

# 掺 Er 光纤飞秒激光器中高信噪比载波包络位相 偏移频率获取的实验研究\*

曹士英<sup>†</sup> 孟飞 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 5 月 10 日收到; 2011 年 6 月 27 日收到修改稿)

在实验上分析了掺 Er 光纤光学频率梳中激光器与一级放大器之间光纤长度、光纤扰动以及放大器抽运功率对倍频程光谱和载波包络位相偏移频率 ( $f_0$ ) 信噪比的影响. 通过系统优化, 实现了 40 dB 信噪比的  $f_0$  输出, 为  $f_0$  的长期锁定和光纤光学频率梳的实现提供了技术保障.

**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

20 世纪钛宝石飞秒激光器和光子晶体光纤两大关键技术的飞速发展, 促进了基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳的诞生和发展<sup>[1-5]</sup>. 与传统的光学谐波链相比, 飞秒光学频率梳体积小、成本低、使用和维护相对简单, 不仅可以测量从可见光到近红外波长范围内的所有光学频率<sup>[6-8]</sup>, 而且可以方便地将光学频率标准和微波频率标准连接起来<sup>[9]</sup>, 因此该技术得到了迅速地推广和应用. 从 2000 年开始, 世界上多个国家的计量机构相继建成了自溯源的飞秒光学频率梳, 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.

钛宝石飞秒激光器结构复杂、体积庞大、维护成本高, 而且需要在苛刻的超净环境中使用, 这些都在一定程度上制约了钛宝石飞秒光学频率梳在光学频率测量领域中的应用. 从目前发展来看, 飞秒光学频率梳正逐步由第一代的基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳进入第二代的基于光纤飞秒激光器的光学频率梳<sup>[10-12]</sup>, 其中以掺 Er 光纤飞秒激光器为核心的掺 Er 光纤光学频率梳的发展和应用最具代表性<sup>[12-16]</sup>.

整个光学频率梳包括光学和电学两大部分. 光学部分的功能是实现激光器重复频率 ( $f_r$ ) 和载波包络位相偏移频率 ( $f_0$ ) 的探测, 其中  $f_r$  的探测很容易利用光电二极管实现, 而  $f_0$  的探测则并不简单.  $f_0$  的探测首先需要对激光器输出的脉冲进行倍频程扩谱, 然后通过  $f-2f$  干涉系统来实现. 电学部分的功能是利用探测获得的光学信号与参考标准频率比较, 提取误差信号并进行反馈控制以实现激光器  $f_r$  和  $f_0$  信号的锁定.

在掺 Er 光纤光学频率梳中, 掺 Er 光纤飞秒激光器通常采用非线性偏振旋转锁模的全光纤或半全光纤结构, 因此输出的能量相对较低. 为了实现探测  $f_0$  所需的倍频程光谱, 激光器输出的激光脉冲要进行一级或者多级放大以提高脉冲能量. 因此, 掺 Er 光纤光学频率梳的光学部分在结构上包括四个部分: 掺 Er 光纤飞秒激光器、掺 Er 光纤放大器、高非线性光纤扩谱和  $f-2f$  干涉系统.

在光学频率梳的实现过程中, 飞秒激光器中  $f_0$  信号的探测和信噪比的提高是最为关键的一个环节. 为了实现  $f_0$  信号的锁定, 锁定系统一般要求  $f_0$  信号的信噪比在 30 dB 以上. 如需要更长时间的锁定, 更高信噪比的  $f_0$  信号是关键的保证.

我们在以前的文章中已经报道了基于掺 Er 光

\* 国家重大科学研究计划 (批准号: 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.

<sup>†</sup> E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

纤飞秒激光器的  $f_0$  信号探测方面的工作, 并初步获得了 30 dB 信噪比的  $f_0$  信号<sup>[17]</sup>. 在本文中, 我们利用自行建立的掺 Er 光纤光学频率梳的光学部分装置, 在实验上进一步深入分析了掺 Er 光纤光学频率梳系统参数对  $f_0$  信号信噪比的影响. 通过全面的系统优化, 在实验上获得了信噪比为 40 dB 的  $f_0$  信号, 为系统的长时间频率锁定奠定了基础.

