

## 高功率高重复频率飞秒掺镱光纤激光频率梳的研究(特邀)

孙敬华<sup>1,2,3</sup>, 孙克雄<sup>2</sup>, 林志芳<sup>2</sup>, 孙继芬<sup>2</sup>, 晋路<sup>2</sup>, 徐永钊<sup>1</sup>

(1. 东莞理工学院 电子工程与智能化学学院, 广东 东莞 523808;

2. 华中科技大学 物理学院, 湖北 武汉 430074;

3. Institute of Photonics and Quantum Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK)

**摘要:** 飞秒光学频率梳在精密计量学和光谱学中扮演着革命性的推动角色, 成为近二十年超短脉冲激光技术及应用研究领域最活跃的前沿方向之一。文中基于 250 MHz 重复频率( $f_{\text{rep}}$ )的掺镱(Yb)光纤激光器, 研究了不同腔内色散以及锁模机制对飞秒脉冲序列载波包络相位偏移频率( $f_{\text{CEO}}$ )噪声的影响。通过对飞秒光梳细节的优化, 得到了 49 dB 信噪比的  $f_{\text{CEO}}$  拍频信号并获得了秒稳  $3.2 \times 10^{-10}$  的锁定结果, 同时  $f_{\text{rep}}$  的锁定结果也达到了到了秒稳  $3.4 \times 10^{-13}$  的精度。此外文中还研究了不同啁啾状态的种子光飞秒脉冲对基于大模场面积双包层 Yb 光子晶体光纤放大器输出光脉冲宽度的影响。以携带  $-3.8 \times 10^4 \text{ fs}^2$  预啁啾量的光脉冲作为种子光, 在 60 W 976 nm 半导体激光泵浦下, 获得了 250 MHz 重复频率、23 W 平均功率和 66 fs 压缩后脉冲宽度的激光输出。

**关键词:** 光学频率梳; 光子晶体光纤放大器; 超连续产生; 频率锁定

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0103001

## High power high repetition rate femtosecond Ytterbium-doped fiber laser frequency comb (invited)

Sun Jinghua<sup>1,2,3</sup>, Sun Kexiong<sup>2</sup>, Lin Zhifang<sup>2</sup>, Sun Jifen<sup>2</sup>, Jin Lu<sup>2</sup>, Xu Yongzhao<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;

2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Institute of Photonics and Quantum Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK)

**Abstract:** Femtosecond optical frequency combs have introduced revolutionary promotions to precision optical spectroscopy and metrology, and have been hot topics of laser technologies and applications for two decades. In this article, the affects of intracavity dispersion and mode-locking mechanism on carrier-envelope phase slip frequency ( $f_{\text{CEO}}$ ) of femtosecond laser pulse trains were researched based on a femtosecond Ytterbium-doped fiber laser with 250 MHz repetition rate. By optimizing the intracavity dispersion, pumping power, and detection methods, 49 dB signal-noise-ratio  $f_{\text{CEO}}$  beat signal was obtained which then was stabilized it to a stability of  $3.2 \times 10^{-10}$  in 1 second, and a stability of  $3.4 \times 10^{-13}$  (1 s) of  $f_{\text{rep}}$  was also achieved. In addition, the effects of pulse chirping on the output pulse duration of a fiber amplifier was researched based on a piece of large-mode-area photonic crystal Yb doped fiber. Under

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(11274133)

作者简介: 孙敬华(1974-), 男, 教授, 主要从事飞秒激光、超快非线性频率变换和飞秒光学频率梳方面的研究。

Email: sunjh@dgut.edu.cn

60 W of pumping power from a laser diode at 976 nm wavelength, 23 W average output power from the amplifier with 66 fs pulse duration and 250 MHz repetition rate was achieved when the seed pulses were carrying  $-3.8 \times 10^4 \text{ fs}^2$  pre-chirping dispersion.

**Key words:** optical frequency comb; photonic crystal fiber amplifier; supercontinuum generation; frequency locking

## 0 引言

基于锁模原理的超短脉冲激光的光谱宽度可以宽达 300 THz 以上<sup>[1]</sup>,但其光谱并不是连续的,而是由激光谐振腔决定的上百万个激光振荡纵模频率所组成的不连续的等间隔梳状谱线构成,这就是飞秒激光频率梳的基本原型。早在 1978 年 Theodor Hänsch 等人就已经开始利用锁模激光脉冲的这种等间隔的梳状谱线应用于精密光谱学研究<sup>[2]</sup>。但人们能够真正精密地控制这种梳状光谱是在利用光子晶体光纤产生一个倍频程的超连续光谱<sup>[3]</sup>以及利用自参考技术获得飞秒脉冲序列的载波包络相位偏移频率(carrier-envelope offset frequency,  $F_{\text{CEO}}$ )<sup>[4]</sup>之后。通常意义上的飞秒光学频率梳是指这种对其梳齿谱线进行了精密锁定后的飞秒激光脉冲序列。飞秒光学频率梳经过近二十年的发展<sup>[5]</sup>,已经在多种介质中和多种形式下实现了有效的精密锁定并获得了广泛的应用,为各方面的基础科学研究带来了革命性的促进作用,并逐渐在面向大众的应用领域施展更为广泛的影响<sup>[6]</sup>。

