

双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统*

曹士英[†] 方占军 孟飞 王强 李天初

(中国计量科学研究院电学与量子计量科学研究所, 北京 100013)

(2010年6月7日收到; 2011年3月8日收到修改稿)

对中国计量科学研究院研制的第一代基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统进行了改进和优化. 通过对激光器重复频率、光谱展宽以及拍频信号探测等方面的改进, 有效地降低了光谱展宽的复杂性, 提高了飞秒光学频率梳系统的稳定性和激光频率测量的便捷性. 采用该光学频率梳系统对碘稳频 532 nm 和碘稳频 633 nm 激光绝对频率进行了测量, 测量结果在国际推荐值的不确定度范围之内.

关键词: 光学频率计量, 飞秒光学频率梳, 光谱展宽

PACS: 06.30.Ft, 95.55.Sh, 42.65.Re

1. 引言

在传统的基于钛宝石激光器的飞秒光学频率梳系统^[1-4]中, 从钛宝石飞秒激光器输出的光谱宽度只有几十纳米, 远远不能满足探测载波包络频移 f_0 ^[5] 所需的一个倍频程光谱范围, 因此必须通过高非线性介质进行光谱展宽. 最常用的方法是采用光子晶体光纤进行光谱展宽^[6, 7]. 光子晶体光纤特有的结构使得只有若干纳焦的脉冲能量就足以获得倍频程光谱展宽, 但光子晶体光纤的芯径较小, 因此光束耦合困难限制了耦合能量和耦合效率的提高. 另外, 光纤端面易受灰尘干扰导致损伤. 这些都造成了钛宝石飞秒光学频率梳系统的长期稳定性相对较差.

在钛宝石飞秒光学频率梳中, 一般采取芯径一致的光子晶体光纤. 近年来发展起来的塌陷型光子晶体光纤, 使得光纤入射端口和出射端口芯径变大, 而光纤中间部分仍然保持较小的芯径和光子晶体光纤特有的结构. 这种工艺使光纤端面可以进行擦拭以消除附着灰尘的干扰, 更重要的是光束耦合更加容易并且展宽后的光谱更加稳定.

在只有一根光子晶体光纤进行光谱展宽的光学频率梳系统中, 锁定 f_0 时需要倍频程光谱两端的

强度足够高, 而无需关心其他波长的光谱强度. 但对于一般的光子晶体光纤, 其展宽后的光谱往往呈现多峰结构. 在光学频率梳的应用中, 光学频率测量是最基本的应用. 如采用光学频率梳对 532 和 633 nm 激光进行频率测量时, 必须使 f_0 路扩谱在保证倍频程光谱两端足够强的同时, 还需要使 532 和 633 nm 处具有足够强度, 以保证待测激光与光学频率梳的拍频信号 f_b 具有足够高的信噪比, 这使光谱展宽变得相对困难. 如果采用 f_0 锁定路和 f_b 测量路分开进行, 其中一路光谱展宽用于锁定 f_0 , 另一路光谱展宽用于测量 f_b , 那么锁定路只需将光谱展宽到倍频程, 使倍频程两端具有足够的强度, 无需关心其他波长的光谱强度, 而测量路则只需将光谱展宽使其包含待测激光的光谱成分.

Adler 等^[8] 基于上述思想利用掺铒光纤激光器实现了双路光谱展宽的光学频率梳系统. 此后, Nakajima 等^[9] 又将掺铒光纤光学频率梳发展成了多路光谱展宽以满足不同用途的需要. 由于在光纤光学频率梳系统中可以以低廉的光纤放大器来弥补脉冲能量不足的弊端, 这使得多路光谱展宽的光纤光学频率梳系统成本低廉, 同时波长范围覆盖更广、应用更灵活. 但在基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统中, 由于钛宝石放大器价格高昂, 因此不可能采取后续放大来弥补脉冲能量的局限, 必

* 国家科技支撑计划 (批准号: 2006BAK03A20)、中国计量科学研究院科研基金 (批准号: 2002-AKY0928) 和中国计量科学研究院博士专项科研启动基金 (批准号: 2002-ATGQDB0902) 资助的课题.

[†] E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

须通过降低激光器的重复频率来提高单脉冲能量以满足双路光谱展宽的需要. 这是双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统的一个弊端. 尽管如此, 双光子晶体光纤方案应用于钛宝石飞秒光学频率梳系统中, 也可以降低倍频程光谱展宽时既需倍频程光谱两端强度足够高又需保持一个平滑光谱形状的难度.