## 2 实验装置

探测掺 Er 光纤飞秒激光器  $f_0$  信号的系统结构如图 1 所示, 其中包括四个部分: 掺 Er 光纤飞秒激光器、掺 Er 光纤放大器 (掺 Er 光纤放大器 1 和 2)、高非线性光纤扩谱和单臂  $f-2f$  干涉系统<sup>[18]</sup>.

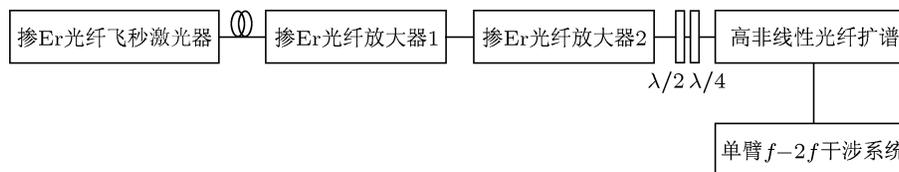


图 1 掺 Er 光纤飞秒激光器  $f_0$  探测实验结构图

经过两级放大压缩后的脉冲通过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  $0.01 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ . 实验中我们采用长度为 30 cm 的高非线性光纤, 并通过调节放大器和高非线性光纤之间的波片组合可以在 1100—2200 nm 的范围内获得倍频程光谱输出.

在倍频程的基础上, 光路进入单臂  $f-2f$  系统探测  $f_0$  信号. 在单臂  $f-2f$  系统中, 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  $\mu\text{m}$ , 可以实现对 1610—2340 nm 之间连续可调波长的倍频. 倍频晶体前后分别采用焦距为 38.1 mm 的透镜用于聚焦和光路准直, 从第二个透镜出射的光经过 1100 nm 窄带滤波片进入硅雪崩光电二极管. 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.

## 3 实验讨论

为了探测到  $f_0$  信号, 首先要获得超过一个倍频程的光谱, 其中脉冲能量、脉冲宽度和脉冲色散

在掺 Er 光纤飞秒激光器中, 我们采用非线性偏振旋转方式实现锁模, 其中抽运光波长为 980 nm, 增益介质是长度约为 40 cm 的掺 Er 光纤, 在 1530 nm 处的吸收率为 110 dB/m. 该激光器在 600 mW 抽运下可以输出 60 mW 的平均功率. 从激光器出来的飞秒激光脉冲, 进入两级放大系统, 两级放大器均采用单端后向抽运以保持较高的抽运效率. 两级放大器中的增益光纤长度分别为 38 和 45 cm, 在 1530 nm 处的吸收率均为 80 dB/m.

两级放大器的抽运功率最高为 700 mW, 从激光器出来的飞秒激光脉冲经过一级放大器在 700 mW 的抽运功率下能够得到 200 mW 的输出, 进一步经过二级放大器在 700 mW 的抽运功率下可以达到 330 mW 的输出.

等参数对倍频程光谱的获取都有重要的影响. 这些参数对倍频程光谱的影响直接体现在倍频程光谱的形状上. 在具体的实验过程中, 我们利用激光功率计监测高非线性光纤后的激光功率, 同时利用光谱仪监测高非线性光纤后的光谱形状. 通过对高非线性光纤后激光功率和光谱形状的变化来分析相关参数对倍频程光谱的影响. 实验的结果也证明这一方法简单可靠.

### 3.1 光纤长度的影响

实验中, 我们发现激光器和一级放大器之间光纤的色散对倍频程光谱有很大的影响. 我们将一级放大器和二级放大器看成一个完整的放大系统. 无论一级放大器和二级放大器之间光纤的色散如何, 最终都纳入整个放大器的色散来统一通过激光器和一级放大器之间的光纤进行优化, 因此实验中不必追求一级放大器和二级放大器之间的光纤长度和光纤种类.