飞秒光学频率梳技术利用精密的微波频率源或者超稳激光频率源对飞秒激光脉冲重复频率(repetition frequency,  $f_{\text{rep}}$ )及其载波包络偏移频率进行精密的测量和控制,实现了对宽达几个倍频程范围内的光波频率和相位的精密可控<sup>[7]</sup>,并将光频率同目前位于微波频段的时间频率标准以极高的精度和非常简洁的形式耦合在了一起<sup>[8]</sup>。从而飞秒光学频率梳即具有传统飞秒脉冲激光脉冲包络极高的时间/空间分辨率、超强的脉冲峰值功率(对应着高效和丰富的非线性效应),同时又具有超稳单线激光极高的频率精度与稳定性(对应着上百万条线宽极窄的梳齿)。其将宽谱与窄线宽(梳齿线宽)完美地结合在了一起,天生具有在精密计量学与精密光谱学领域发挥革命性促进作用的良好基因<sup>[9-10]</sup>。比如说在基础研究领域光梳使得光频率的测量、比对和传递过程

大为简化和高效<sup>[11]</sup>,促使了基于囚禁离子或者原子的光学时钟的研究迅速发展<sup>[12-13]</sup>,所获得的精度已经超过微波铯喷泉原子钟的  $10^{-17}$  量级,达到了  $10^{-18}$  量级<sup>[14]</sup>。这是到目前为止人们所获得的具有最高精度的物理量。光频率梳可以将这一测量精度传递到甚至直接参与其他物理常数/量的测量,以检测我们当前物理世界里所谓的“常数”是不是真的是固定不变的<sup>[15]</sup>,从而验证或者修正目前的物理体系<sup>[16]</sup>。

在应用研究领域,飞秒光梳在时域上包络与载波双重的高精度控制及其在频域上宽阔的相干光谱为光谱学和计量学方面的各种测量方式和数据处理提供了丰富的解决方案<sup>[17-20]</sup>。其中光梳用于绝对距离的测量可以实现 nm 量级的精度以及 pm 量级的分辨率<sup>[21]</sup>,尤其是在双光梳的情况下其测量时间可以在毫秒量级以下<sup>[22-23]</sup>。因此,飞秒光梳既可以用于高精度的 3D 成像<sup>[24]</sup>、激光 LIDAR<sup>[25]</sup>、大型不规则零部件(比如大型涡轮叶片)的在线测量等等,更是为一些极具挑战性的科研计划,比如为了探测空间引力波而提出来的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)<sup>[26]</sup>及其后的 eLISA (evolved LISA),以及卫星探测地球重力场的 GRACE 计划<sup>[27]</sup>等对星间距离的测量提供了解决思路。

目前光频率梳仍然是处在一个高速发展的时期,并且在往更高的功率、更丰富的波段以及更紧凑的结构等方面发展。

在众多的飞秒光梳载体中,飞秒光纤激光具有低成本、高稳定性和结构紧凑等优势。其中  $\text{Yb}^{3+}$  离子掺杂的光纤激光器具有低量子缺陷、高光-光转换效率、无激发态吸收以及浓度淬灭等优点,可以获得很高掺杂浓度的增益光纤,并获得非常高的平均输出功率。高掺杂浓度有利于缩短增益光纤长度,提高光纤激光器的重复频率和降低难以补偿的高阶色散。且其发射光谱可以覆盖 970~1 150 nm 的宽广的范围,有利于获得很短的飞秒脉冲,以及基于此的低噪

声飞秒激光频率梳。目前人们从 Yb 光纤振荡器中获得了短至 22 fs 的直接输出<sup>[28]</sup>,在亚皮秒量级脉冲宽度下最高获得了 830 W 的平均功率,最近则更是有平均功率高达 109 W,脉冲宽度 42 fs,重复频率 25 MHz 的飞秒 Yb 光纤激光频率梳的报道<sup>[29]</sup>。

文中将阐述一种基于掺镱光纤的高功率飞秒激光系统,并对其脉冲重复频率和载波包络相位进行

了精密的锁定。

## 1 方案设计与实验结果

### 1.1 飞秒 Yb 光纤激光振荡器和预放大器

该项目的飞秒光纤激光器利用非线性偏振旋转(NPR)进行锁模,如图 1 所示。典型的基于 NPR 锁模机制的光纤激光振荡器有一部分自由空间光学元

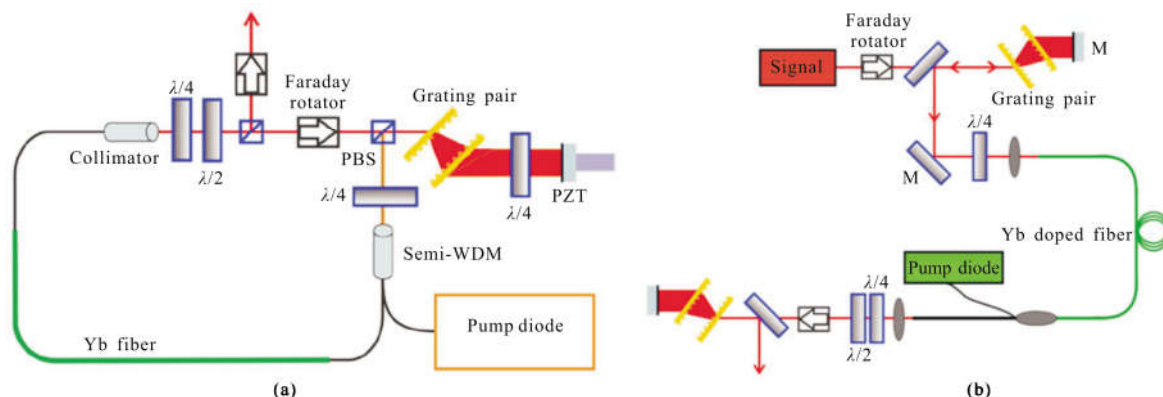


图 1 (a)基于偏振旋转锁模的飞秒掺镱光纤激光器结构图和(b)双包层光纤放大器结构图

Fig.1 (a) Schematic of femtosecond Yb doped fiber laser based on nonlinear polarization evolution; (b) Schematic of double cladding fiber amplifier

