

光纤飞秒光学频率梳载波包络偏移频率锁定的实验研究

夏传青 武腾飞 赵春播 韩继博 李姝熠 邢帅 张磊

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所计量与校准技术重点实验室, 北京 100095

摘要 自主研制了基于掺铒光纤飞秒激光技术的光纤飞秒光学频率梳。详细介绍了此光纤光梳的系统结构、工作过程与各项性能参数。经过功率放大、色散优化与高非线性光纤扩谱等过程,得到了超过一个倍频程的光梳超连续光谱。光梳的载波包络偏移频率(简称偏频, f_o)从 $f-2f$ 共线式干涉系统中提取,并锁定至铷原子钟上。实验获得了 35 dB 信噪比的偏频信号,实现了锁定时间超过 12 h 的稳定运转。

关键词 超快光学; 光学频率梳; 载波包络偏移频率; 光纤飞秒激光器; 超连续谱

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.123201

Experiment Study on Carrier-Envelope Offset Frequency Locking in a Femtosecond Fiber Comb

Xia Chuanqing Wu Tengfei Zhao Chunbo Han Jibo Li Shuyi Xing Shuai Zhang Lei

Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China

Abstract A home-made fiber comb is developed based on the technology of Erbium-doped fiber femtosecond laser. The system configuration, working process and performance parameters of this comb are described in detail. A supercontinuum more than one octave is obtained after power amplification, dispersion optimization and spectrum spreading in highly nonlinear fibers. The carrier-envelope offset frequency (f_o) is extracted by means of a linear $f-2f$ interferometer and locked to a Rubidium atomic clock. The observed signal-to-noise ratio of f_o is 35 dB and steady operation with locking time more than 12 h is demonstrated.

Key words ultrafast optics; optical frequency comb; carrier-envelope offset frequency; fiber femtosecond lasers; supercontinuum

OCIS codes 320.7090; 320.6629; 120.3940; 060.2410

1 引言

2005年,德国马克思-普朗克研究所的亨施教授与美国国家标准技术研究院的霍尔教授因对飞秒光学频率梳技术的贡献获得了当年的诺贝尔物理学奖。飞秒光学频率梳作为连接光学频率标准与微波频率标准的桥梁,在基础研究与工程实践上均显示出巨大的应用价值,目前已在光学频率直接测量^[1-4]、高精度绝对距离测量^[5-8]、精密光谱学^[9-12]、时间频率标准传递^[13-15]、天文定标^[16-17]及光钟^[18-21]等领域获得了广泛的应用。光学频率梳的应用依赖于高稳定度的重复频率(简称重频, f_r)与载波包络偏移频率(简称偏频, f_o),因此需要将重频与偏频锁定至原子钟上。拥有一台这样的光频梳就相当于拥有了几万乃至几十万台稳频激光器,并且这数十万台激光器都具有和原子钟同等的频率稳定度,这对于基于光频梳的精密测量具有重要意义。

收稿日期: 2016-07-18; 收到修改稿日期: 2016-08-29; 网络出版日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61205169)、国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2012205B003)

作者简介: 夏传青(1989—),男,硕士,助理工程师,主要从事光纤飞秒光学频率梳方面的研究。

E-mail: njucqxia@126.com

义^[11]。光学频率梳的重频可以通过高速光电探测器直接测得,而偏频起源于飞秒激光器内脉冲传播时包络与载波之间的相位偏差,对其的探测与锁定一直是光梳研制的核心与难点^[22-27]。

得益于光纤技术的发展,基于掺铒光纤飞秒激光器的光学频率梳因其结构简单、体积较小及易于维护等优点而得到了各国研究者的广泛关注。在本课题组搭建的掺铒光纤飞秒激光器以及重频锁定工作的基础上^[28-29],本文利用搭建的掺铒光纤飞秒激光器开展了对光纤光频梳偏频信号提取与锁定的工作,获取了高信噪比的偏频信号,完成了对其的长时间精密锁定。这一工作为利用光纤飞秒光频梳进行精密测量打下了基础。