针对本实验系统的激光器, 在激光器和一级放大器之间我们选取 SMF28 光纤作为连接光纤, 通过逐渐剪短的方式对激光器输出脉冲进行色散优

化,以考察激光器和一级放大器之间光纤长度对倍频程光谱的影响.对于不同锁模状态的激光器,其输出脉冲具有不同色散,但都可以通过大量增加正色散或者负色散光纤并进行逐渐剪短的方式进行色散优化,以获取倍频程光谱.

图2给出了不同光纤长度下的倍频程光谱形状.从图中可以看到,激光器和一级放大器之间的光纤长度存在一个最佳值,即在特定长度的光纤下,高非线性光纤后的光谱展宽可以达到一个最佳状态.当光纤过长或者过短时,倍频程光谱的质量都将下降.实际上倍频程光谱的获取直接与脉冲宽度相关,只有当脉冲压缩至最窄并具有一定的啁啾时,才能获得一个良好的光谱展宽.

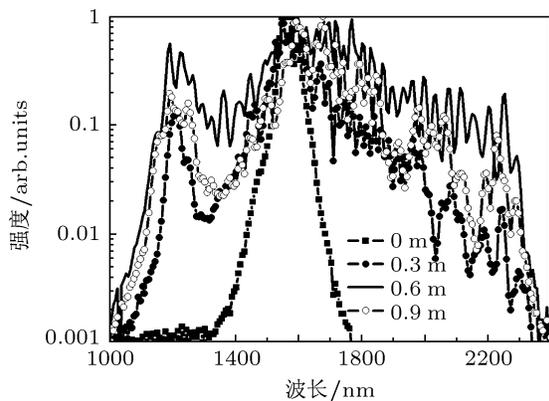


图2 激光器和一级放大器之间光纤长度对倍频程光谱的影响

### 3.2 抽运功率的影响

在光纤长度一定的条件下,我们分别考察了一级放大器和二级放大器抽运功率对倍频程光谱形状和倍频程光谱整体功率的影响.

对于一级放大器,当二级放大器抽运功率设定为300—700 mW之间的不同值时,倍频程光谱整体功率随着一级放大器抽运功率的增加都呈现一个缓慢增长的过程,如图3所示.在二级抽运功率设定为700 mW时,一级抽运功率从100增加到700 mW时,倍频程光谱的功率只从103增加到137 mW.这说明一级放大器抽运功率对倍频程光谱整体功率的影响较小.因此对于两级放大系统而言,一级放大器抽运功率可以以一个较低的值进行抽运.这样在今后的实验中,我们可以通过提高激光器输出功率并只采用一级放大器进行放大,从而避免目前两级放大系统的复杂性.

由于一级放大器抽运功率对倍频程光谱整体功率的影响较小,因此,一级放大器抽运功率存在

一个最佳值以保证倍频程光谱的产生.图4给出了一级放大器抽运功率对倍频程光谱形状的影响,其中二级放大器抽运功率设定为700 mW.从图4中可以看出,当一级放大器抽运功率从100增加到700 mW时,光谱展宽量呈现出从小到大又从大到小的过程.其中,当一级放大器抽运功率小于400 mW时,光谱展宽量随着抽运功率的增加而增加,并且在1100和2200 nm处的波长分量的强度也呈现一个逐渐增大的趋势;当一级放大器抽运功率大于400 mW时,光谱展宽的增量变得缓慢,但在短波分量1100 nm附近,光谱强度仍然随着抽运功率的增加而增加,而对应长波分量2200 nm附近,光谱强度随着抽运功率的增加出现一个下降的趋势.这说明对于两级放大系统的优化,当二级放大器抽运功率保持不变时,一级放大器抽运功率存在一个最佳值.因此,我们在后面优化 $f_0$ 信噪比的过程中,一级放大器抽运功率是一个必须要考虑和权衡的参数.

