

长时间精密锁定的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳*

曹士英[†] 孟飞 林百科 方占军 李天初

(中国计量科学研究院, 时间频率计量研究所, 北京 100013)

(2011 年 11 月 14 日收到; 2011 年 11 月 23 日收到修改稿)

自行研制了基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳并实现了重复频率 f_r 信号和载波包络偏移频率 (Carrier-envelope offset, f_o) 信号的精密锁定, 锁定后的 f_r 信号和 f_o 信号的频率抖动量的标准偏差分别为 0.515 mHz 和 93.13 mHz.

关键词: 掺 Er 光纤激光器, 光纤光学频率梳, 光学频率计量

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

1 引言

2002 年来, 光钟成为国际计量科学研究的新热点 [1-3], 基于冷原子或单离子存储的光钟有潜力达到 10^{-18} 量级的频率准确度. 在不远的将来, 光钟很有可能取代铯原子钟成为新的时间频率基准. 如果使用光钟来重新定义“秒”, 将对全球卫星定位系统、人类探索宇宙和物理学规律研究领域产生极为深远的影响. 飞秒光学频率梳作为连接微波频率标准和光学频率标准的桥梁, 是光钟研究和应用的重要环节.

近年来, 超短脉冲技术和光纤制造技术的飞速发展带动了基于光纤飞秒激光器的光学频率梳的迅猛发展. 光纤飞秒光学频率梳在一定程度上有逐步取代钛宝石飞秒光学频率梳的趋势. 光纤飞秒光学频率梳从波长上可以分为基于掺 Er 光纤飞秒激光器的波长在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近的光学频率梳 [4] 和基于掺 Yb 光纤飞秒激光器的波长在 $1 \mu\text{m}$ 附近的光学频率梳 [5]. 从应用角度讲, 由于铯原子光钟和钙离子光钟的频率都在可见光域, 因此可见光域内的光学频率梳的研究更能吸引科研工作者的兴趣.

对于高重复频率的光学频率梳, 不仅能满足频

率测量的需要, 还可以解决天文观测中的高精度视向速度定标问题. 最近的报道结果显示, 掺 Er 光纤光学频率梳的重复频率已达到 300 MHz [6]、掺 Yb 光纤激光器的重复频率也已达到 200 MHz [7]. 进一步提高光纤飞秒激光器的重复频率的工作吸引了业界的关注, 显示了进一步发展的可能.

在研究路线上, 具有更高稳定性的全光纤光学频率梳必然要取代分立式光纤光学频率梳. 全光纤光学频率梳由于具有稳定性高、体积小、调节简单、成本低廉、携带方便、易于维护等诸多优点而受到人们的广泛青睐. 特别是对于 $1.5 \mu\text{m}$ 通信波长段的掺 Er 光纤光学频率梳, 不仅在传输和控制上具有标准产品, 更重要的是通过对其倍频可以取代钛宝石飞秒光学频率梳. 从长远看, 综合了体积小、功耗低、价格低以及各种优良光学性能的光纤光学频率梳是光学频率梳发展的必然趋势.

国内光学频率梳的研究起步于 2000 年前后 [8-10], 主要围绕钛宝石飞秒光学频率梳及其单元技术展开. 国内光纤光学频率梳的研究近几年来刚刚起步 [11-14], 目前尚未有完全自己研制的光纤光学频率梳的报道.

本文将详细介绍自主研发的基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳和对其的精密锁定工

* 国家重大科学研究计划 (编号: 2010CB922902)、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

作. 采用重复频率为 128 MHz 的掺 Er 光纤飞秒激光器, 通过两级放大、倍频程扩谱和拍频探测系统, 在探测到 40 dB 信噪比 f_0 信号的基础上, 实现对激光器 f_0 信号的锁定; 通过对激光器腔长和温度控制, 采用腔长反馈的方法实现对激光器 f_r 信号的锁定.