2 提取 f_o 信号的原理

激光谐振腔中的介质与元件不可避免地存在色散,锁模脉冲在谐振腔内传播时载波以相速度传播而包络以群速度传播。在腔内每环行一周,载波与包络之间就产生相位差 $\Delta\varphi$,如图 1(a)所示。载波与包络之间的相位差随着脉冲在腔内的振荡而不断积累,直至达到 2π ,此时载波与包络之间的相对相位恢复到初始状态,这就是载波包络偏频的起源。由以上的分析,可得偏频为

$$f_o = \frac{\Delta\varphi}{2\pi T_r}, \quad (1)$$

式中 $T_r = 1/f_r$, 为脉冲周期。从频域来看,光梳齿的频率不再是重频的整数倍,而是有所偏移,如图 1(b)所示。第 n 根梳齿的频率 f_n 为

$$f_n = nf_r + f_o. \quad (2)$$

确定了 f_r 和 f_o 就可以确定光梳中每一个梳齿的频率。

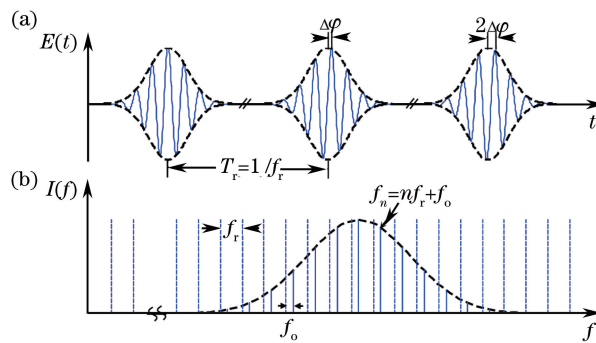


图 1 飞秒脉冲在(a)时域和(b)频域的示意图

Fig. 1 Femtosecond pulse in (a) time domain and (b) frequency domain

从图 1 可以看出,偏频体现在载波的相位因子上,无法通过基于光强测量的光电探测器直接获得,可以通过自参考法^[22-27]获取偏频。对于光谱范围超过一个光学倍频程的频率梳,它同时具有第 n 和第 $2n$ 根梳齿。第 $2n$ 根梳齿的频率为

$$f_{2n} = 2nf_r + f_o. \quad (3)$$

将第 n 根梳齿经过晶体二倍频,此倍频梳齿的频率为

$$2f_n = 2nf_r + 2f_o. \quad (4)$$

第 n 根梳齿的倍频与原有第 $2n$ 根梳齿相干叠加,获得的拍频信号的频率即为 f_o 。

3 实验结果

实验系统如图 2 所示。A 部分是自行研制的掺铒光纤(EF)飞秒激光器,作为飞秒光学频率梳的种子光源。980 nm 的半导体抽运源经过光纤隔离器(FISO)、980/1550 nm 波分复用器(WDM)耦合进入掺铒增益光纤(Er80-8/125, Liekki)。两个光纤准直器(FC)之间的微型隔离器(ISO)保证振荡腔内激光单向运行。基于非线性偏振旋转锁模机制对激光器进行锁模,锁模的建立和输出由空间光路的 $1/2$ 波片(HWP)、 $1/4$ 波片(QWP)和偏振分光棱镜(PBS)实现。空间光路中还包括一个背部粘接压电位移器(PZT)的光学延迟器,通过精确调节腔长可实现重频的锁定。此激光器重频为 109 MHz,输出平均功率为 48.1 mW。种子源