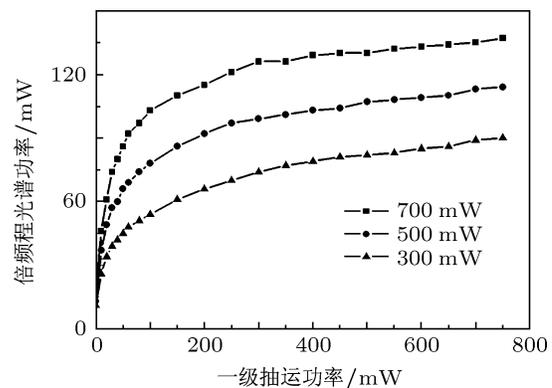


图3 一级放大器抽运功率对倍频程光谱整体功率的影响 其中二级放大器抽运功率分别设定为300, 500和700 mW

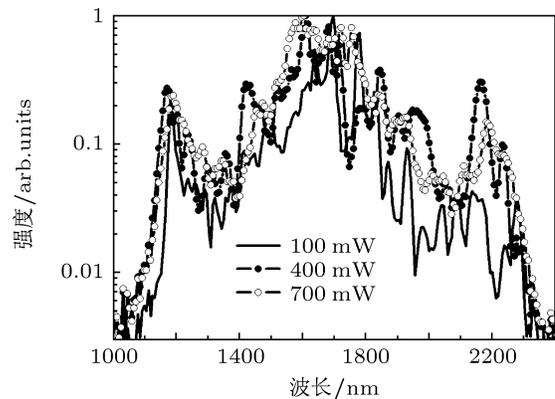


图4 一级放大器抽运功率对倍频程光谱形状的影响 其中二级放大器抽运功率设定为700 mW

对于二级放大器,当一级放大器抽运功率设定为700 mW时,倍频程光谱整体功率随着二级放大

器抽运功率的增加呈现一个线性增长的过程, 如图 5 所示. 这使得光谱展宽随着二级放大器抽运功率的增加而增加, 如图 6 所示. 从图 6 中可以看出在 1100 和 2200 nm 附近的波长分量的强度都随着抽运功率的增加而增加, 并没有像一级放大器那样出现一个最佳的抽运功率值. 因此我们在优化  $f_0$  信噪比的过程中, 直接将二级放大器抽运功率调到最大值, 而仅对一级放大器抽运功率进行优化.

