

掺 Er 光纤飞秒激光器载波包络位相偏移的探测*

曹士英^{1)†} 蔡岳²⁾ 王贵重²⁾ 孟飞¹⁾ 张志刚²⁾ 方占军¹⁾ 李天初¹⁾

1) (中国计量科学研究院, 电学与量子计量科学研究所, 北京 100013)

2) (北京大学信息科学技术学院, 量子电子学研究所, 北京 100871)

(2010年9月6日收到; 2010年12月8日收到修改稿)

本文介绍了基于掺 Er 光纤飞秒激光器光学频率梳中光学部分的研制. 实验上采用重复频率为 230 MHz 的掺 Er 光纤飞秒激光器, 通过放大、光谱展宽以及单臂 $f-2f$ 系统, 在优化及分析相关参数影响的基础上, 获得了 ~ 30 dB 信噪比 f_0 的输出, 为光纤光学频率梳的建立奠定了基础.

关键词: 掺 Er 光纤激光器, 光学频率计量, 光纤光学频率梳, 光谱展宽

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

1. 引言

飞秒光学频率梳是很多高端研究的基础性仪器, 例如原子跃迁频率的精密测量、光钟的频率测量、精细结构常数的测量、引力波的测量、微重力的测量、系外行星的探测、高精度绝对距离的测量、高精度快速傅里叶变换光谱学、光频与射频之间的传递、导航定位、时间频率标准传递等. 20 世纪 90 年代钛宝石飞秒激光器的发展以及光子晶体光纤的发明, 为飞秒光学频率梳的研究带来了契机.

目前钛宝石飞秒激光器与光子晶体光纤相结合产生覆盖可见光到近红外波段的超过一个倍频程的光谱, 一直是光学频率梳中探测载波包络位相偏移(f_0)的必要手段, 也是目前最为成熟的技术之一^[1-3]. 但这种装置存在自身的弊端和不足. 第一, 钛宝石飞秒激光器采用倍频后的 Nd:YVO₄ 激光器进行抽运, 其价格昂贵并且寿命一般只有数千个小时. 此外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激光器在光学频率测量领域的广泛应用. 第二, 钛宝石激光器输出的飞秒激光和光子晶体光纤之间的耦合采用分离器件并在自由空间中传输, 因此光束耦合困难、光

纤端面易受灰尘干扰导致损伤. 此外光子晶体光纤芯径较细限制了耦合能量和耦合效率的提高, 是此类频率梳长期稳定性差的根本原因. 而过长的光纤往往会导致噪声的增加和光谱的相干性变差, 为具体实验带来了不便.

直接从钛宝石飞秒激光器输出倍频程光谱是最为理想的目标. 虽然若干大学和研究所的研究人员已经证实了这种方法的可行性并且在光学频率梳系统中加以利用^[4-6], 但钛宝石飞秒激光器直接产生倍频程光谱, 需要利用超宽带啁啾镜进行严格色散补偿, 同时对激光腔镜的色散和反射率、激光腔的设计和调节要求都十分苛刻. 其中, 超宽带啁啾镜是倍频程钛宝石飞秒激光器中的关键器件和瓶颈之一.

因此, 如何降低飞秒激光器的固有成本并避免使用光子晶体光纤、简化飞秒光学频率梳的复杂性并增加其可操作性和稳定性, 以寻求更好的能够产生倍频程宽度的飞秒光源一直是人们追求的目标.

从目前国际技术发展来看, 飞秒光学频率梳系统正在逐步由第一代的基于钛宝石飞秒激光器的光学频率梳系统进入第二代的基于全光纤飞秒激光器的光学频率梳系统^[7-9]. 飞秒光纤激光器作为飞秒技术发展的前沿领域已经取得了突飞猛进的

* 国家科技支撑计划(批准号:2006BAK03A20), 国家重点基础研究发展计划(973 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.

† E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

隔离器 ISO 为厚度为 1.6 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. 波片组合用于调节腔内激光的偏振方向,以实现光纤中非线性偏振旋转锁模. 偏振分光片用于产生线偏光的分离作为激光器的输出. 增益光纤、光纤准直器的尾纤、WDM 的尾纤均采用普通单模光纤进行连接. 该激光器中还预装了 PZT 用以实现对光纤的拉伸,为将来激光器重复频率 f_r 的锁定提供基础.