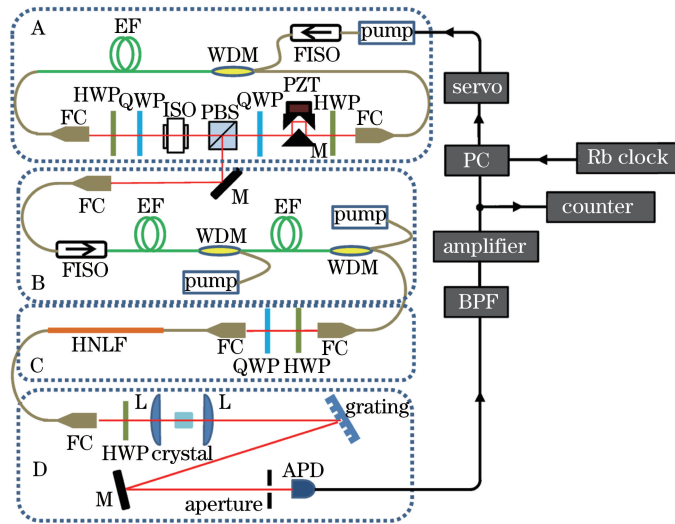


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

脉冲的自相关测量曲线如图 3(a),以双曲正割拟合的脉冲半峰全宽(FWHM)约为 80 fs。

种子源直接输出的功率较小,无法满足后续扩谱和倍频的要求,必须对其进行功率放大。B 部分是飞秒脉冲的放大单元,由采用后向抽运的两级放大器组成。放大器增益光纤选用 Liekki 公司型号为 Er80-4/125 的掺铒光纤,其色散参数为 $-26 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,两段掺铒光纤的长度均约为 48 cm;其他连接光纤为 SMF28 光纤。放大器抽运源的最大输出功率是 1.2 W,当以最大功率抽运时,放大后的脉冲功率可达 330 mW。实验表明,扩谱效果与脉冲宽度密切相关,脉宽越窄,通过高非线性光纤(HNLFF)获得的光谱越宽。由于放大系统中的掺铒光纤与 SMF28 光纤的色散符号相反,因此可以通过增减一级放大器前 SMF28 光纤的长度来引入一定的预啾啾,获得较窄的脉冲。本实验得到放大后的脉宽约为 150 fs,如图 3(b)所示。

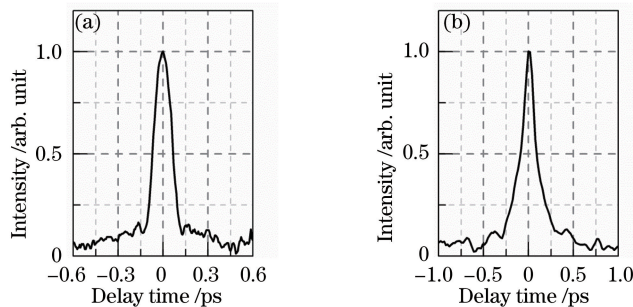


图 3 飞秒脉冲自相关曲线。(a)种子源直接输出脉冲;(b)经过色散优化后的放大器输出脉冲

Fig. 3 Interferometric autocorrelation traces of femtosecond pulse. (a) Seed pulse; (b) amplified pulse after dispersion optimization

放大后的脉冲进入 C 部分的扩谱单元。瞬时功率很高的超短脉冲在通过非线性介质时,由于自聚焦、自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼散射和四波混频等非线性效应的共同作用,使脉冲光谱中产生许多新的频率成分,从而使输出激光的谱宽远远大于输入激光的谱宽。高非线性光纤选用 OFS 公司的产品,长度为 21.5 cm。HNLFF 后面熔接一段单模光纤,作为输出准直镜的尾纤。扩谱效果对入射脉冲的偏振方向非常敏感,因此在 HNLFF 之前的空间光路中放入一个 $1/4$ 波片和一个 $1/2$ 波片调节入射光的偏振方向。