2 实验装置

基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳如图 1 所示. 整个光学频率梳包括光学和电学两部分. 光学部分包括掺 Er 光纤飞秒振荡器 (如图 1 中 A 部分所示)、掺 Er 光纤飞秒放大器 (如图 1 中 B 部分所示)、高非线性光纤扩谱 (如图 1 中 C 部分所示) 和单臂 $f-2f$ 系统 (如图 1 中 D 部分所示), 用于实现对激光器重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_0

的探测. 电学部分的功能是利用探测获得的光学信号与参考频率比较实现对激光器重复频率信号和载波包络偏移频率信号的锁定.

在掺 Er 光纤飞秒振荡器中, 我们采用非线性偏振旋转锁模方式. 980 nm 的半导体抽运光经过 980 nm/1550 nm 波分复用器件 WDM 耦合进入长度为 40 cm 的掺 Er 增益光纤产生激光. 增益光纤在 1530 nm 处的吸收率为 110 dB/m. 光纤准直器 Col1, Col2 成对出现, 其耦合效率约为 85%. 光学隔离器 ISO 为厚度为 4 mm 的微型空间光隔离器, 用于保证了腔内激光光路的单向性. 光纤准直器之间的空间光路由两个四分之一波片、一个二分之一波片以及一个偏振分光片 PBS 构成, 用于实现光纤中非线性偏振旋转锁模和线偏光的输出. 在 600 mW 抽运下, 我们得到了平均功率为 60 mW 的锁模激光输出.

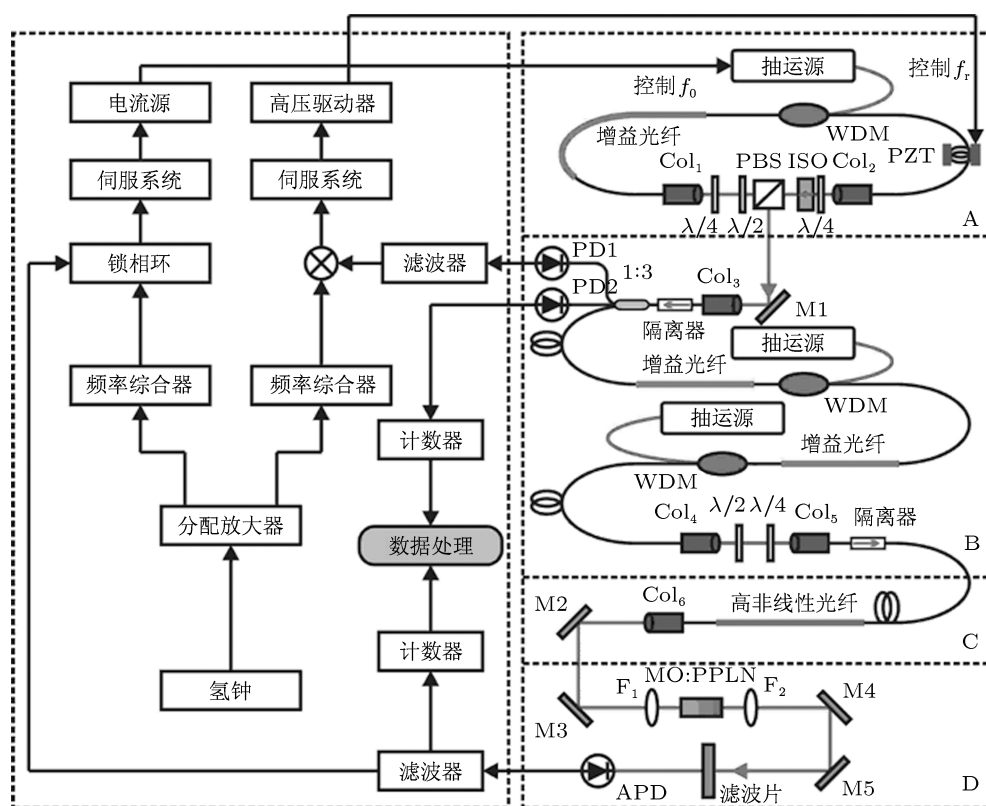


图 1 基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳系统. 其中: WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器件, Col1—Col6 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片, ISO 为空间隔离器, $\lambda/4$ 为四分之一波片, $\lambda/2$ 为二分之一波片, M1—M5 为平面反射镜, F1, F2 为聚焦透镜, MO:PPLN 为倍频晶体, APD 为 InGaAs 雪崩光电探测器, PD1 和 PD2 为 InGaAs 光电探测器, PZT 为压电位移器