基于双光子晶体光纤方案, 我们对中国科学院研制的第一代基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统^[10]进行了改进和优化. 通过对激光器重复频率、光谱展宽以及拍频信号探测等方面的改进, 有效地降低了光谱展宽的复杂性, 提高了激光频率测量的便捷性. 采用该光学频率梳系统对碘稳频 532 nm 和碘稳频 633 nm 激光的绝对频率进行了测量, 测量结果在国际推荐值的

确定度范围之内.

2. 实验装置

基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统如图 1 所示, 其中 AOM 为声光调制器, SHG 为二次谐波发生器, Ti:S 为钛宝石晶体, M1 和 M2 为平凹反射镜, M3—M8 为激光器腔镜, M9—M13 为 532 nm 波长高反射镜, M14—M20 为 800 nm 波长高反射镜, M21—M28 为镀银反射镜, PZT1, PZT2 和 PZT3 为压电陶瓷位移器, P1 和 P2 为熔融石英棱镜, BS 为 50:50 分束镜, F1—F4 为非球面透镜, L1, L2 和 L3 为普通透镜, PCF1 和 PCF2 为光子晶体光纤器件, PD1, PD2 和 PD3 为探测器, PBS1, PBS2 和 PBS3 为偏振分光棱镜, G1 和 G2 为光栅.

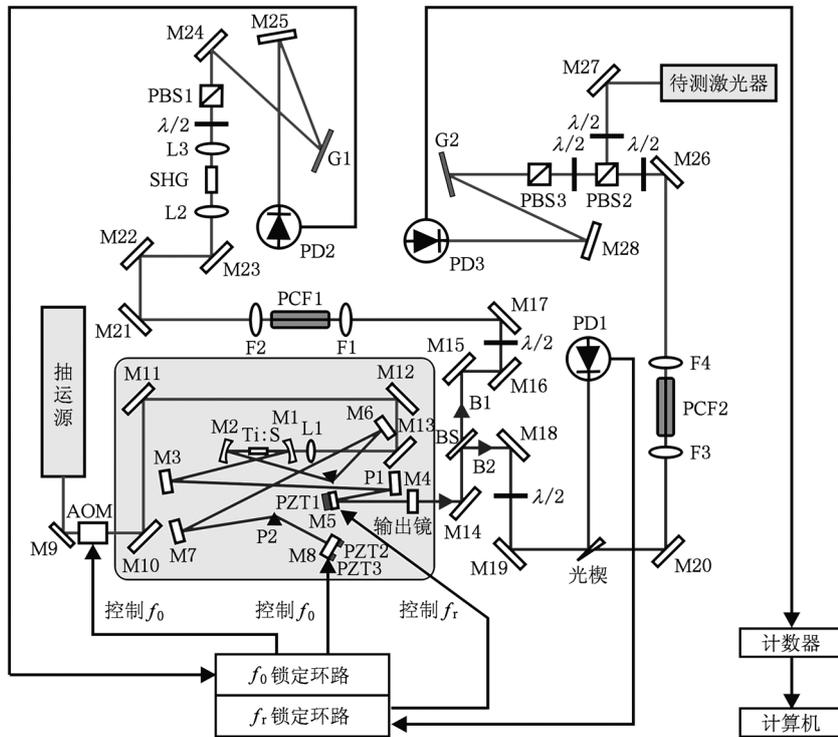


图 1 双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统结构示意图

钛宝石飞秒激光器为基本的 X 型腔结构, 采用熔融石英棱镜对补偿激光器腔内色散. 钛宝石晶体采用布儒斯特角度切割, 通光长度为 2.3 mm, 截面尺寸为 4.6 mm × 4.0 mm. 晶体在 532 nm 处的吸收系数 $\alpha = 4.2 \text{ cm}^{-1}$. 实验中采用设定温度为 15 °C 的恒温水冷, 通过循环制冷使钛宝石晶体始终保持在比室温低的温度. 在 6.5 W 抽运的情况下, 钛宝石激光器在锁模状态下输出的平均功率大于 400

mW, 其中心波长为 821.4 nm, 光谱宽度为 20 nm, 脉冲宽度为 26.7 fs, 重复频率由以前的 780 MHz^[7]降低至 100 MHz 附近.