件,这使其偏振态、腔内色散与谐振腔长度非常容易操控,且所需的光纤长度可以很短,因而该类型激光器是产生高重复频率低噪声精密激光频率梳的较理想的种子源。实验中的种子源为自建的飞秒 Yb 光纤激光器,重复频率为 250 MHz,在 870 mW 有效泵浦功率下,产生了 270 mW 的压缩后平均输出功率,脉冲宽度为 63 fs。

由于振荡器重复频率偏高,脉冲宽度也没有基于掺钛蓝宝石飞秒激光器那样可以短至 20 fs 以下,270 mW 的输出功率不足以在光子晶体光纤中产生一个倍频程的超连续,所以实验在进行载波包络相位锁定之前采用了一级掺镱光纤放大。放大器的结构图如图 1(b)所示。图中增益光纤为 Nufem 公司制造的掺镱 DCF,纤芯/包层直径为 20/130 μm,纤芯的数值孔径为 0.08,包层的数值孔径 ≥ 0.46,光纤长度 2.3 m,吸收系数 8.7 dB/m。泵浦光最大功率 7 W。增益光纤输出端面为 SMA 接头,并有 8°斜角以防止反射形成激光振荡。

在本实验中,我们将振荡器的输出光脉冲在未经光栅对压缩后直接输入到图 1(b)的预放大器中,其脉冲宽度约为 300 fs,这主要是由于振荡器内外的

材料色散引起的展宽。此时预放大过程带有较强的非线性,而非通常啁啾脉冲放大系统所采用的将种子光脉冲展宽到几十皮秒的方案。预放大器在 7 W 的泵浦功率下,获得了压缩后平均功率 2.37 W,脉冲宽度为 95 fs,光谱宽度 22 nm 的光脉冲输出。

### 1.2 载波包络相位偏移频率的探测和优化

在经过双包层 Yb 光纤预放大器后,飞秒脉冲具有足够的能量来在光子晶体光纤中产生一个倍频程的超连续光谱,以便通过  $f-2f$  非线性干涉仪获得脉冲序列的载波包络相位偏移频率  $f_{CEO}$ 。实验中采用的是丹麦 NKT 公司的 SC-5.0-1040 光子晶体光纤(PCF),长度为 40 cm,其中有 10 cm 长的一段为经过拉锥处理至 1 μm 芯径,以进一步增强 PCF 的非线性效应,而光纤两端仍然是原始的 5 μm 芯径。这样处理的好处是光纤两头的芯径较大,较能容忍光纤夹持设备的细微漂移,提高了系统的长期稳定性,而中段的拉锥处理又使得产生超连续所需的平均功率较小。拉锥 PCF 输出的超连续谱见图 2。此时泵浦激光平均功率为 490 mW,对应的耦合进光纤内的平均功率为 320 mW(65%的耦合效率),PCF 内初始脉冲峰值功率为 13 kW。

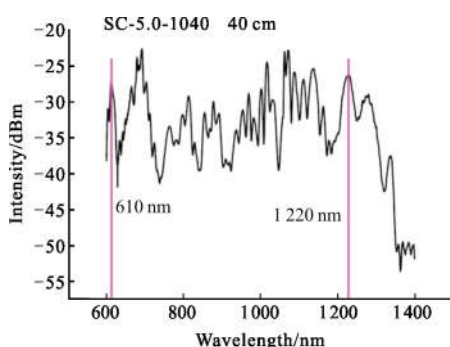


图 2 拉锥光子晶体光纤 SC-5.0-1040 输出的超连续谱  
Fig.2 Octave supercontinuum generated from tapered photonic crystal fiber SC-5.0-1040

实验中首先采用一个准线型的非线性干涉仪来获取飞秒激光脉冲序列的  $f_{\text{CEO}}$  信号。PCF 中产出的超连续经由波片进行偏振态优化后,由一块 5 mm 的 LBO 晶体对其中 1 220 nm 波段的近红外光进行 I 类倍频。倍频获得的 610 nm 红光与超连续基频光中的 610 nm 具有相互垂直的偏振态,因此采用沃拉斯顿(Wollaston)棱镜将这两束光分开以调节拍频延时。反射合束后的基频光和倍频光通过一个低位镜聚焦在雪崩光电二极管(APD)上,进行偏置  $f_{\text{CEO}}$  频率的探测。同理,通过倍频晶体角度调节以及基频光和倍频光的延时调节,最终在拍频光路中实现大约 27 dB 的拍频信号,如图 3 所示。

