从几间实验室缩小到半个光学平台, 测量精度也提高到空前的 10^{-14} 量级, 而且主要受限于参考微波频率标准的精度^[22]. 另外, 2002 年以来光钟成为国际计量科学研究的新热点, 中国计量科学院研究院也已经开始激光冷却铯原子光钟的研究工作, 飞秒光梳作为连接微波频段和光学频段的理想工具, 是未来光钟研究和应用的重要环节. 本文报道的工作为中国计量科学研究院铯原子光钟的研究奠定了良好的基础.

衷心感谢华东师范大学马龙生教授、毕志毅教授, 天津大学张志刚教授、王清月教授、博士生王专, 北京大学陈徐宗教授、博士生伊林, 中国科学院物理研究所魏志义研究员在课题研究工作中给与的帮助. 感谢中国计量科学研究院臧二军研究员领导的研究小组提供了测量实验使用的碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光频率标准装置. 特别感谢英国 Bath 大学的 W. J. Wadsworth 博士赠予了光谱扩展实验使用的 PCF 光纤.

- [1] Yang F J 2000 *Atomic Physics* (Beijing: Higher Education Press) p44 (in Chinese)[杨福家 2000 原子物理学(北京:高等教育出版社)第 44 页]
- [2] Terrien J 1968 *Metrologia* **4** 41
- [3] Hollberg L, Diddams S, Bartels A, Fortier T, Kim K 2005 *Metrologia* **42** 105
- [4] Quinn T J 2001 *Metrologia* **40** 103
- [5] Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Haensch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [6] Ranka J K, Windler R S, Stenz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [7] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stenz A, Windler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [8] Diddams S A, Udem Th, Bergquist J C, Curtis E A, Drullinger R E, Hollberg L, Itano W M, Lee W D, Oates C W, Vogel K R, Wineland D J 2001 *Science* **299** 825
- [9] Takamoto M, Hong F L, Higashi R, Katori H 2005 *Nature* **435** 321
- [10] Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Klein H A, Lea S N, Szymaniec K, Gill P 2004 *Science* **306** 1355
- [11] Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Haensch T W 1999 *Opt. Lett.* **24** 881
- [12] Matos L, Kleppner D, Kuzucu O, Schibli T R, Kim J, Ippen E P, Kaertner F X 2004 *Opt. Lett.* **29** 1683
- [13] Bartels A, Kurz H 2002 *Opt. Lett.* **27** 1839
- [14] Husakou A V, Herrmann J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2171
- [15] Hilligsoe K M, Paulsen H N, Thøgersen J, Keiding S R, Larsen J J 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1887
- [16] Han H N, Wei Z Y, Zhang J, Nie Y X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 155 (in Chinese)[韩海年、魏志义、张军、聂玉昕 2005 物理学报 **54** 155]
- [17] Li T C, Li M S, Lin P W, Wang P, Chen W L, Liu N F, Lin Y G 2006 *CPEM2006* (Torino)
- [18] Zang E J, Cao J P, Li C Y, Li Y, Li W B 2004 *China Laser* **31** 931 (in Chinese)[臧二军、曹建平、李成阳、李晔、李文博 2004 中国激光 **31** 931]
- [19] Zuo A B, Li W B, Peng Y X, Cao J P, Zang E J 2005 *China Laser* **32** 164 (in Chinese)[左爱斌、李文博、彭月祥、曹建平、臧二军 2005 中国激光 **32** 164]
- [20] Hou Y X, Ma H Q, Wu L A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 574 (in Chinese)[侯岩雪、马海强、吴令安 2005 物理学报 **54** 574]
- [21] Reichert J, Holzwarth R, Udem Th, Haensch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59

[22] Ma L S , Bi Z Y , Bartels A , Robertsson L , Zucco M , Windler R

S , Wilpers G , Oates Ch , Hollberg L , Diddams S A 2004 *Science*
303 1843

Femtosecond frequency comb and optical frequency measurement of 532 nm Nd:YAG laser^{*}

Fang Zhan-Jun[†] Wang Qiang Wang Min-Ming Meng Fei Lin Bai-Ke Li Tian-Chu

(*National Institute of Metrology of China , Beijing 100013 ,China*)

(Received 28 November 2006 ; revised manuscript received 19 December 2006)

Abstract

In this paper we report on the Ti:sapphire mode-locked femtosecond laser based optical frequency comb apparatus and developed by NIM its application in optical frequency measurement of the I₂ stabilized 532 nm Nd:YAG laser installed in NIM. The measurement result of ¹²⁷I₂ R(56)32-10 hyperfine transition is 563260223512991 ± 20 (Hz), with a relative frequency uncertainty of 3.6×10^{-14} . To our knowledge this result is the first optical frequency measurement in China which is referenced directly to the Cs microwave frequency standard.

Keywords : metrology , optical frequency metrology , femtosecond frequency comb

PACC : 0620 , 0630F , 4280W , 9570

^{*} Project supported by the Special Funding for Fundamental Research of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No.2001DEA30028).

[†] E-mail : zfang@nim.ac.cn