从振荡器出来的飞秒激光脉冲, 经光纤准直器、光纤隔离器和一分三分束器后分成三路, 每路功率约为 7 mW, 其中第一路光进入光电二极

管 PD1 探测激光器的重复频率, 用于后续重复频率锁定需要; 第二路光进入光电探测器 PD2 探测脉冲序列的重复频率, 通过计数器采集进行后续数

据处理; 第三路光进入两级放大系统. 两级放大均采用单端后向抽运. 两级放大器中采用的掺 Er 增益光纤的长度分别为 38 cm 和 45 cm, 在 1530 nm 处的吸收率均为 80 dB/m. 第三路经过一级放大器, 在 700 mW 的抽运功率下能够得到 210 mW 的输出; 之后再经过二级放大器, 在 700 mW 的抽运功率下可以达到 315 mW 的输出.

经过两级放大压缩后的脉冲通过长度为 30 cm 的高非线性光纤进行倍频程扩谱. 高非线性光纤的有效非线性系数为 $10.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 在 1550 nm 处的色散为 $1.74 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 在 1550 nm 处的色散斜率为 $0.01 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$. 在放大器和高非线性光纤之间, 我们采用一对二分之一波片和四分之一波片组合用于改变进入高非线性光纤中激光的偏振方向, 以保证倍频程光谱的产生. 同时, 为了方便光纤固定和色散补偿, 我们在高非线性光纤后焊接了一个具有 10 cm 负色散单模光纤尾纤的光纤准直器.

通过仔细优化振荡器和放大器之间光纤长度、放大器和高非线性之间的光纤长度、放大器的抽运功率、放大器和高非线性光纤之间的波片组合, 在两级放大器抽运功率分别为 395 mW 和 700 mW 的条件下可以在 1100—2200 nm 的范围内获得倍频程光谱输出.

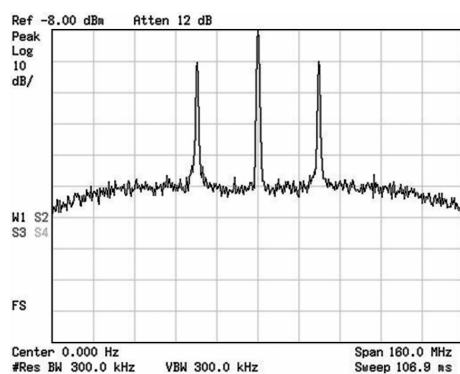


图2 频谱仪记录的 40 dB 信噪比 f_0 信号 (其中分辨率带宽为 300 kHz)

倍频程光谱进入单臂 $f-2f$ 系统探测 f_0 信号. 我们采用的倍频晶体 MO: PPLN 为扇形光栅结构, 其渐变通道为 21—35 μm , 可以实现对 1610—2340 nm 之间连续可调波长的倍频, 晶体前后分别采用短焦距透镜聚焦和光路准直, 从第二个透镜出射的光经过 1100 nm 窄带滤波器后进入 InGaAs 雪崩光电探测器. 从探测器出来的信号通过一个 50 MHz 的低通滤波器进入频谱仪中监测 f_0 信号.

在 300 kHz 分辨率带宽的条件下, 我们获得了 40 dB 信噪比的 f_0 信号, 如图 2 所示. 由于在进入频谱仪前我们采用了一个 50 MHz 的低通滤波器, 因此频谱仪上显示三个信号从左到右分别为 $-f_0$, 0 和 f_0 .

3 频率锁定

光学频率梳主要是通过控制飞秒激光器的两个参数, 即重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_0 来实现. f_r 信号的控制通过控制激光器的腔长来实现, f_0 信号的控制可以通过控制棱镜臂的端镜偏移, 也可以通过控制抽运光的光强来实现. 在光纤光学频率梳中, 由于光纤激光器内部没有棱镜对补偿色散, 因此需要通过控制抽运光的功率来实现对 f_0 信号的控制.