该激光器中,增益光纤在 1550 nm 处的群速度色散为 $12 \text{ fs}^2/\text{mm}$,其长度为 400 mm. WDM 在腔内的两段尾纤在 1550 nm 处的群速度色散为 $-1.5 \text{ fs}^2/\text{mm}$,其长度均为 100 mm,光纤准直器 $\text{Col}_1, \text{Col}_2$ 的尾纤均为普通单模光纤,该光纤在 1550 nm 处的群速度色散为 $-22 \text{ fs}^2/\text{mm}$,两个光纤准直器的尾纤长度分别为 165 mm 和 120 mm;二分之一和四分之一波片均为石英胶合波片,厚度分别约为 1 mm 和 0.7 mm, PBS 通光长度为 10 mm,空间隔离器厚度为 1.6 mm,综合腔内光纤及光学器件考虑,腔内净色散约为 -2170 fs^2 . 该激光器在锁模运转时工作在展宽脉冲锁模状态.

为了得到尽可能高的重复频率,我们通过采用高掺杂的增益光纤,并尽可能减小腔内光纤的长度来实现. 其中掺 Er 光纤的长度必须保证在一个有效范围之内才能实现出光和锁模,一般长度在 30 cm—40 cm 之间. 当重复频率大于 200 MHz 时,单脉冲能量显著下降,因此要提高抽运功率并适当加长增益光纤的长度. 同时腔内其他的器件也应该尽量减小长度,例如隔离器可以由光纤式的器件更换为空间式的器件. 但波分复用器件 WDM 和光纤准直器的尾纤则不可避免,实验中在熔接允许的条件下两个器件的尾纤尽量剪短,这样可以使激光器的重复频率提高到 230 MHz,已接近商用激光器 250 MHz 的重复频率.

对于该振荡器,在 600 mW 抽运下,我们得到了稳定的锁模激光输出,其中输出的平均功率为 60 mW,直接输出光谱半高全宽约为 100 nm,如图 2 所示,其中插图 of 线性坐标归一化后的光谱曲线. 由于展宽脉冲锁模机理下,腔内正负色散元件交替出现,因此脉冲宽度在腔内也呈现交替变化,当脉冲在最窄宽度时,由于腔内峰值功率过高会引起光纤的非线性效应,这在一定程度上诱发了光谱的进一

步展宽,导致激光器锁模运转时的光谱宽度大于掺 Er 光纤的自发辐射谱. 该激光器直接输出激光的脉冲宽度低于 100 fs,可由正色散光纤进一步压缩至小于 60 fs,如图 3 所示. 该振荡器的锁模阈值为 490 mW.

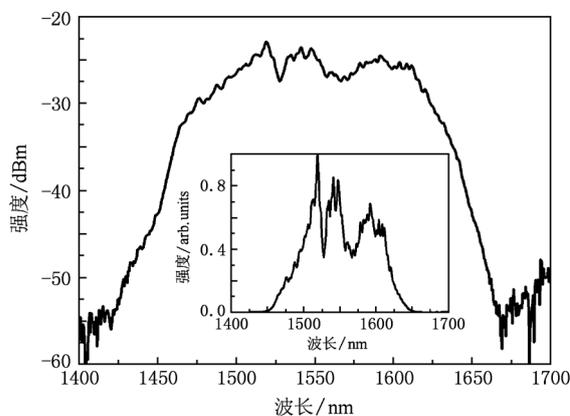


图 2 对数坐标下,振荡器输出的光谱曲线(其中插图为线性坐标归一化后的光谱曲线)

