

级联掺 Yb 增益光纤提高拍频信号信噪比的实验研究

刘欢 曹士英 于洋 林百科 方占军

Experimental study on increasing signal-to-noise ratio of a beat note by cascading an Yb-doped fiber in an Er-fiber comb

Liu Huan Cao Shi-Ying Yu Yang Lin Bai-Ke Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 024206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

物理学报.2016, 65(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤锁模激光器

Highly stable and self-started all-fiber Yb<sup>3+</sup> doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution

物理学报.2016, 65(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214207>

203W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器

203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194208>

342W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器

342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194209>

基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量

Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating

物理学报.2016, 65(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104203>

# 级联掺Yb增益光纤提高拍频信号信噪比的实验研究\*

刘欢<sup>1)</sup> 曹士英<sup>2)†</sup> 于洋<sup>1)</sup> 林百科<sup>2)</sup> 方占军<sup>2)</sup>

1)(清华大学精密仪器系激光与光子技术研究室, 北京 100084)

2)(中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029)

(2016年7月2日收到; 2016年8月31日收到修改稿)

飞秒光学频率梳的出现使对未知激光的绝对频率测量成为可能, 极大地简化了激光绝对频率的量值溯源和比对工作. 为了保证测量数值的准确性, 飞秒光学频率梳与未知激光的拍频信号  $f_b$  的信噪比要求大于 30 dB. 针对碘稳频 532 nm 激光绝对频率测量的特定需求, 以 532 nm 激光的基频光 1064 nm 激光的绝对频率测量为着眼点, 本文采用 303 MHz 重复频率的掺 Er 光纤光学频率梳, 首先通过激光放大和光谱展宽技术使光谱覆盖到 1  $\mu\text{m}$  波段, 然后采用级联掺 Yb 增益光纤技术, 将扩谱后 1  $\mu\text{m}$  波段的激光功率进行放大, 提高了掺 Er 光纤光学频率梳扩谱后 1  $\mu\text{m}$  波长附近的激光强度. 采用碘稳频 532 nm 激光的基频光作为待测光源与飞秒光学频率梳进行拍频. 实验表明, 与未经过光谱增强的激光相比, 光谱增强后的激光与 1064 nm 激光拍频信号的信噪比提高了 5 dB, 保持在 35 dB 附近. 该技术有效地缓解了采用掺 Er 光纤光梳测量 1064 nm 激光绝对频率时对直接扩谱所获得的 1  $\mu\text{m}$  波长激光的强度要求.

**关键词:** 掺 Er 光纤飞秒激光器, 光谱增强, 拍频信号, 光纤光学频率梳

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.66.024206

## 1 引言

在飞秒光学频率梳诞生之前, 谐波光频链是测量光学频率的惟一工具. 谐波光频链成本高、难度大、使用和维护复杂. 世界上只有美国、德国、法国等少数几个国家拥有这种测量装置. 飞秒光学频率梳的出现, 极大地简化了光学绝对频率测量工作的复杂性. 一台飞秒光学频率梳就可以实现光学绝对频率测量, 把长度单位“米”直接溯源到时间单位“秒”, 并可以通过协调世界时 (UTC) 实现实时的国际比对和等效互认. 飞秒光学频率梳的波长测量范围广, 可以测量从可见光到近红外区域内的所有激光波长, 并进行量值传递. 飞秒光学频率梳测量精度高, 可达  $10^{-14}$  量级, 取决于外参考源.

采用飞秒光学频率梳对未知激光的绝对频率测量, 主要依靠计数器采集飞秒光学频率梳与未知激光的拍频信号  $f_b$  的频率值, 然后通过  $N \times f_r \pm f_0 \pm f_b$  获取绝对频率, 其中  $f_r$  是飞秒光学频率梳的重复频率,  $f_0$  是载波包络位相偏移频率,  $N$  是数值很大的整数, 可以通过波长计粗测或者通过微小改变重复频率值来获取<sup>[1]</sup>. 通常为了保证计数的准确性,  $f_b$  的信噪比要求至少大于 30 dB, 否则会造成计数器触发不正常导致数据采集不准. 此外, 为了实现长时间绝对频率测量, 高信噪比的  $f_b$  信号有助于对激光绝对频率漂移的长时间监测. 为了提高拍频信号的信噪比, 光学系统中可以引入缓冲激光技术<sup>[2]</sup>, 电学系统中可以引入跟踪滤波放大技术<sup>[3]</sup>.

光纤飞秒光学频率梳, 简称“光纤光梳”, 由于

\* 清华大学自主科研计划——青年教师自主选题基础研究 (批准号: 20131089299) 和质检公益性行业科研专项 (批准号: 201310007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

体积小、成本低廉、稳定性高、易于操作等诸多优点而受到人们的广泛青睐. 光纤光梳与外激光的拍频信号  $f_b$  的信噪比更容易保持恒定. 掺 Er 光纤光梳的中心波长在 1.5  $\mu\text{m}$  附近. 尽管通过高非线性光纤扩谱可以实现 1000—2200 nm 的宽带光谱输出<sup>[4-6]</sup>, 但该光谱处于红外波段, 很难满足实际的激光波长测量需求. 通过采用放大-倍频-扩谱技术<sup>[7]</sup>或单点倍频技术<sup>[8]</sup>, 可以实现激光输出波长向可见光波长的扩展, 并可以保证与未知激光 30 dB 信噪比拍频信号的获取, 满足可见光波长激光频率的测量要求. 但放大-倍频-扩谱中采用的光子晶体光纤仍然存在长时间光谱漂移造成拍频信号信噪比下降的风险.