从钛宝石飞秒激光器输出的激光通过 50:50 的分束镜分成 B1 和 B2 两路光. 两路光分别通过塌陷型的光子晶体光纤进行光谱展宽. B1 路用于光谱展宽探测 f_0 信号, B2 路用于光谱展宽探测 f_r 信号, 两路光的平均功率均为 200 mW. 两路光进行光谱

展宽时采用相似的光路结构. 激光在进入光纤前首先通过一个二分之一波片改变光的偏振方向, 通过旋转波片的角度可以微调光谱展宽后的光谱形状和光谱宽度. 经二分之一波片后, 通过非球面透镜 F1 和 F3 将光束耦合进入光子晶体光纤中. 非球面透镜焦距为 4.51 mm, 数值孔径为 0.55, 相当于 35 倍的物镜. 从光子晶体光纤光谱展宽出来的光束进入 40 倍的准直物镜 F2 和 F4, 调节准直物镜使光谱展宽后的光束变成平行光以方便后续光路调节. 为了更进一步方便调节, B1, B2 路进入光纤前的非球面透镜 F1 和 F3 分别安装于三维电控平移台上, 通过外部电控系统独立地实现对两个透镜 x, y, z 方向进行微调. 实验表明, 两个透镜 x, y, z 方向的微调可以有效保证 f_0 和 f_b 信噪比的长期稳定.

对于 B1 路, 我们采用 Menlo System 公司生产的 PSS2610 型的光子晶体光纤模块, 在 200 mW 入射的条件下, 通过优化偏振从准直物镜 F2 出来的功率约为 90 mW, 耦合效率在 45% 左右. B1 路展宽后的光谱如图 2 所示, 光谱覆盖了 400—1150 nm, 超过了倍频程宽度. 通过优化非球面透镜 F1 的 x, y, z 三个方向及光的偏振方向, 使倍频程光谱在 515 和 1030 nm 处具有较大强度, 以满足后续产生 f_0 的晶体的最佳匹配角度. 从展宽后的光谱图可以看出, 此时对于 f_0 具有最佳状态的光谱在 532 和 633 nm 两个波长位置上的强度均较低. 如采用这种光谱对 532 或 633 nm 激光波长进行频率测量, 其拍频信号的信噪比将受到很大限制.

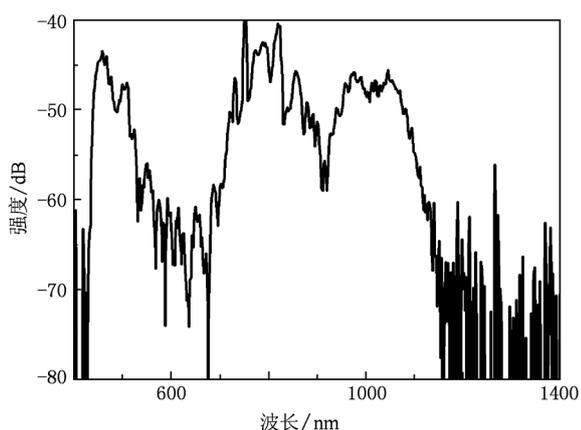


图2 B1路展宽后的光谱

对于 B2 路, 我们采用 NKT 公司生产的 FemtoWHITE-800 型光子晶体光纤模块. 在 200 mW 入射的条件下, 从准直物镜 F2 出来的功率同样约

为 90 mW, 耦合效率在 45% 左右. 通过调节二分之一波片以及 B2 路透镜 F3 的 x, y, z 方向, 选取两个最佳位置, 使展宽后光谱分别覆盖所要测量的 532 和 633 nm 激光波长. 图 3 给出了 B2 路典型的展宽后的光谱. 从图 3 可以看出, 通过调节波片完全可以使 B2 路光谱展宽后满足 532 和 633 nm 激光的绝对频率测量. 图 3 中光谱 I 用于对碘稳频 532 nm 激光的绝对频率测量, 光谱 II 用于对碘稳频 633 nm 激光的绝对频率测量. 波长为 532 和 633 nm 激光的绝对频率测量转换仅仅通过简单的调节波片即可完成而无需更换特种光纤, 这使调节控制更加简单可靠, 也保证了后续实验的快速进行.