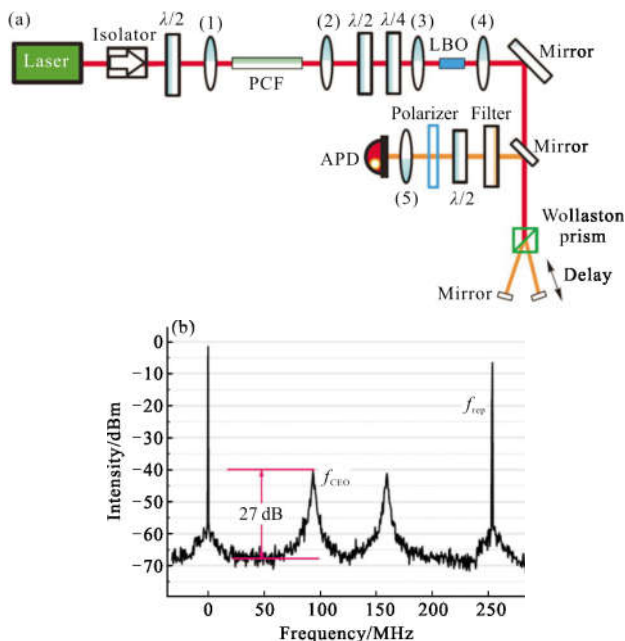


图 3 基于沃拉斯顿棱镜的  $f-2f$  拍频结构图和得到的  $f_{\text{CEO}}$  信号  
Fig.3 Schematic of beat note measurement setup using self-referenced  $f-2f$  technology based on Wollaston prism and carrier-envelope phase offset frequency  $f_{\text{CEO}}$

通常来说,如果信号的信噪比低于 30 dB,将导致用于锁定的误差信号淹没在噪声里,无法实现光梳的良好锁定。因此提高  $f_{\text{CEO}}$  的信噪比显得十分重要。提高信噪比的主要从两个方面进行,一是提高信号强度,二是降低噪声水平。图 3 的拍频光路中干涉滤波片的带宽有 10 nm,造成整个拍频信号的本底噪声加大。所以在图 4 的方案中采用光栅(Thorlabs, GR25-1580)来进行选频,以进一步减小探测光谱宽度。同时将沃拉斯顿棱镜换成了偏振分束镜(PBS),通过  $\lambda/4$  波片调节返回光的偏振态,使其沿 PBS 的另一个方向输出,避免使用低位镜,提高光束重合度。优化后的拍频信号的信号强度由原来的 27 dB,增加到 37 dB,如图 4(b)所示。

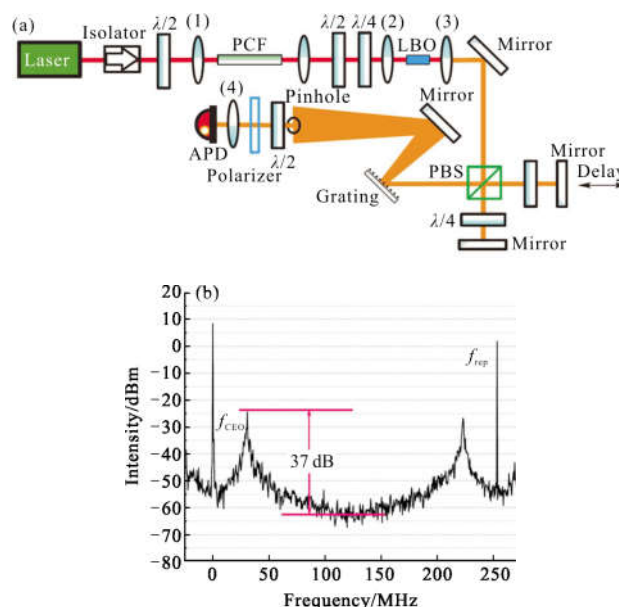


图 4 基于偏振分束镜的  $f-2f$  拍频结构图和得到的  $f_{\text{CEO}}$  信号  
Fig.4 Schematic of beat note measurement setup using self-referenced  $f-2f$  technology based on PBS and carrier-envelope phase offset frequency  $f_{\text{CEO}}$

解决了探测光路的优化后,实验中的  $f_{\text{CEO}}$  锁定效果仍然不够理想,这主要是因为 NPR 锁模 Yb 光纤振荡器是工作于具有较大的正色散区域。由于振荡器内的净色散不是很好精确测量,但是根据理论以及实验研究发现,锁模激光器腔内的色散(对应着不同的飞秒脉冲形成机制)对激光输出脉冲序列的时间抖动(timing jitter)和相位噪声(phase noise)都有决定性的影响。当激光腔内的群速度色散接近于零时,输出脉冲序列的相位噪声最低。因此  $f_{\text{CEO}}$  信号的信

噪比直接反应了腔内的色散情况, 可以作为优化腔内色散补偿光栅对间距的直接依据。这也是为什么实验中采用了 NPR 锁模机制并在腔内加入了色散连续可调的光栅对的原因。在调整光栅对间距使腔内色散为负值但接近于零时, Yb 光纤振荡器工作在孤子锁模状态, 输出光谱呈类高斯型, 并且需要降低振荡器泵浦功率以维持稳定的孤子锁模振荡。在 400 mW 泵浦下, Yb 光纤激光振荡器的输出平均功率为 75 mW, 中心波长为 1 035 nm, 光谱宽度为 28 nm。通过预放大器做小功率放大后得到 260 mW 的输出。放大后的光谱中心波长为 1 042 nm, 光谱宽度 20 nm, 压缩后的脉冲宽度为 123 fs。预放大脉冲经过光子晶体光纤后产生的超连续光谱如图 5(a) 所示, 经过优化后的拍频信号的信号强度增加到 49 dB (图 5(b))。该拍频信号不但信噪比相对于腔内色散优化前有很大的提升, 而且线宽也得到了很好的压制。