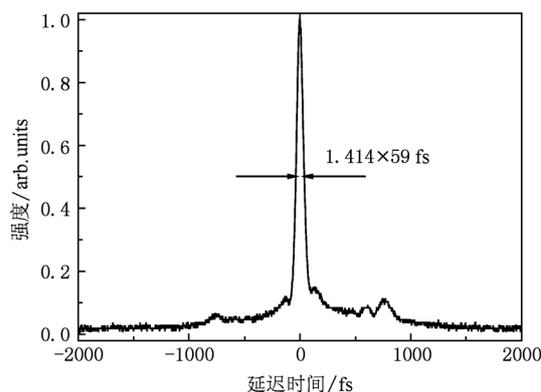


图 3 腔外压缩后获得的相关曲线

从振荡器出来的飞秒激光脉冲,经光纤准直器 Col_3 和光纤隔离器 Isolator 后,进行两级放大系统,如图 1 中 B 部分所示. 两级放大均采用单端后向抽运以保持较高抽运效率. 两级放大器中的增益光纤采用 LIEKKI 公司的 Er80-4/125 型号的光纤,它在 1530 nm 处的吸收率为 80 dB/m. 对于两级放大器中增益光纤的长度,我们通过逐渐剪短光纤监测放大功率的方法来获取光纤的最佳长度,两级放大器中增益光纤的长度分别为 38 cm 和 45 cm. 光纤放大器还包括前级的展宽器和后级的压缩器. 对于我们的系统为了利用全光纤的优势,在放大器前使

用正色散的单模光纤来展宽,有利于放大器获得更大功率并且避免放大过程中较强非线性效应的影响. 放大器后用负色散的单模光纤来压缩,得到最短脉冲,以获得较高的峰值功率,进而通过后续 HNLF 来获得倍频程的光谱输出. 两级放大器之间采用一部分空间光路用于放置四分之一波片和二分之一波片组合,调节偏振状态以保证经过 HNLF 后的光谱展宽. 波片和光纤准直器带来的损耗可以由第二级放大器进行补偿.

从振荡器输出的激光平均功率为 60 mW,耦合进入光纤约为 50 mW,经过一级放大器在 605 mW 的抽运功率下能够得到 170 mW 的输出,经过二级放大在 700 mW 的抽运功率下可以达到 315 mW 的输出,经过单模光纤压缩,获得了接近 50 fs 的脉冲.

经过两级放大压缩后的脉冲通过 HNLF 进行倍

频程扩谱,如图 1 中的 C 部分所示. 实验所用 HNLF 的有效非线性系数为 $10.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,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 $0.01 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$. 对于放大压缩后的脉冲能否通过 HNLF 实现倍频程光谱,除脉冲自身参数外,HNLF 的后两个参数影响更大. 实验中我们采用 30 cm 长度的 HNLF,并通过调节一二级放大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,如图 3 所示. 考虑到倍频程光谱范围内长波倍频的需要,在扩谱的过程中,我们将倍频程范围内的长波成分的强度调节到高于倍频程范围内的短波成分,在图 4 中可以看到,2200 nm 波长成分的强度要明显大于 1100 nm 波长成分的强度,光谱在 2200 nm 处正好是一个峰值,有利于后续的倍频需要.