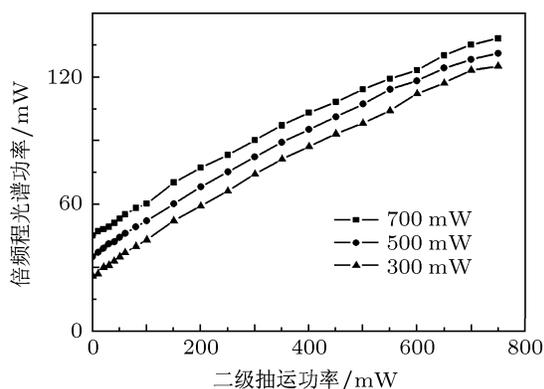


图 5 二级放大器抽运功率对倍频程光谱的影响 其中一级放大器抽运功率分别设定为 300, 500 和 700 mW

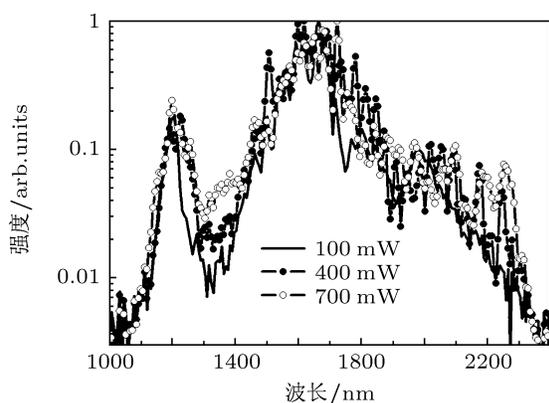


图 6 二级放大器抽运功率对倍频程光谱的影响 其中一级放大器抽运功率设定为 700 mW

经过对两级放大器抽运功率的优化, 当一级放大器抽运功率设定为 325 mW, 二级放大器抽运功率设定为 700 mW 时, 我们获得了一个最佳的倍频程光谱, 如图 7(a) 所示. 其所对应的  $f_0$  信噪比在 300 kHz 分辨率带宽的条件下, 可以达到 40 dB, 如图 7(b) 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, 因此频谱仪上显示的三个信号从左到右分别为  $-f_0$ , 0 和  $f_0$ .

### 3.3 光纤扰动的影响

实验中我们发现, 经过对光纤长度和抽运功率

的优化后, 尽管经过高非线性光纤扩谱后已经实现了一个倍频程的光谱输出, 但这并不能说明一定可以探测到  $f_0$  信号, 其中激光器和一级放大器之间光纤的扰动对  $f_0$  信噪比有很大的影响.

光纤的扰动影响激光的偏振状态, 但实验中我们发现激光器和一级放大器之间光纤扰动带来的偏振变化经过放大器增益放大以及各种光纤、光学器件的连接, 到达高非线性光纤时, 却无法通过高非线性光纤前的波片组合得到完全补偿, 因此激光器和一级放大器之间光纤优化好后必须要进行固定, 以避免扰动的干扰, 从而增加  $f_0$  信噪比的稳定性.

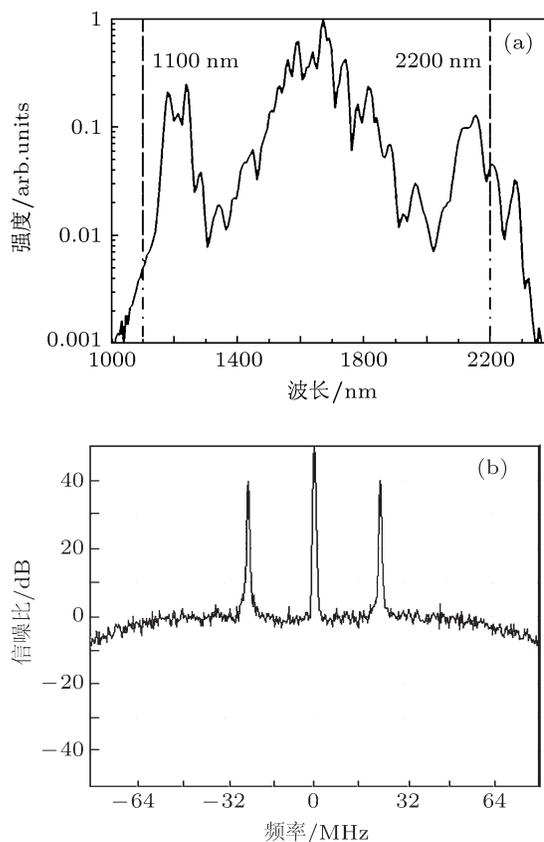


图 7 (a) 40 dB 信噪比  $f_0$  信号对应的倍频程光谱 (其中一级放大器抽运功率为 325 mW, 二级放大器抽运功率 700 mW); (b) 频谱仪记录的 40 dB 信噪比  $f_0$  信号 (其中分辨率带宽为 300 kHz)

图 8 分别给出了经过扰动激光器和一级放大器之间的光纤后, 倍频程光谱形状及激光器中  $f_0$  信号信噪比的变化. 从图中可以看出激光器和一级放大器之间的光纤扰动对倍频程光谱的形状影响不大, 但  $f_0$  的信噪比可以从 0 变化到 40 dB. 这说明连接激光器和一级放大器之间光纤的扰动对  $f_0$  信噪比有很大的影响.