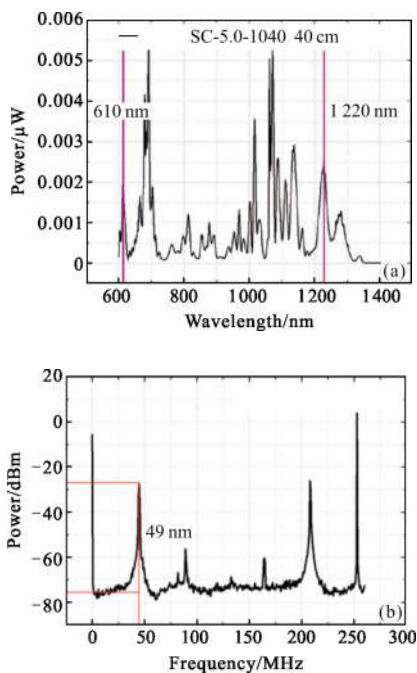


图 5 经优化后的超连续谱和拍频  $f_{\text{CEO}}$  信号

Fig.5 One octave supercontinuum and carrier-envelope phase offset frequency  $f_{\text{CEO}}$  after experimental optimization

### 1.3 载波包络相位偏移频率和重复频率的精密锁定

实验中采用氢钟参考的信号发生器作为微波频率参考源, 通过自建的宽带数字鉴频鉴相电路和 PI 伺服控制器 (Newfocus LB1005) 形成的锁相回路控制飞秒 Yb 光纤振荡器的驱动电流, 将  $f_{\text{CEO}}$  信号锁

定在 16 MHz。通过频率计数器 (Agilent 53220, 同样参考在氢钟上) 对锁定后的  $f_{\text{CEO}}$  进行计数测量。图 6 显示了  $f_{\text{CEO}}$  精密锁定的结果。图 6 中计数器 gate time 设为 1 s, 累计测量时间为 30 min, 整个范围内频率抖动范围为 60 mHz, 艾伦方差分析显示秒稳为  $3.2 \times 10^{-10}$ , 标准偏差为 11.6 mHz。实验研究发现, 随着预放大泵浦功率的升高, 所获得的锁定精度会随之变差, 但实验中没有进行进一步的系统性测量。

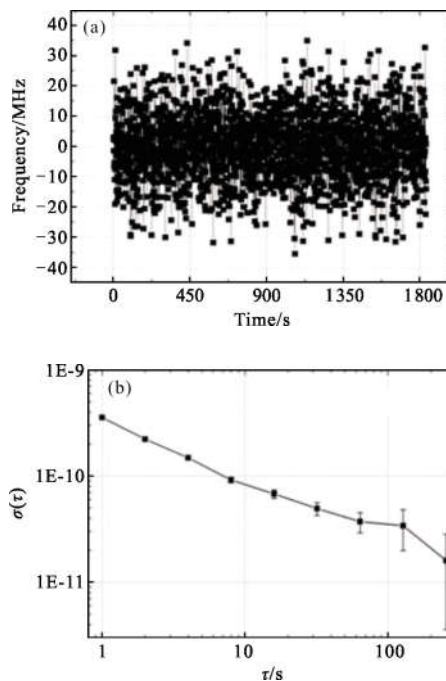


图 6  $f_{\text{CEO}}$  频率锁定频率计数和艾伦方差

Fig.6 Frequency counts and Allan deviation of  $f_{\text{CEO}}$  after frequency locking

实验中还对激光器重复频率  $f_{\text{rep}}$  进行锁定。重复频率的锁定由控制图 1 所示振荡器腔镜后的压电陶瓷来实现。由低噪声光电探测器探测到的脉冲重复频率信号经放大后, 与氢钟参考的信号发生器产生的 500 MHz 参考微波信号 (重复频率的二次谐波) 在混频器 (Minicircuits ZAD-1+) 中产生误差信号, 再经 PI 伺服控制器 (Newfocus LB1005) 和压电陶瓷驱动器 (哈尔滨芯明天 XE-505) 驱动压电陶瓷, 形成完整的锁相回路。图 7 为由频率计数器 (Agilent 53220) 测量  $f_{\text{rep}}$  基频 (250 MHz) 的锁定结果图, 采样率为 1 s, 数据收集时长大于 8 000 s, 由图可以看出频率抖动峰峰值范围在 400  $\mu\text{Hz}$  左右, 艾伦方差为秒稳为  $3.4 \times 10^{-13}$ 。