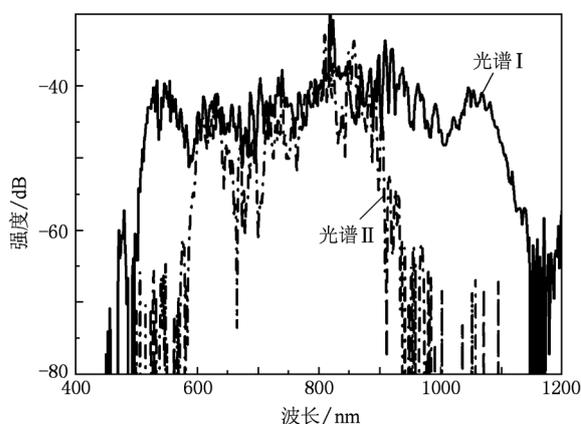


图3 B2路典型的展宽后的光谱

B1 路的展宽光谱经准直后, 进入单臂 $f-2f$ 结构^[11]探测 f_0 信号. 采用单臂 $f-2f$ 结构时, 倍频程光谱中的 f_n 和 f_{2n} 波长成分同时进入晶体, 在空间上始终保持重合状态. 当晶体处于特定匹配角度时 f_n 倍频转换至 $2f_n$, 此时 $2f_n$ 与 f_{2n} 仍然保持高度空间重合. 在晶体参数选择合适的条件下, 尽管 $2f_n$ 与 f_{2n} 成分由于色散作用存在微小的时间延迟, 但仍然能在探测器上形成拍频信号. 实验表明采用单臂 $f-2f$ 结构和双臂 $f-2f$ 结构相比, 拍频信号的信噪比未发现大幅度变化. 但单臂 $f-2f$ 结构相对简单, 调节上无需过分考虑空间重合, 并且稳定性大大提高. 这使单臂 $f-2f$ 结构可以很方便地应用于 f_0 探测系统中.

在该飞秒光学频率梳系统中, 二次谐波产生晶体为周期极化磷酸氧钛钾 (PPKTP) 晶体. 该晶体的通光长度为 30 mm, 晶体通光的前后表面镀有对 515 和 1030 nm 同时高透的膜系. 由于倍频光和基频光偏振相互垂直, 两个光在经过二分之一波片后

在 PBS1 上投影, 形成在一个方向上有相同的偏振态. 从 PBS1 输出的光经平面反射镜反射至衍射光栅 G1 上, G1 具有 1800 mm^{-1} 的刻痕, 用于将光谱成分在空间上展开. 选取 515 nm 激光的频率成分通过反射镜耦合进入探测器 PD2 中, 可以获得拍频信号 f_0 . 通过优化 $f-2f$ 结构, 在 300 kHz 分辨率带宽的条件下获得了信噪比优于 40 dB 的 f_0 信号输出, 最大信噪比可达 43 dB , 如图 4 所示. 这完全可以满足 f_0 锁定的需要.

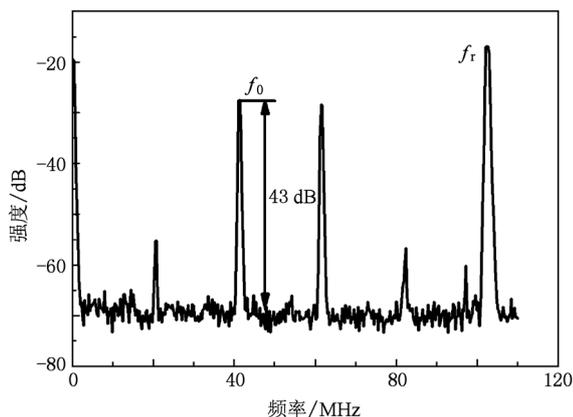


图 4 频谱分析仪记录的 f_0 信号

3. 频率锁定

光学频率梳, 主要通过控制飞秒激光器的重复频率 f_r 和载波包络偏移 f_0 两个参量来实现. f_r 的控制通过控制激光器的腔长实现; f_0 的控制可以通过控制钛宝石激光器内棱镜臂的端镜旋转实现, 也可以通过控制抽运光的功率来实现.