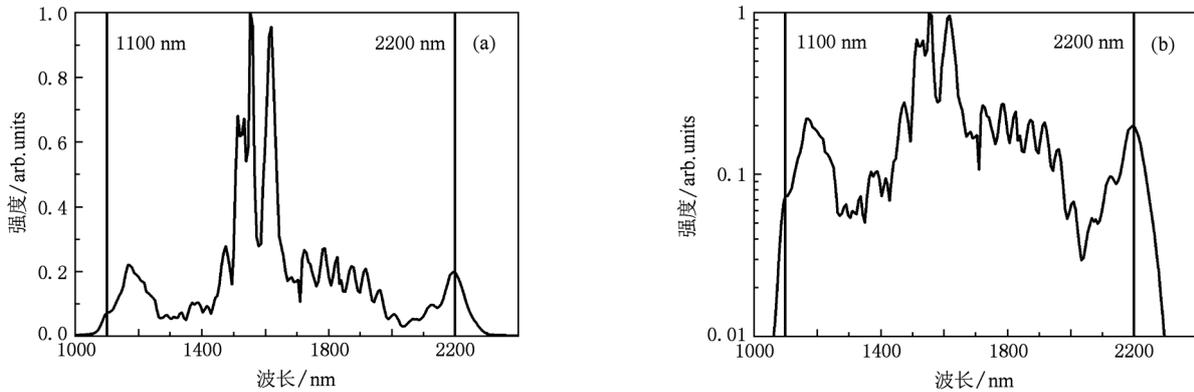


图 4 经 HNLF 后获得的倍频程光谱曲线 (a) 线性坐标下倍频程光谱; (b) 对数坐标下倍频程光谱

在倍频程光谱的基础上,光路通过非球面透镜 F_1 转换为空间光路后进入图 1 中的 D 部分,采用单臂 $f-2f$ 系统实现探测载波包络相移信号 f_0 . 单臂 $f-2f$ 系统的优点在于空间重合好,时间重合需要通过光纤进行补偿. 对于红外的不可见光,避免空间的调节是十分便利的. 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 μm ,可以实现对 1610—2340 nm 之间连续可调波长的倍频,避免了单或多通道的离散波长倍频. 晶体截面尺寸为 $1 \text{ mm} \times 8.6 \text{ mm}$,通光长度为 2 mm,该晶体置于黄铜卡件上形成自然制冷,晶体两个通光面镀有对 1100 nm 和 2200 nm 高透射率的膜系.

晶体前后分别采用焦距为 38.1 mm 的透镜用于聚焦和倍频后的光路准直,其中两个聚焦镜均镀有对 1100 nm 和 2200 nm 高透射率的膜系. 倍频程

光谱通过 MO:PPLN 晶体时,倍频程光谱中的长波 2200 nm 成分倍频至 1100 nm,与倍频程光谱中的短波 1100 nm 成分进行拍频. 从第二个透镜出射的光经过 1100 nm 窄带滤波片和短焦距透镜耦合进入光电探测器中,探测器采用硅雪崩光电二极管.

需要指出的是,由于我们采用了单臂 $f-2f$ 结构,尽管避免了空间调节,但时间调节却无法实现,必须在 HNLF 后通过合适的色散补偿进行时间调节,使倍频程光谱中长波倍频后的短波脉冲与倍频程内自身的短波脉冲具有时间重合. 实验中,在 HNLF 后我们采用固体色散玻璃进行色散补偿,对于不同长度的玻璃, f_0 信噪比相差很大,如图 5 所示. 从图中可以看出色散玻璃的长度在 0—25 mm 变化的过程中, f_0 的信噪比可以从 12 dB 增加到 28 dB,当色散玻璃的长度大于 25 mm 时, f_0 的信噪比开始下降. 因此 HNLF 后

的色散优化是 f_0 信噪比提高的关键,它存在一个最佳值以满足 f_0 最大信噪比的实现.

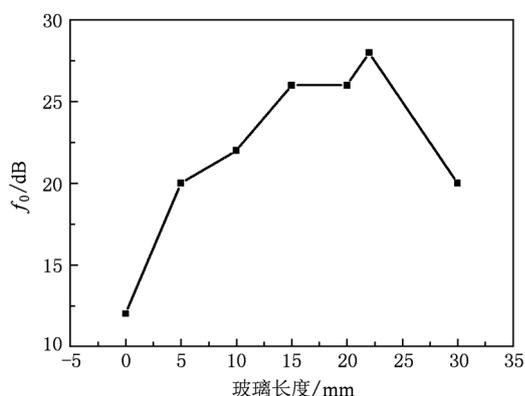


图5 HNLF 后色散玻璃长度对 f_0 信噪比的影响

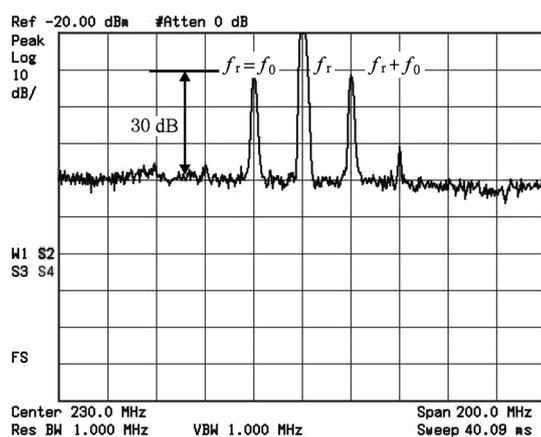


图6 频谱分析仪记录的 f_0 信号(其中分辨率带宽为 1 MHz, f_0 信噪比 ~ 30 dB)