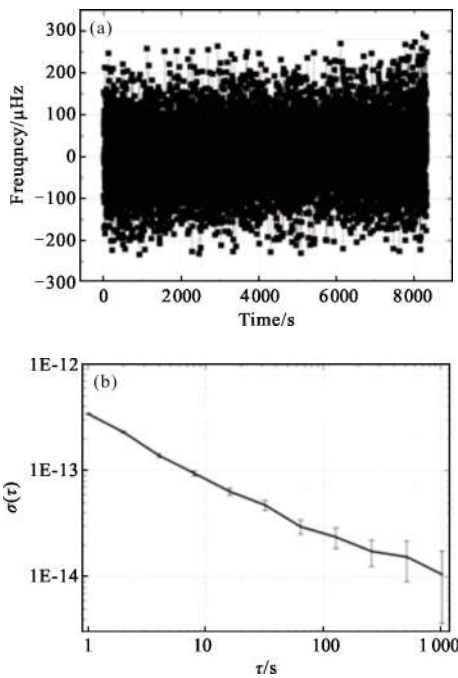


图 7  $f_{ep}$  频率锁定频率计数和艾伦方差

Fig.7 Frequency counts and Allan deviation of  $f_{ep}$  after frequency locking

### 1.4 高功率飞秒 Yb 光纤激光系统

此项目最终的目标是为了搭建高功率的飞秒 Yb 光纤激光频率梳, 以进行后续的深紫外频率变换, 为深紫外精密光谱学研究提供光源。所以该项目在研究光梳重复频率和载波包络相位锁定的同时, 还研究了利用大模场面积(LMA)掺 Yb 双包层光子晶体光纤(NKT photonics, DC-200/40-PZ-Yb)对激光功率进行放大。此时激光系统的种子源为类似结构和参数的另一台飞秒 Yb 光纤激光器, 重频 250 MHz, 功率 270 mW, 可压缩至 50 fs。图 8 为光子晶体光纤放大器结构图。掺镜双包层 PCF 长度为 2 m。

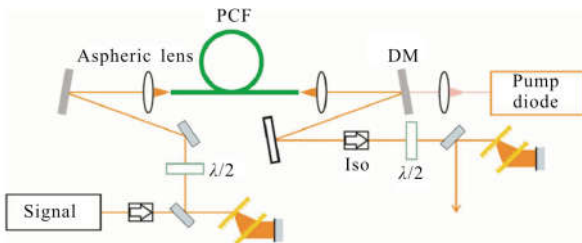
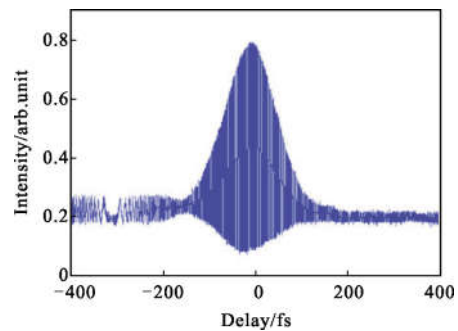


图 8 光子晶体光纤放大器结构示意图

Fig.8 Schematic of the photonic crystal fiber amplifier

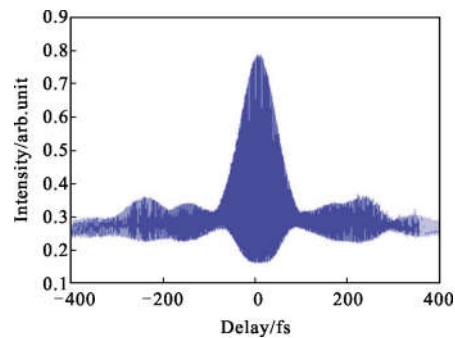
振荡级输出脉冲在进入掺镜 PCF 放大器之前分别用 30 m 单模光纤、0.9 m 单模光纤做正色散脉冲

展宽, 以及利用振荡器外的光栅对进行负色散预啾啾。由于单模光纤的三阶色散与光栅对的三阶色散具有相同的符号, 不能在压缩阶段被补偿, 因此, 长展宽光纤带来的结果就是放大脉冲不能得到很好的压缩。实验中作为展宽器的单模光纤长度为 30 m 时获得的最短脉冲为 189 fs(如图 9(a)所示), 利用 0.9 m 单模光纤展宽脉冲时可以获得最短脉冲为 114 fs(如图 9(b)所示)。从放大器输出脉冲的自相关曲线可以看出, 光纤展宽时脉冲具有较大的高阶色散无法补偿。



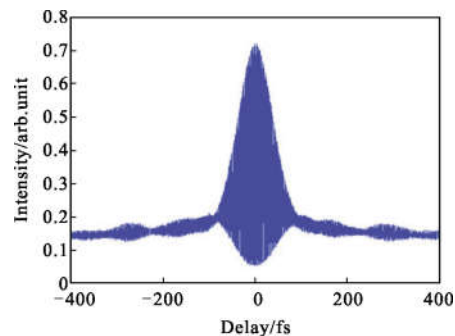
(a) 30 m 光纤展宽最终获得脉宽 189 fs

(a) Pulse width 189 fs after dechirping with 30 m fiber



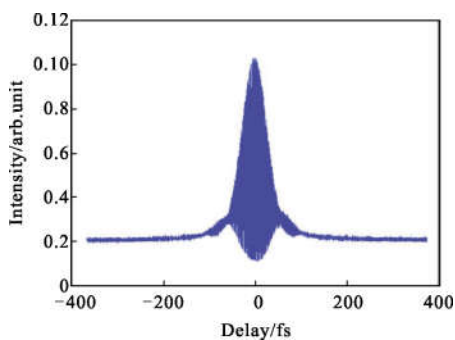
(b) 0.9 m 光纤展宽最终获得脉宽 114 fs

(b) Pulse width 114 fs after dechirping with 0.9 m fiber



(c) 光栅对脉冲预啾啾  $-3.25 \times 10^4 \text{ fs}^2$

(c) Pulse width 102 fs after dechirping with  $-3.25 \times 10^4 \text{ fs}^2$  dispersion