f_r 信号由激光器输出的激光经光楔分出一小部分利用快速光电二极管 PD1 进行探测. 在探测过程中, 我们使用 900 MHz 带通滤波器取出其中的 9 倍频信号, 与锁定到氢钟上的低噪声频率综合器产生的 920 MHz 信号进行鉴相, 得到误差信号. 将此误差信号通过低通滤波器及放大器后送入比例-积分-微分 (PID) 控制器, 最后输出给压电陶瓷 (PZT) 高压放大器, 通过控制钛宝石飞秒激光器腔镜 M5 处的 PZT1 的伸缩来实现对 f_r 的锁定. PZT1 对钛宝石飞秒激光器重复频率的调节范围为 3.7 kHz , 而激光器每小时的重复频率漂移为数百赫兹^[12]. PZT1 的调节范围可以满足光学频率梳数小时的频率锁定.

f_0 信号由雪崩光电二极管 PD2 探测获取, 并通过 AOM 控制抽运光功率的方法来实现 f_0 的锁定. 由于在 f_0 信号锁定前, 激光器的 f_0 随机变动, 有时 f_0 的频率距离参考频率达数十兆赫兹, 这使得锁定前对 f_0 的微调十分困难. 为此, 我们在线性腔飞秒激光器靠棱镜臂的端镜 M8 上加入了装有 PZT2 和 PZT3 驱动的转动机构. 通过该机构可以很方便地对 f_0 进行大范围的调节. 这样在 f_0 锁定前, 如果 f_0 的频率距离参考频率较远, 那么可以先通过此机构将 f_0 的频率调整到参考频率附近.

雪崩光电二极管 PD2 输出信号经过低通滤波器、放大器和功率分配器后分成两路. 一路送到频谱分析仪, 用来监视系统频移 f_0 信号的信噪比及锁定状态. 另一路通过中心频率为 21.4 MHz 的带通滤波器及低噪声放大器, 送往数字鉴频/鉴相器与锁定到氢钟上产生 21.4 MHz 频率的频率综合器进行比较, 获得误差信号, 再将此误差信号送入放大器和 PID 控制器, 最后输出给 AOM 驱动器. 通过控制注入到钛宝石飞秒激光器腔内的抽运光功率, 实现将 f_0 锁定到氢钟的标准频率参考信号上.

4. 频率测量结果及分析

利用该光学频率梳系统, 我们分别对碘稳频 532 nm 和碘稳频 633 nm 激光的绝对频率进行测量, 以验证光学频率梳的性能.

由于采用了双路光谱展宽结构, 这使得 f_0 路的光谱只需覆盖待测激光的频率成分即可. 在这里我们以测量 532 nm 激光的绝对频率为例, 其余波长测量与此类似. 调节 PCF2 一路的二分之一波片使展宽后的光谱覆盖 532 nm 波长. 展宽后的光谱经准直物镜 F4 后, 通过高反镜与外部待测激光在 PBS2 上合束. 两路光要分别通过二分之一波片进行偏振旋转以形成相互垂直的偏振态. 从 PBS2 透射的光再次经过二分之一波片使两束光在同一偏振状态下存在投影, 此后通过 PBS3 形成具有一致的偏振状态. 利用 1800 mm^{-1} 刻痕的光栅 G2 将光谱成分空间分开, 选取待测激光的频率成分通过反射镜耦合进入探测器 PD3 中.

被测碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光波长标准是由中国计量科学研究院电学与量子计量科学研究所研制的激光波长标准装置^[13]. 激光器为自行设计的半导体抽运 Nd:YAG 半非平面单块环形

激光器,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,其中用于测量的 532 nm 绿光约为 3 mW.

利用飞秒光学频率梳对碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光波长标准的频率测量结果和计算获取的阿伦偏差曲线如图 5 所示. 512 s 平均时间的阿伦偏差为 8.7×10^{-14} . 采用氢钟参考信号同步的 53132A 型频率计数器. 主要实验测量参数如下:

53132A 型计数器的取样时间为 1 s,总测量时间约为 5400 s,测量点个数为 5425,脉冲重复频率 $f_r = 102118763$ Hz,系统频移 $f_0 = 21400000$ Hz,532 nm Nd:YAG 激光的 AOM 频移 $f_{AOM} = 40000000$ Hz,拍频频率平均值为 $f_b + f_r = 128104267$ Hz. 由 532 nm Nd:YAG 激光频率推荐值估算的梳齿序数 $N = 5515737$,计算得出 532 nm Nd:YAG 激光的频率 $f_{532} = Nf_r + f_0 + f_{AOM} + f_b = 563260223514.353$ kHz.