在倍频程光谱一定的条件下, 利用单臂  $f-2f$  系统探测  $f_0$  信号,  $f_0$  信噪比主要受倍频程光谱中

长波倍频后的短波脉冲与倍频程光谱中自身短波脉冲之间时间延迟的影响. 当此延迟时间使上述两个脉冲在时间上不重合时,  $f_0$  信号将很难探测到. 当然这可以通过进一步优化高非线性光纤后的色散来实现<sup>[15,17]</sup>. 但在实验过程中, 这段光纤的长度一般很短, 而且与高非线性光纤的熔接损耗很大, 因此这段光纤一般保持不变, 而通过扰动激光器与一级放大器的光纤使  $f_0$  信噪比达到最大, 此时再将激光器与一级放大器之间的光纤固定.

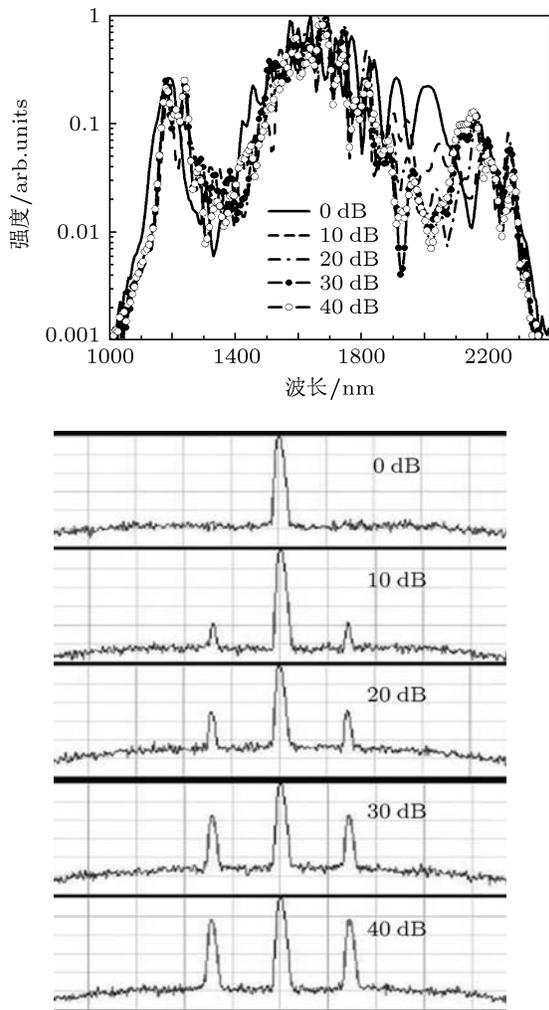


图8 光纤扰动对倍频程光谱和  $f_0$  信噪比的影响 (a) 光纤扰动对倍频程光谱的影响; (b) 光纤扰动对  $f_0$  信噪比的影响

在实验过程中, 包括激光器与一级放大器之间

的光纤、一级与二级放大器之间的光纤、二级放大器后的光纤在内的系统中任何部位的光纤扰动都会带来相同的影响. 但为了尽量减小所需优化参数的数量, 在实验和优化过程中, 我们将一级放大器、二级放大器、两级放大器之间的连接光纤、高非线性光纤全部固定, 以避免扰动的干扰, 唯一可以动的光纤是激光器和一级放大器之间的光纤. 这在具体的实验和优化过程中十分方便, 因为在对系统色散优化的过程中也需要变动激光器和一级放大器之间的光纤.