(d) 光栅对脉冲预啾啾 $-3.8 \times 10^4 \text{ fs}^2$

(d) Pulse width 166 fs after dechirping with  $-3.8 \times 10^4 \text{ fs}^2$  dispersion

图 9 在不同泵浦功率下放大器输出脉冲宽度

Fig.9 Output pulse durations from the PCF amplifier under different pumping powers

在光纤放大器实验中通常使脉冲在增益光纤中传输时产生非线性效应,进而三阶色散(TOD)与非线性相移(NPS)可以在一定程度上相互补偿以获得较短的脉冲宽度和较高的脉冲信噪比<sup>[30]</sup>。因此实验中在追求更短放大脉冲宽度时使用光栅对进行预啾啾使脉冲具备适量的负啾啾<sup>[31]</sup>。图 9(c)预啾啾光栅对提供负色散为  $-3.25 \times 10^4 \text{ fs}^2$ ,图 9(d)预啾啾光栅对提供负色散为  $-3.8 \times 10^4 \text{ fs}^2$ ,以使脉冲得到非线性放大,从而可以获得 66 fs 窄脉宽。

图 10 为激光功率与泵浦光功率关系,激光功率为经过光栅对压缩后的功率值,可以看出当泵浦光功率大于 15 W 时激光功率与泵浦光功率基本满足线性关系,在泵浦光为 60 W 时未达到饱和,此时压缩后的平均功率为 23 W。

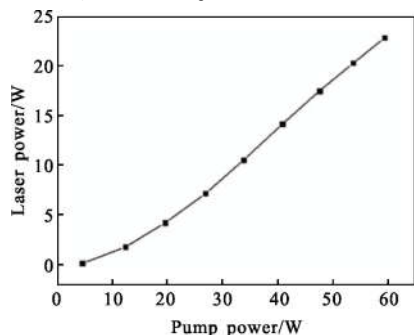


图 10 激光功率与泵光功率对应关系

Fig.10 Dependence of laser power on pump power

实验中研究了泵浦功率与脉冲放大压缩后脉宽的关系。在非线形放大过程中随着泵浦功率的提高,激光脉冲功率不断增加,非线性效应在增强,非线性效应主要为自相位调制效应,使得脉冲光谱展宽。光

谱越宽对应的傅里叶变换极限脉宽越窄。在脉冲放大过程中非线性效应会引入非线性相移,放大系统中的光纤和光栅对具有的三阶色散可以在一定程度上与非线性相移相互补偿<sup>[32]</sup>。实验中系统的色散保持不变,唯一改变的量是泵浦光功率。改变 PCF 放大器的泵浦功率从而改变放大过程中的非线性效应。通过 FROG(Frequency Resolved Optical Gating)重建脉冲,能够看出随着泵浦功率的增加脉冲在逐渐变窄随后又变宽,存在一个点能实现非线性相移与三阶色散较好的补偿,如图 11 所示。

光子晶体光纤泵浦光功率与放大激光脉宽关系如图 12 所示,随着泵浦功率的增强,存在一个点使得放大后激光脉冲最窄,这也正是非线性相移与三阶色散相互补偿的特征。

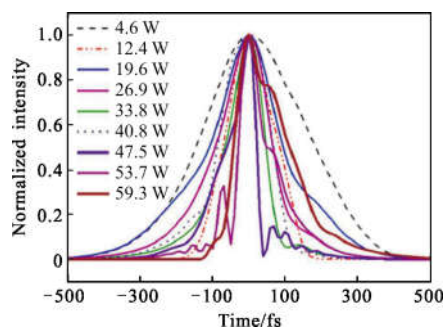


图 11 不同泵浦功率下 FROG 脉冲重建图

Fig.11 Dependence of pulse shape retrieved by FROG on pump power

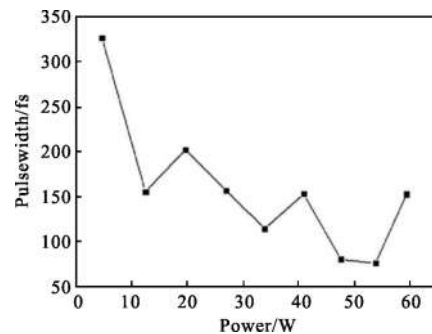


图 12 泵浦功率与输出脉冲宽度的关系

Fig.12 Dependence of pulse width on pump power

在非线形放大的过程中,脉冲的强度噪声和时间抖动等等都会通过非线性过程耦合到相位噪声中去,因此这样获得的高功率脉冲序列的  $f_{\text{CEO}}$  频率信号信噪比较低<sup>[33]</sup>。但是如果将前述的精密锁定的光频率梳作为此级非线性放大的种子光脉冲,其放大后的 20 W 以上平均功率的光梳的时域和频域噪声