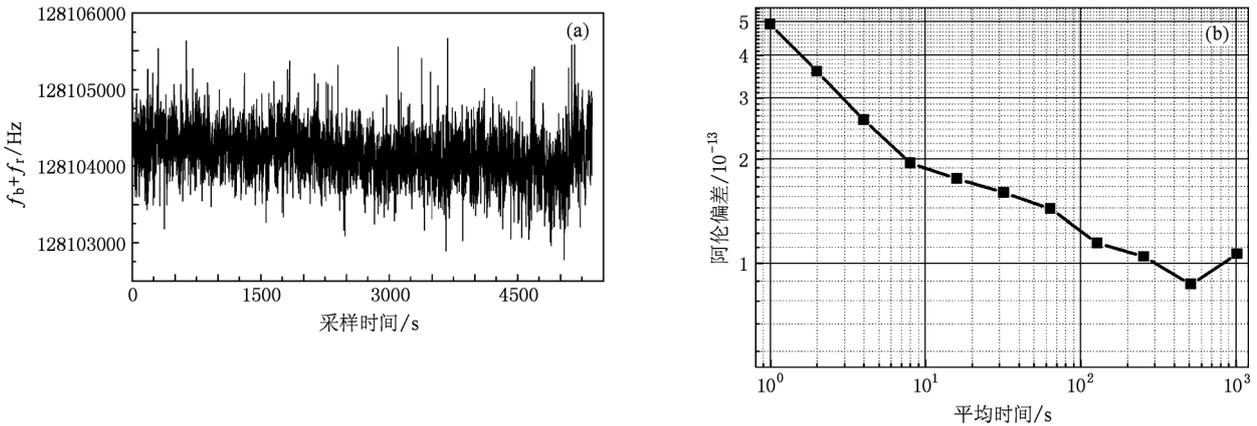


图 5 飞秒光梳装置测量得到的碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率及计算得到的阿伦偏差曲线 (a) 实测的频率数据, (b) 计算获得的阿伦偏差曲线

从 2010 年 4 月 6 日至 2010 年 4 月 15 日,我们采用同样的参数先后锁定 6 次进行测量,6 次的测量结果如图 6 所示. 由图 6 可知,测量频率的平均值为 563260223514.410 kHz,标准偏差为 0.33 kHz. 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光的国际推荐频率值为 (563260223513 ± 5) kHz,不确定度为 8.9×10^{-12} . 采用飞秒光学频率梳对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量结果在国际推荐值的不确定度范围之内.

中国计量科学研究院电学与量子计量科学研究所研制的激光波长标准装置. 利用飞秒光学频率梳对碘稳频 633 nm He-Ne 激光波长标准的频率测量结果和计算获取的阿伦偏差曲线如图 7 所示. 128 s 平均时间的阿伦偏差为 6.9×10^{-13} . 采用氢钟参考信号同步的 53132A 型频率计数器. 主要实验测量参数如下:53132A 型计数器的取样时间为 1 s,总测量时间为 1000 s,脉冲重复频率 $f_r = 102098769$ Hz,系统频移 $f_0 = 21400000$ Hz,拍频频率平均值为 $f_b + 2f_r = 239664043$ Hz. 由 633 nm He-Ne 激光频率的推荐值估算的梳齿序数 $N = 4638767$,计算得出 633 nm He-Ne 激光的频率 $f_{633} = Nf_r + f_0 + f_b = 473612353609.304$ kHz.

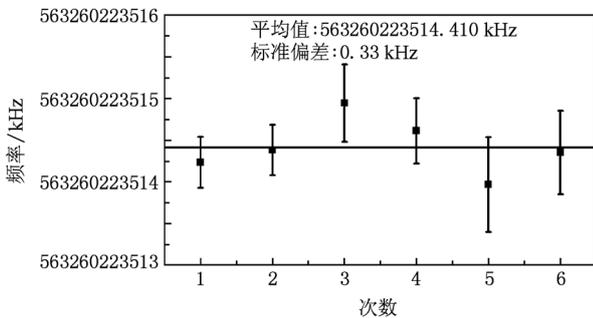


图 6 飞秒光学频率梳装置对碘稳频 532 nm Nd:YAG 固体激光频率的多次测量结果

从 2010 年 4 月 10 日至 2010 年 4 月 15 日,我们使用同样的参数先后锁定 4 次进行测量,4 次的测量结果如图 8 所示. 由图 8 可知,测量频率的平均值为 473612353609.199 kHz,标准偏差为 0.184 kHz. 碘稳频 633 nm He-Ne 激光的国际推荐频率值为 (473612353604 ± 10) kHz,不确定度为 2.1×10^{-11} . 采用飞秒光学频率梳对碘稳频 633 nm He-Ne 激光频率的测量结果在国际推荐值的不确定度范围之内.