D 部分即为 $f-2f$ 共线干涉系统。扩谱后的光束通过焦距为 35 mm 的透镜(L)聚焦在倍频晶体上。倍频晶体为台湾 HCP 公司生产的周期极化掺镁铌酸锂晶体(MgO:PPLN),通光方向的长度为 2 mm,垂直于通光方向的极化周期渐变,因此选择不同的入射点位置可以在 1610~2340 nm 波长范围实现倍频。为了选择最佳倍频波长,将晶体放置在一维精密位移台上垂直于通光方向移动。晶体前放置一片中心波长为 2000 nm 的宽带半波片来改变入射光的偏振方向。晶体后使用闪耀波长为 $1 \mu\text{m}$ 的 300 lp/mm 的光栅和全反镜(M)进行分光,利用小孔光阑选频后进入雪崩光电探测器(APD110C, Thorlabs)。

HNLFF 后产生的超连续谱利用一台紫外-近红外光谱仪(HR4000CG-UV-NIR, Ocean Optics)进行测量。此光谱仪只能测得超连续谱高频端的一部分,用它分别测量了透过晶体和光路中无晶体两种情况下的光谱,结果如图 4 所示。通过仔细优化放大器抽运功率和 HNLFF 前波片组的旋向,同时移动晶体位置,在 964 nm 处出现了很强的倍频信号峰,如图 4 中的红色线所示;此时拿开晶体,可以获得超连续谱高频端的部分光谱,如图 4 中的蓝色线所示;两者在 964 nm 附近出现了重合。分析图 4 的光谱测量结果,可以看出超连续谱至少覆盖了 964~1928 nm 的波长范围。这种测量方法不仅有利于选择合适的倍频波长,而且给后续的光阑选光提供了方便,只需要将光阑放置在 964 nm 的衍射路线上即可实现光阑选光。

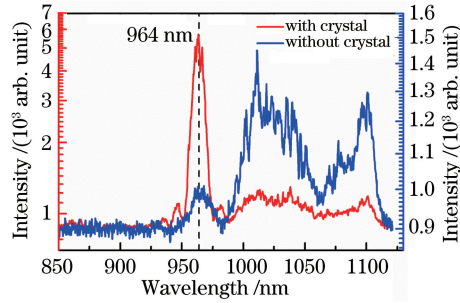


图 4 超连续谱高频端(蓝线)和超连续谱低频端通过晶体在 964 nm 处产生的倍频信号(红线)

Fig. 4 High frequency part of supercontinuum (blue line) and the second harmonic signal at 964 nm of low frequency part of the supercontinuum after crystal (red line)

小孔光阑选出 964 nm 的成分注入 APD,在频谱仪分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)均为 100 kHz 的情况下,获得了约 35 dB 信噪比(SNR)的偏频信号,如图 5 所示。

f_o 信号经过带通滤波(BPF)、低噪声放大(amplifier)后进入鉴相器(PC),与经 GPS 监控的铷钟(910R, FLUKE)产生的 20 MHz 参考频率进行鉴相,输出的误差信号通过伺服系统作用到种子激光器的抽运源电流上,实现对 f_o 信号的锁定。同时, f_o 信号分出一路进入频率计数器(53230A, Agilent),作为对锁定效果的监控。连续锁定 12.5 h 的计数结果如图 6 所示,其中计数器的闸门时间为 1 s,测量点为 45000 个。锁定后偏移频率的平均值为 20 MHz,标准偏差为 23.4 mHz。