3.1 重复频率的控制及精密锁定

对于半全光纤形式环形腔的重复频率控制, 一种方法是将其中的一个光纤准直镜至于压电陶瓷 (PZT) 或微位移平台上. 这种方法可以实现对激光器重复频率的大范围控制, 但由于 PZT 上负载较大, 会影响 PZT 的响应频率和伺服带宽, 另外光纤准直器的微调容易使光路失谐, 这些都不利于重复频率的精密锁定. 另外一种方式是将激光器内的光纤黏于 PZT 上, 由于光纤本身质量较轻, 减小了 PZT 的负载, 使 PZT 可以保持较高的响应频率和适当的调节范围. 我们在实验中采用 PZT 拉伸光纤的方法来控制光纤激光器的重复频率.

在激光器中不同光纤器件尾纤焊接后采用热塑管进行了保护. 考虑到激光器中最长的光纤为增益光纤, 同时避开热塑管的影响, 我们选择将增益光纤黏于 PZT 上来控制光纤的伸长, 从而实现对激光器重复频率的控制. 为了增加 PZT 单位电压下光纤的伸长量, 我们将增益光纤盘卷两圈进行黏连, 这样在相同的电压下光纤的伸长量将增大两倍, 也增大了激光器的重复频率的调节范围. 在黏连光纤的过程中, 必须使光纤黏结点之间的光纤保持绷紧状态, 否则会大大减小光纤的伸长范围. 对于重复频率为 128 MHz 的激光器, 激光器系统中的 PZT 在最大驱动电压 100 V 的条件下, 频率调节范围约为 900 Hz.

激光器自由运转时, 温度对激光器重复频率影响很大. 在振荡器底板未控温时, 激光器重复频率在 3 kHz 的范围内漂移振荡. 尽管实验室空调系统连续运转并保持恒温, 但随着昼夜温度的改变, 激光器自身的温度也随之振荡, 这一点从激光器重复频率的长时间监测中很容易观测. 为了实现激光器 f_r 信号的长时间锁定, 必须使激光器重复频率的漂移在 PZT 的伺服范围之内. 为此我们对振荡器的底板进行精密温度控制, 温度控制的精度在 0.1 °C 范围内. 采用温控后, 尽管激光器重复频率仍随着室内的温度而昼夜变化, 但总的漂移量却由未控温时的 2088.2 Hz 缩小到控温后的 807.6 Hz.

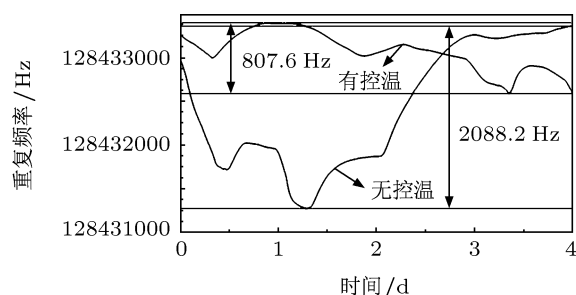


图3 重复频率 f_r 信号未锁定时, 振荡器底板温控对重复频率 f_r 的影响

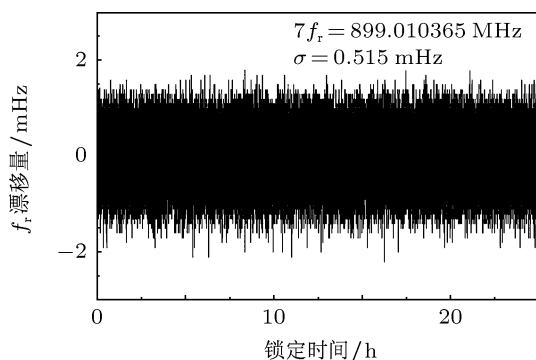


图4 重复频率 f_r 信号锁定后的频率变化

在底板控温的基础上, 我们利用振荡器输出的一路光通过光电探测器 PD1 探测激光器的重复频率 f_r 信号, 使用 1 GHz 带通滤波器, 取出其中的 7 倍频信号, 与锁定到氢钟上的低噪声频率综合器产生的频率为 899010365 Hz 的信号进行鉴相, 产生误差信号. 将此误差信号通过低通滤波器后送入伺服系统, 最后输出给 PZT 高压驱动器, 通过控制飞秒激光器内部 PZT 的伸缩来控制腔长的变化, 从而实现重复频率 f_r 的锁定. 图 4 给出了 25 h 连续锁定后的重复频率的漂移, 其中采样时间为 1 s. 锁定后