被测碘稳频 633 nm He-Ne 激光波长标准是由

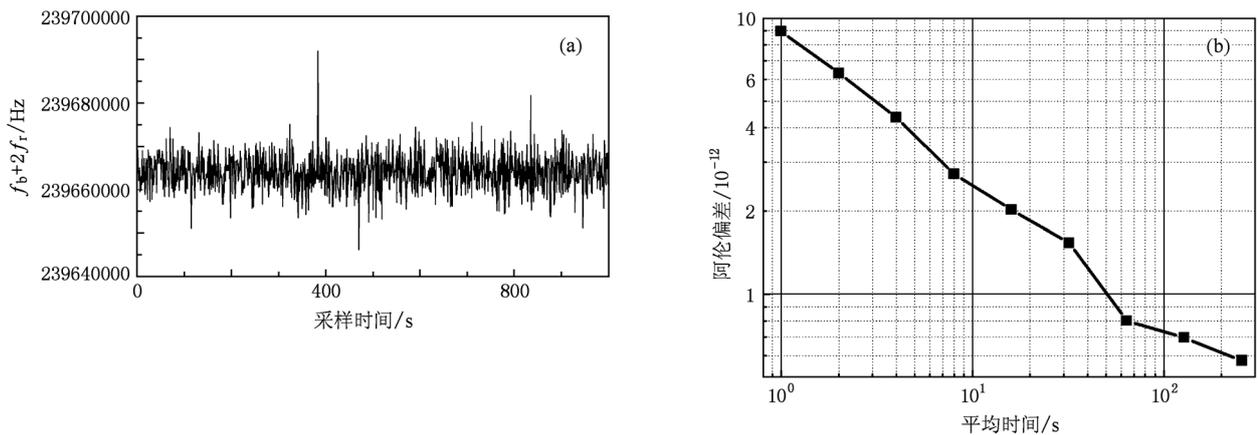


图7 飞秒光梳装置测量得到的碘稳频 633 nm He-Ne 激光频率及计算得到的阿伦偏差曲线 (a) 实测的频率数据, (b) 计算获得的阿伦偏差曲线

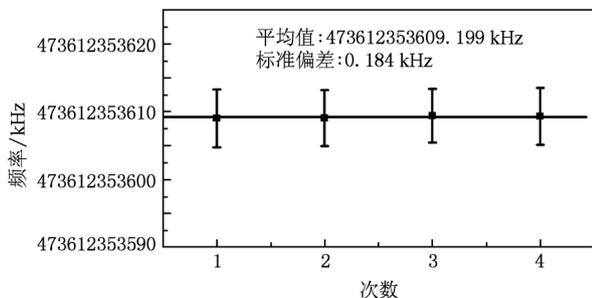


图8 飞秒光学频率梳装置对碘稳频 633 nm He-Ne 固体激光频率的多次测量结果

5. 结 论

通过对中国计量科学研究院研制的第一代基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统的优化和改进,提高了该飞秒光学频率梳系统的稳定性和测量激光频率的便捷性. 在光源上,通过降低振荡器的重复频率来提高脉冲能量从而降低倍频程光谱获取的难度. 在光谱展宽上,采用 f_0 锁定和 f_b 测量路分开进行,其中一路通过光子晶体光纤光谱展宽并用于探测 f_0 ,另一路通过光子晶体光纤光谱展宽

用于探测与外光路的拍频信号 f_b ,大大降低以前倍频程光谱展宽时既需倍频程光谱两端强度足够高又需保持一个平滑光谱形状的难度. 在 f_0 探测上,采用单臂 $f-2f$ 结构替代原有的双臂 $f-2f$ 结构,降低了探测 f_0 信号的难度并提高了 f_0 的稳定性.