在目前的条件下,我们初步获得了近 30 dB 的 f_0 输出,如图 6 所示. 图 6 中从左到右的信号分别 f_r , $-f_0$, f_r , $f_r + f_0$. 需要指出的是尽管 f_0 的信噪比大于 30 dB 时实际已经可以满足后续锁定电路或频率计数器的需要,但考虑到我们建立的光纤光学频率梳未来将为光钟-铯喷泉钟的比对,光钟-光钟的比对服务,因此我们还需要更细致的优化和参数选择将 f_0 的信噪比提高至大于 40 dB,以实现光学频率梳的长期锁定需要.

3. 结 论

本文介绍了基于掺 Er 光纤飞秒光学频率梳光学部分的研制工作. 实验上采用重复频率为 230 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 60 mW 输出功率提高到 315 mW,通过脉冲压缩后进入 HNLF 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,探测到了 30 dB 信噪比的 f_0 的输出. 尽管目前 f_0 的信噪比只有 30 dB,但通过更进一步的系统优化和参数选择,如脉冲压缩、输出功率、HNLF 长度、倍频晶体长度等,将 f_0 的信噪比提高至大于 40 dB 尚存空间.

飞秒激光器中 f_0 的获取是整个光学频率梳研制的关键. 在掺 Er 光纤激光器中获取 f_0 将为整个掺 Er 光纤光学频率梳系统的研究扫平了障碍. 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] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [2] Reichert J, Holzwarth R, Udem Th, Hänsch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59
- [3] Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [4] Ramond T M, Diddams S A, Hollberg L, Bartels A 2002 *Opt. Lett.* **27** 1842
- [5] Fortier T M, Bartels A, Diddams S A 2006 *Opt. Lett.* **31** 1011
- [6] Chen L J, Benedick A J, Birge J R, Sander M Y, Kärtner F 2008 *Opt. Express* **16** 20699
- [7] Adler F, Moutzouris K, Leitenstorfer A, Schnatz H, Lipphardt B, Grosche G, Tauser F 2004 *Opt. Express* **12** 5872
- [8] Peng J L, Ahn H, Shu R H, Chui H C, Nicholson J W 2007 *Appl. Phys. B* **86** 49
- [9] Tauser F, Leitenstorfer A, Zinth W 2003 *Opt. Express* **11** 594
- [10] Peng J L, Liu T A, Shu R H 2009 *IEEE International* **20** 344
- [11] 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]
- [12] 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]
- [13] 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]

Detection of carrier-envelope offset frequency in an Er-doped fiber femtosecond laser*

Cao Shi-Ying^{1)†} Cai Yue²⁾ Wang Gui-Zhong²⁾ Meng Fei¹⁾
Zhang Zhi-Gang²⁾ Fang Zhan-Jun¹⁾ Li Tian-Chu¹⁾

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

2) (*Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*)

(Received 6 September 2010; revised manuscript received 8 December 2010)

Abstract

It is the inevitable trend of the development for the optical frequency comb based on the Ti: sapphire femtosecond laser to be replaced by that based on the Er: fiber femtosecond laser. The detection of the carrier – envelope offset f_0 in the femtosecond laser is a key to the realization of an optical frequency comb. In this paper, the structure of the optical part of an Er: fiber optical frequency comb is introduced. The optical pulses from an Er: fiber femtosecond laser with a repetition of 230 MHz are first amplified with a two stage amplifiers, spectrally broadened in a highly nonlinear fiber, and then pass through a single-beam $f-2f$ self-referencing interferometer. By optimizing the optical parameters, the f_0 with a signal-to-noise ratio of 30 dB is obtained in the Er: fiber femtosecond laser, which is favorable for the realization of an Er: fiber frequency comb.

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

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

* Project supported by the State Key Program of Science and Technology of China (Grant No. 2006BAK03A20), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB922902), 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