重复频率的平均值为 128430052.143 Hz, 标准偏差为 0.515 mHz.

3.2 载波包络偏移频率 f_0 信号的控制及精密锁定

与钛宝石飞秒光学频率梳相比, 光纤光学频率梳的最大优点在于稳定度高. 这一点在 f_0 信号上能够得到很好的体现. 在光纤光学频率梳中, 由于空间光路的减小, 特别是扩谱系统采用的高非线性光纤可以与放大器的光纤直接焊接, 这使 f_0 信号频率的漂移量得到减小, 如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, f_0 信号在未锁定的条件下频率漂移量每小时只有数 MHz, 这明显小于钛宝石飞秒光学频率梳中 f_0 信号的频率漂移量. 而且在光纤光学频率梳中 f_0 信号的频率漂移并没有带来信噪比的降低, 这对于 f_0 信号的频率锁定十分有利.

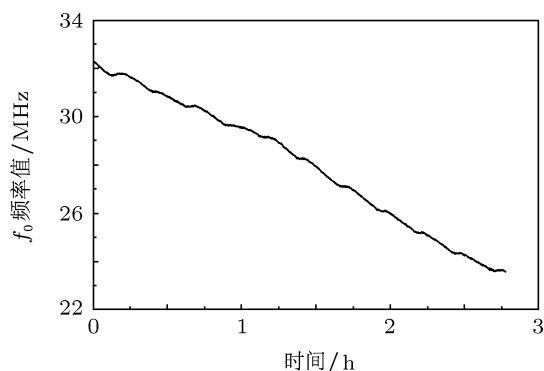


图5 载波包络偏移频率 f_0 信号锁定前的频率变化

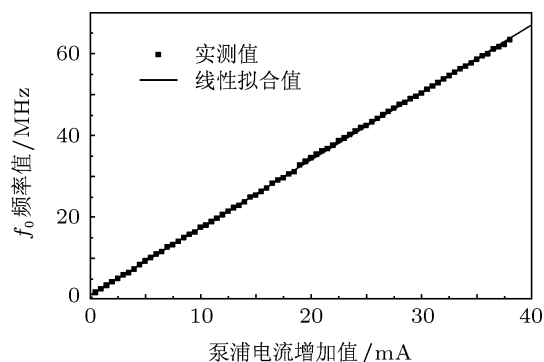


图6 载波包络偏移频率 f_0 信号频率随抽运光电流的变化

我们通过控制振荡器抽运光的电流来实现对 f_0 信号的频率锁定. 实验测得激光器中 f_0 信号的频率随抽运光电流的变化如图 6 所示. f_0 信号的频率值随抽运电流的增加呈现线性变化的过程. 经

线性拟合, 抽运电流每增加 1 mA, f_0 信号的频率变化 1 MHz.