采用该光学频率梳系统分别对碘稳频 532 nm 和碘稳频 633 nm 激光的绝对频率进行了多次测量以验证光学频率梳的性能. 碘稳频 532 nm 激光器绝对频率的测量平均值为 563260223514.410 kHz,标准偏差为 0.33 kHz. 碘稳频 633 nm 激光器绝对频率的测量平均值为 473612353609.199 kHz,标准偏差为 0.184 kHz. 测量结果都在国际推荐值的不确定度范围之内,说明该光学频率梳系统可以很好地完成对激光绝对频率的测量. 双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统的成功建立与性能验证为光学绝对频率的测量、微波频标与光频标的准确连接以及后续光钟的研究提供了可靠的手段.

感谢中国计量科学研究院臧二军研究员领导的研究小组和钱进研究员领导的研究小组分别为本文工作提供碘稳频 532 nm Nd:YAG 和 633 nm He-Ne 固体激光波长标准装置.

[1] Reichert J, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59
 [2] Kirchner M S, Fortier T M, Bartels A, Diddams S A 2006 *Opt. Express* **14** 9531
 [3] 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]
 [4] 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 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2760 (in Chinese) [韩海年、张 炜、王 鹏、李德华、魏志

- 义、沈乃澂、聂玉昕、高玉平、张首刚、李师群 2007 物理学报 **56** 2760]
- [5] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [6] Russell P St J 2003 *Science* **299** 358
- [7] Hu M L, Wang Q Y, Li Y F, Wang Z, Zhang Z G, Chai L, Zhang R B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4243 (in Chinese) [胡明列、王清月、栗岩峰、王专、张志刚、柴路、章若冰 2004 物理学报 **53** 4243]
- [8] Adler F, Moutzouris K, Leitenstorfer A, Schnatz H, Lipphardt B, Grosche G, Tauser F 2004 *Opt. Express* **12** 5872
- [9] Nakajima Y, Inaba H, Hosaka K, Minoshima K, Onae A, Yasuda M, Kohno T, Kawato S, Kobayashi T, Katsuyama T, Hong F L 2010 *Opt. Express* **18** 1667
- [10] Fang Z J, Wang Q, Wang M M, Meng F, Lin B K, Li T C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5684 (in Chinese) [方占军、王强、王民明、孟飞、林百科、李天初 2007 物理学报 **56** 5684]
- [11] Schibi T R, Minoshima K, Hong F L, Inaba H, Onae A, Matsumoto H, Hartl I, Fermann M E 2004 *Opt. Lett.* **29** 2467
- [12] Cao S Y, Zhang Z G, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2971 (in Chinese) [曹士英、张志刚、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 2971]
- [13] Zang E J, Cao J P, Li Y, Deng Y K, Yang T, Li C Y, Li W B 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 203 (in Chinese) [臧二军、曹建平、李焯、邓勇开、杨涛、李成阳、李文博 2007 中国激光 **34** 203]

Ti:sapphire femtosecond comb with two spectral broadening parts*

Cao Shi-Ying[†] Fang Zhan-Jun Meng Fei Wang Qiang Li Tian-Chu

(Division of Electricity and Quantum Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 7 June 2010; revised manuscript received 8 March 2011)

Abstract

The first generation of femtosecond optical frequency comb (FOFC) based on the Ti:sapphire femtosecond laser in National Institute of Metrology of China, is improved and optimized in this paper. By changing the repetition rate of the femtosecond laser, the spectral broadening parts and the beat frequency signal detection, the complexity of spectral broadening is reduced and the stability of FOFC and the convenience for the frequency measurement are improved. With such an FOFC, the absolute frequencies of the I₂-stabilized Nd:YAG 532 nm laser and I₂-stabilized He-Ne 633 nm laser are measured. The experimental results are in accordance with the recommended values by the International Committee for Weights and Measures.

Keywords: optical frequency metrology, femtosecond optical frequency comb, spectrum broadening

PACS: 06.30.Ft, 95.55.Sh, 42.65.Re

* Project supported by the State Key Program of Science and Technology of China (Grant No. 2006BAK03A20), the Scientific Research Foundation of National Institute of Metrology, China (Grant No. 2002-AKY0928) and the Scientific Research Foundation for Doctor of National Institute of Metrology, China (Grant No. 2002-ATGQDB0902).

[†] E-mail: caoshiying@nim.ac.cn