指标如何,还有待进一步系统的量化研究。

## 2 结 论

文中主要介绍了基于 NPR 锁模的飞秒 Yb 光纤激光器,并探讨了腔内色散对激光脉冲序列的  $f_{\text{CEO}}$  拍频信号线宽和信噪比的影响。在孤子锁模运转下,经过一级预放大后的飞秒脉冲序列在  $f-2f$  自参考非线性干涉仪中获得了 49 dB 信噪比的  $f_{\text{CEO}}$  信号,通过精密反馈控制系统后得到了秒稳  $3.2 \times 10^{-10}$  的  $f_{\text{CEO}}$  锁定结果。通过精密锁定该振荡器重复频率的二次谐波,得到了秒稳为  $3.4 \times 10^{-13}$ 。此外实验中还利用大模场面积双包层 Yb 光子晶体光纤做为放大增益介质,对 NPR 锁模飞秒 Yb 光纤振荡器产生的飞秒光脉冲在不同预啾啾条件下做光纤激光放大,并系统研究了放大前的色散特性对放大光脉冲的宽度的影响。高功率 Yb 光纤激光系统的脉冲压窄实验进行了研究,通过光栅对对振荡器输出脉冲预啾啾补偿,最后获得重频 250 MHz,功率 23 W,最窄脉宽 66 fs 的激光,目前由于拍频获得的  $f_0$  信号信噪比较低,未实现载波包络相位偏移频率  $f_0$ ,接下来会进一步降低光纤激光系统的噪声水平,实现  $f_0$  频率的锁定。

## 参考文献:

- [1] Ell R, Morgner U, Kärtner F X, et al. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 26: 373.
- [2] Eckstein J N, Ferguson A I, Hänsch T W. High-resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses [J]. *Phys Rev Lett*, 1978, 40: 847.
- [3] Ranka J K, Winder R S, Stentz A. J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt Lett*, 2000, 25: 25-27.
- [4] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288: 635.
- [5] Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, Stenger J, Sutter D. H, Keller U. Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation[J]. *Appl Phys B*, 1999, 69: 327.
- [6] Diddams S A. The evolving optical frequency comb [J]. *JOSA B*, 2010, 27: B51-B62.
- [7] Ye J, Cundiff S T. Femtosecond optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application[M] Berlin: Springer, 2005.
- [8] Diddams S A, Jones D J, Ye J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 5102: 84.
- [9] Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 233: 416.
- [10] Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2264-2275.
- [11] Ma L S, Bi Z, Bartels A, L, et al. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10-19 level [J]. *Science*, 2004, 303: 1843-1848.
- [12] Takamoto M, Hong F L, Higashi R, et al. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435: 321-324.
- [13] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, et al. Frequency ratio of Al+ and Hg+ single-ion optical clocks; metrology at the 17th Decimal Place [J]. *Science*, 2008, 319: 1808-1812.
- [14] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10-18 level [J]. *Nature*, 2014, 506: 71.
- [15] Blatt S, Ludlow A D, Campbell G K, et al. New limits on coupling of fundamental constants to gravity using 87 Sr optical lattice clock[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 140801.
- [16] Kolkowitz S, Pikovski I, Langellier N, et al. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks [J]. *Phys Rev D*, 2016, 94: 124043.
- [17] Julien Mandon, Guy Guelachvili, Nathalie Picqué. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb [J]. *Nature Photon*, 2009, 3: 99.
- [18] Joohyung Lee, Young Jin Kim, Keunwoo Lee, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. *Nature Photon*, 2010, 4: 716.
- [19] Yoshiaki Nakajima, Kaoru Minoshima. Highly stabilized optical frequency comb interferometer with a long fiber-based reference path towards arbitrary distance measurement [J]. *Opt Express*, 2015, 23: 25979.
- [20] van den Berg S A, Persijn S T, Kok G J P, et al. Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 183901.
- [21] Zhao Xin, Hu Guoqing, Zhao Bofeng, et al. Picometer-resolution dual-comb spectroscopy with a free-running fiber



- laser[J]. *Opt Express*, 2016, 24: 21833.
- [22] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photon*, 2009, 3: 351–356.
- [23] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs [J]. *Science*, 2018, 359: 887.
- [24] Kato T, Uchida M, Minoshima K. Non-scanning three-dimensional imaging using spectral interferometry with chirped frequency comb [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016: SW1H.4.
- [25] Liu T A, Newbury N R, Coddington I. Sub-micron absolute distance measurements in sub-millisecond times with dual free-running femtosecond Er fiber-lasers [J]. *Opt Express*, 2011, 19: 18501.
- [26] Danzmann K, the LISA study team. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements [J]. *Class Quantum Grav*, 1996, 13: A247–A250.
- [27] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system [J]. *Science*, 2004, 305: 503–505.
- [28] Kurita T, Yoshida H, Kawashima T, et al. Generation of sub-7-cycle optical pulses from a mode-locked ytterbium-doped single-mode fiber oscillator pumped by polarization-combined 915nm laser diodes[J]. *Opt Lett*, 2012, 37: 3972–3974.
- [29] Luo D, Liu Y, Gu C, et al. High-power Yb-fiber comb based on pre-chirped-management self-similar amplification [J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 061106.
- [30] Zhou Shian, Lyuba Kuznetsova, Chong Andy, et al. Compensation of nonlinear phase shifts with third-order dispersion in short-pulse fiber amplifiers [J]. *Opt Express*, 2005, 13: 4869–4877.
- [31] Lyuba Kuznetsova, Frank W Wise. Scaling of femtosecond Yb-doped fiber amplifiers to tens of microjoule pulse energy via nonlinear chirped pulse amplification[J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 2671–2673.
- [32] Hung-Wen Chen, JinKang Lim, Shu-Wei Huang et al. Optimization of femtosecond Yb-doped fiber amplifiers for high-quality pulse compression [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 28672–28682.
- [33] Schibli T R, Hartl I, Yost D C, et al. Optical frequency comb with submillihertz linewidth and more than 10 W average power[J]. *Nature Photon*, 2008, 2: 355–359.