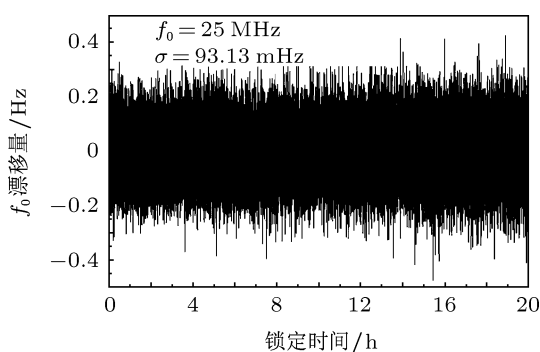


图 7 载波包络偏移频率 f_0 信号锁定后的频率变化

在 f_0 信号锁定前, 先通过调节激光器抽运电流, 将 f_0 信号的频率值调节到参考频率 25 MHz 附近. APD 输出信号经过低通滤波器后分成两路. 一路送到计数器中, 记录 f_0 信号的锁定状态, 另一路数字鉴频/鉴相相器锁相环与锁定到氢钟上的低噪声频率综合器产生的频率为 25 MHz 的参考信号进行鉴相, 产生误差信号, 再将此误差信号送入伺服系统, 反馈给激光器抽运电流源的调节端口, 通过控制激光器腔内的抽运光功率实现将 f_0 锁定到参考信号上. 图 7 给出了锁定后载波包络偏移频率的漂移, 其中采样时间为 1 s. 锁定后载波包络偏移频

率的平均值为 25 MHz, 标准偏差为 93.13 mHz.

4 结论

本文介绍了基于掺 Er 光纤飞秒光学频率梳的研制工作. 实验上采用重复频率为 128 MHz 的掺 Er 光纤飞秒激光器, 通过两级单端后向抽运将振荡器的输出功率放大到 315 mW, 通过脉冲压缩后进入高非线性光纤扩谱实现了 1100—2200 nm 范围内的倍频程的输出, 并进一步利用单臂 $f-2f$ 系统, 通过参数优化探测到了 40 dB 信噪比的 f_0 的输出.

通过对激光器底板的温度控制并采用腔长反馈实现对激光器重复频率的锁定, 在 25 h 的连续锁定时间内, 重复频率 f_r 的平均值为 128430052.143 Hz, 标准偏差为 0.515 mHz. 通过对振荡器抽运光电流的反馈控制实现载波包络偏移频率 f_0 的锁定, 在 20 h 的锁定时间内, f_0 的平均值为 25 MHz, 标准偏差为 93.13 mHz.

掺 Er 光纤飞秒激光器中重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_0 的精密锁定标志着基于掺 Er 光纤飞秒激光器的飞秒光学频率梳的研制成功. 该装置为我国光学绝对频率的测量、微波频率标准和光学频率标准的准确连接、光学频率标准的异地比对提供了可靠的手段.

- [1] 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* **293** 825
- [2] Takamoto M, Hong F L, Higashi R, Katori H 2005 *Nature* **435** 321
- [3] Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Klein H A, Lea S N, Szymaniec, Gill P 2004 *Science* **306** 1355
- [4] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [5] Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, Hartl I 2010 *Opt. Lett.* **35** 3015
- [6] Peng J L, Liu T A, Shu R H 2009 *IEEE International* **20** 344
- [7] Ilday F, Chen J, Kärtner F 2005 *Opt. Express* **13** 2716
- [8] 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]
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Li J, Dai Y H, Zhang Z G 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 66 (in Chinese) [李婧, 戴永恒, 张志刚 2008 科学通报 **53** 66]
- [12] Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Meng F, Zhang Z G, Fang Z J and Li T C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094208 (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** 094208]
- [13] Cao S Y, Meng F, Fang Z J and Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064208 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 方占军, 李天初 2012 物理学报 **61** 064208]
- [14] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 (in Chinese) [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]

Precise frequency control of an Er-doped fiber comb*

Cao Shi-Ying[†] Meng Fei Lin Bai-Ke Fang Zhan-Jun Li Tian-Chu

(Center for Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 14 November 2011; revised manuscript received 23 November 2011)

Abstract

The repetition rate and the carrier-envelope offset frequency of a home-made Er-doped fiber comb are precisely phase-locked. The residual fluctuations of the stabilized repetition rate and the carrier-envelope offset frequency are 0.515 mHz and 93.13 mHz respectively

Keywords: Er: fiber femtosecond laser, fiber optical frequency comb, optical frequency metrology

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

* Project supported by the National Basic Research Program of China (2010CB922902), the Scientific Research Foundation of National Institute of Metrology, China (Grant No. 2002-AKY0928), and the Special Foundation of Starting Research for Doctor of National Institute of Metrology, China (Grant No. 2002-ATGQDB0902).

[†] E-mail: caoshiying@nim.ac.cn