## 4 结论

本文采用掺 Er 光纤飞秒激光器, 经两级单端后向抽运放大器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  $f-2f$  系统探测掺 Er 光纤飞秒激光器的  $f_0$  信号. 在实验上系统研究了掺 Er 光纤光学频率梳中激光器与一级放大器之间光纤长度、光纤扰动和放大器抽运功率对倍频程光谱和  $f_0$  信噪比的影响. 其中激光器和一级放大器之间的色散补偿对倍频程光谱有很大的影响, 为了实现倍频程光谱输出, 必须对该段光纤进行色散优化. 对于两级放大系统中, 虽然一级放大器的抽运功率对倍频程光谱整体功率的影响要小于二级放大器抽运功率的影响, 但一级放大器抽运功率存在一个最佳值以保证倍频程光谱的产生. 因此, 在  $f_0$  信噪比的优化过程中, 一级的抽运功率是一个必须要考虑和权衡的参数. 为了实现高信噪比  $f_0$  的探测, 激光器与一级放大器之间的光纤扰动必须进行优化, 不同的光纤盘卷方式使  $f_0$  信噪比可以在 0—40 dB 之间变化.

总之, 通过系统优化, 我们实现了 40 dB 信噪比的  $f_0$  输出, 为  $f_0$  的长期锁定和光学频率梳的实现提供了技术保障. 光纤光学频率梳的实现将大大提高光学频率梳的稳定性, 并极大地降低光学频率梳的成本, 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.

[1] Reichert J, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59

[2] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **28** 635

[3] Chen L J, Benedick A J, Birge J R, Sander M Y, Kärtner F 2008 *Opt. Express* **16** 20699

[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] 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]
- [6] Chui H C, Ko M S, Liu Y W, Shy J T, Peng J L, Ahn H 2005 *Opt. Lett.* **30** 842
- [7] Goncharov A, Amy-Klein A, Lopez O, Burck F D, Chardonnet C 2004 *Appl. Phys. B* **78** 725
- [8] Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [9] Ye J, Schnatz H, Hollberg L W 2003 *IEEE J. Quantum Elect.* **9** 1041
- [10] Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, Hartl I 2010 *Opt. Lett.* **35** 3015
- [11] Schibli T R, Hartl I, Yost D C, Martin M J, Marcinkevicius A, Fermann M E, Ye J 2008 *Nat. Photonics* **2** 355
- [12] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [13] Kim Y, Kim S, Kim Y J, Hussein H, Kim S W 2009 *Opt. Express* **17** 11972
- [14] Baumann E, Giorgetta F R, Nicholson J W, Swann W C, Coddington I, Newbury N R 2009 *Opt. Lett.* **34** 638
- [15] Peng J L, Ahn H, Shu R H, Chui H C, Nicholson J W 2007 *Appl. Phys. B* **86** 49
- [16] Wu T H, Kieu K, Peyghambarian N, Jones R J 2011 *Opt. Express* **19** 5313
- [17] Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Meng F, Zhang Z G, Fang Z J, 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]
- [18] Schibi T R, Minoshima K, Hong F L, Inaba H, Onae A, Matsumoto H, Hartl I, Fermann M E 2004 *Opt. Lett.* **29** 2467

# Experimental study on detection of the high signal-to-noise ratio of the carrier-envelope offset frequency in an Er-doped fiber femtosecond laser\*

Cao Shi-Ying<sup>†</sup> Meng Fei Fang Zhan-Jun Li Tian-Chu

(Division of Metrology in Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 10 May 2011; revised manuscript received 27 June 2011)

## Abstract

The key techniques for the realization of the femtosecond optical frequency comb are the detection of the carrier-envelope-offset frequency ( $f_0$ ) and the improvement of the signal to noise ratio (S/N) of  $f_0$ . The influence of the length and the vibration of the fiber between the oscillator and the amplifier, and the pump power of the amplifier on the S/N of the  $f_0$  is experimentally studied. With optimized parameters, a  $f_0$  with 40 dB S/N is obtained in the Er-doped fiber femtosecond laser.

**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 State Key Research Program of China (Grant No. 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).

<sup>†</sup> E-mail: caoshiying@nim.ac.cn