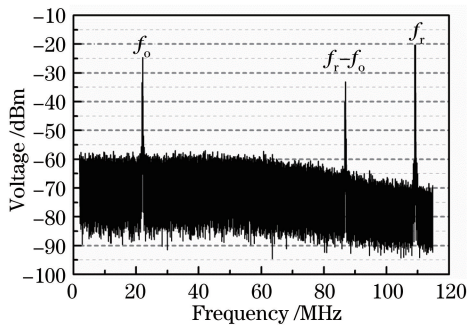


图 5 频谱仪记录的 35 dB 信噪比 f_o 信号

Fig. 5 f_o with signal-to-noise ratio of 35 dB recorded by spectrum analyzer

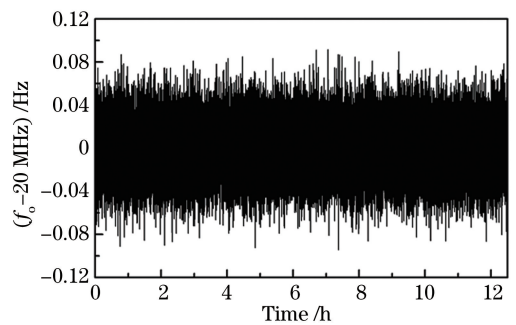


图 6 f_o 连续锁定 12.5 h 的频率计数结果

Fig. 6 Frequency counts results of f_o after locking for 12.5 h

4 分析与讨论

通过锁定后获得的数据计算了不同采样时间下的 Allan 偏差,见表 1。10 s 采样时间的 Allan 偏差为 3.06×10^{-10} ,100 s 采样时间的 Allan 偏差为 9.16×10^{-11} ,考虑到此型号铷钟的频率稳定度(10 s 时频率稳定度小于 1×10^{-11} ;100 s 时频率稳定度小于 3×10^{-12}), f_o 信号的锁定达到了较好的效果。如果利用此光梳对 1.5 μm 附近的稳频激光进行绝对频率测量,则在采样时间为 100 s 时, f_o 信号锁定精度引入的不确定度分量小于 10^{-17} ,满足光频计量的需要。由于本系统光纤都铺设在台面上,未作特殊的隔振措施,实验室控温装置未启用,这些因素可能限制了 f_o 信号的频率稳定度的进一步提高。下一步将采取隔振与控温措施,

实现更长时间、更高稳定度的锁定。

表 1 锁定后不同采样时间下 f_0 的 Allan 偏差

Table 1 Allan deviation of f_0 using different sample time

Sample time /s	Allan deviation
1	1.24×10^{-9}
10	3.06×10^{-10}
100	9.16×10^{-11}
1000	2.38×10^{-11}

5 结 论

以自行研制的掺铒光纤飞秒激光器为种子源,研制了光纤飞秒光学频率梳,并搭建了光梳偏频信号的提取和锁定系统。光梳的输出功率最大可达 330 mW,扩谱后获得了 964~1928 nm 的超连续谱。实验观测到的偏频信号信噪比达到 35 dB,连续锁定时间超过 12 h,锁定后的 Allan 偏差在 100 s 采样时间下达到 10^{-11} 量级。此偏频锁定的光梳可满足后续进行光频绝对测量的要求。由于本系统未作隔振与控制温措施,限制了偏频信号的频率稳定度,下一步将采取相应措施,实现更长时间、更高稳定度的锁定。

参 考 文 献

- Udem T, Reichert J, Holzwarth R, *et al.* Absolute optical frequency measurement of the Cesium D_1 line with a mode-locked laser[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(18): 3568-3571.
- Ryu H Y, Lee S H, Lee W K, *et al.* Absolute frequency measurement of an acetylene stabilized laser using a selected single mode from a femtosecond fiber laser comb[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 2867-2873.
- Meng Fei, Cao Shiyang, Cai Yue, *et al.* Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 100601.
孟 飞, 曹士英, 蔡 岳, 等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 100601.
- Lin Baike, Cao Shiyang, Zhao Yang, *et al.* A compact iodine-stabilized solid-state laser at 532 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902002.
林百科, 曹士英, 赵 阳, 等. 小型化碘稳频 532 nm 固体激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902002.
- Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- Lee J, Kim Y J, Lee K, *et al.* Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 716-720.
- Wang Guochao, Wei Chunhua, Yan Shuhua. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412002.
王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412002.
- Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412002.
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412002.
- Niering M, Holzwarth R, Reichert J, *et al.* Measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(24): 5496-5499.
- Thorpe M J, Balslev-Clausen D, Kirchner M S, *et al.* Cavity-enhanced optical frequency comb spectroscopy: application to human breath analysis[J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2387-2397.
- Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, *et al.* Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.
吴学健, 李 岩, 尉昊赞, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- Zhang Shuangyou, Zhang Yu, Yang Wanpeng, *et al.* Ramsey-comb spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 113002.

- 章双佑, 张宇, 杨晚鹏, 等. 拉姆塞光梳光谱学[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 113002.
- 13 Foreman S M, Ludlow A D, Miranda M H G, *et al.* Coherent optical phase transfer over a 32-km fiber with 1 s instability at 10^{-17} [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(15): 153601.
- 14 Jiang H, Kéfélian F, Crane S, *et al.* Long-distance frequency transfer over an urban fiber link using optical phase stabilization[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2029-2035.
- 15 Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, *et al.* Optical two-way time and frequency transfer over free space[J]. Nature Photonics, 2012, 7(6): 434-438.
- 16 Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, *et al.* Laser frequency combs for astronomical observations[J]. Science, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- 17 Wilken T, Curto G L, Probst R A, *et al.* A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level[J]. Nature, 2012, 485(7400): 611-614.
- 18 Oskay W H, Diddams S A, Donley E A, *et al.* Single-atom optical clock with high accuracy[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(2): 020801.
- 19 Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, *et al.* Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(7): 070802.
- 20 Li Tianchu, Fang Zhanjun. From meter to second at NIM: stabilized lasers-Cs fountain clocks-fs optical frequency combs-Sr lattice clock[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(10): 709-716.
李天初, 方占军. 从长度米到时间秒: 稳频激光-铯喷泉钟-飞秒光梳-锶光晶格钟[J]. 科学通报, 2011, 56(10): 709-716.
- 21 Meng Fei, Cao Shiyong, Zhao Guangzhen, *et al.* Application of an Er^{3+} -doped fiber comb for Sr lattice clock[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702012.
孟飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺铒光纤光梳在锶晶格钟中的应用研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702012.
- 22 Tauser F, Leitenstorfer A, Zinth W. Amplified femtosecond pulses from an Er^{3+} -fiber system: nonlinear pulse shortening and self-referencing detection of the carrier-envelope phase evolution[J]. Optics Express, 2003, 11(6): 594-600.
- 23 Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, *et al.* Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. Optics Letters, 2004, 29(3): 250-252.
- 24 Inaba H, Daimon Y, Hong F L, *et al.* Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5223-5231.
- 25 Cao Shiyong, Cai Yue, Wang Guizhong, *et al.* Detection of carrier-envelope offset frequency in an Er^{3+} -doped fiber femtosecond laser[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 094208.
曹士英, 蔡岳, 王贵重, 等. 掺 Er^{3+} 光纤飞秒激光器载波包络位相偏移的探测[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 094208.
- 26 Cao Shiyong, Meng Fei, Fang Zhanjun, *et al.* Experimental study on detection of the high signal-to-noise ratio of the carrier-envelope offset frequency in an Er^{3+} -doped fiber femtosecond laser[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064208.
曹士英, 孟飞, 方占军, 等. 掺 Er^{3+} 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[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064208.
- 27 Cao Shiyong, Meng Fei, Lin Baike, *et al.* Precise frequency control of an Er^{3+} -doped fiber comb[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134205.
曹士英, 孟飞, 林百科, 等. 长时间精密锁定的掺 Er^{3+} 光纤飞秒光学频率梳[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 134205.
- 28 Guo Jiashuai, Wu Tengfei, Liang Zhiguo, *et al.* 163 fs passively mode-locked Er^{3+} -doped fiber ring laser[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(4): 27-29.
国佳帅, 武腾飞, 梁志国, 等. 163 fs 被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器[J]. 计测技术, 2015, 35(4): 27-29.
- 29 Zhao Chunbo, Wu Tengfei, Liang Zhiguo. Research on repetition rate locking system of femtosecond laser[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(6): 22-25.
赵春播, 武腾飞, 梁志国. 飞秒激光器脉冲重复频率的锁定技术研究[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 22-25.