在复现国际单位制 (SI) 单位“米”的几个推荐的波长标准中, 碘稳频 633 nm He-Ne 激光器<sup>[9]</sup>和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器<sup>[10,11]</sup>应用最为广泛. 因此, 人们更感兴趣的是碘稳频 532, 633 nm 等国际推荐值的激光频率的测量和激光绝对频率的长期监测. 与碘稳频 633 nm He-Ne 激光器相比, 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器具有稳定度高、功率高、无调制、光纤输出等诸多优点<sup>[12]</sup>, 因此对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光的频率监测更为重要.

目前飞秒光纤激光器的研究主要集中于 1, 1.5, 2  $\mu\text{m}$  等几个波段. 其中以掺 Yb 光纤为增益介质的 1  $\mu\text{m}$  激光器的研究最为显著, 在高能量、窄脉冲、高重复频率、低时域抖动、新型色散补偿及脉冲整形技术等方面都取得了飞速的发展<sup>[13-17]</sup>. 而以掺 Er 光纤光梳为光源的级联光纤光谱增强技术主要集中于掺 Yb 增益光纤的 1  $\mu\text{m}$  和掺 Tm:Ho 增益光纤的 2  $\mu\text{m}$  波长附近. 提取掺 Er 光纤飞秒激光器通过高非线性光纤扩谱后的 1  $\mu\text{m}$  波长激光, 通过级联掺 Yb 增益光纤的放大可以获得 1040 nm 处 1.2 nJ 的激光输出<sup>[18]</sup>, 进一步的功率放大可以获得大于 5 W 的平均功率输出<sup>[19]</sup>, 可以作为一种新的 1  $\mu\text{m}$  飞秒激光产生方法. 后续的倍频扩谱和拍频信号探测可以达到掺 Yb 光纤光梳的技术指标<sup>[18]</sup>. 该方法使基于掺 Er 光纤飞秒激光器的高功率 1  $\mu\text{m}$  光学频率梳成为可能. 提取掺 Er 光纤飞秒激光器通过高非线性光纤扩谱后的 2  $\mu\text{m}$  波长激光, 可以级联掺 Tm:Ho 增益光纤, 提高 2  $\mu\text{m}$  附近光谱强度, 一方面可以有效改善掺 Er 光纤飞秒激光器中  $f_0$  信号的信噪比<sup>[20]</sup>, 另一方面也可以实现基于掺 Er 光纤飞秒激光器的高功率人眼安全的 2  $\mu\text{m}$

激光输出<sup>[21]</sup>, 为大气中气体成分的远程监测、相干多普勒雷达提供有效光源<sup>[22]</sup>.

本文基于级联光纤的光谱增强技术, 针对碘稳频 532 nm 激光绝对频率测量的特定需求, 以 532 nm 激光的基频光 1064 nm 激光的绝对频率测量为着眼点, 采用 303 MHz 重复频率的掺 Er 光纤光梳, 通过级联掺 Yb 增益光纤技术有效地提高了光纤光梳扩谱后 1  $\mu\text{m}$  波长附近激光的强度, 使掺 Er 光纤光梳与碘稳频 532 nm 激光的基频光 1064 nm 激光拍频信号的信噪比得到了改善. 该技术有效地缓解了掺 Er 光纤光梳直接扩谱时对 1  $\mu\text{m}$  波长的强度要求.

## 2 实验装置与实验结果

### 2.1 1 $\mu\text{m}$ 光源的产生

系统中采用的光源为高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器, 如图 1 中 A 部分所示, 其详细结构和参数配置参考文献<sup>[23]</sup>. 抽运光 LD1 最大输出功率为 700 mW. 激光器重复频率为 303 MHz. 连续光状态下输出的平均功率为 130 mW, 锁模后的平均功率为 80 mW. 锁模后激光器工作在展宽脉冲锁模状态, 其输出的光谱曲线如图 2 所示. 经腔外压缩可获得小于 60 fs 的激光脉冲. 采用压电陶瓷 (PZT) 拉伸光纤的方式控制激光器腔长, PZT 对激光器重复频率的调节范围约为 1.5 kHz. 整个激光器置于一块尺寸为 21 cm  $\times$  15 cm  $\times$  12 cm 的合金铝材料的光学平板上, 采用聚四氟乙烯材料进行四周及顶盖密封. 激光器底板的温度控制在 23  $^{\circ}\text{C}$ .

激光器输出的飞秒激光经一分三分束器后, 其中的两路分别进入  $f_0$  和  $f_r$  探测单元, 用于探测  $f_0$  信号和  $f_r$  信号, 第三路光进入测量单元, 通过局部光谱增强后进入拍频模块 D.

经一分三分束器分束后一路功率约为 25 mW 的激光首先进入两级放大器, 如图 1 中 B 部分. 两级放大器均采用后向抽运方式, 抽运源在最大抽运电流 1.5 A 时输出功率为 800 mW. 两级放大器采用 LIEKKI 公司的 Er80-4/125 型号的光纤, 它在 1530 nm 处的吸收系数为 80 dB/m. 一级放大器增益光纤的长度为 50 cm, 二级放大器增益光纤的长度为 85 cm. 种子光经过一级放大后功率可以提升至 111 mW, 经过二级放大后功率可提升至 356 mW.

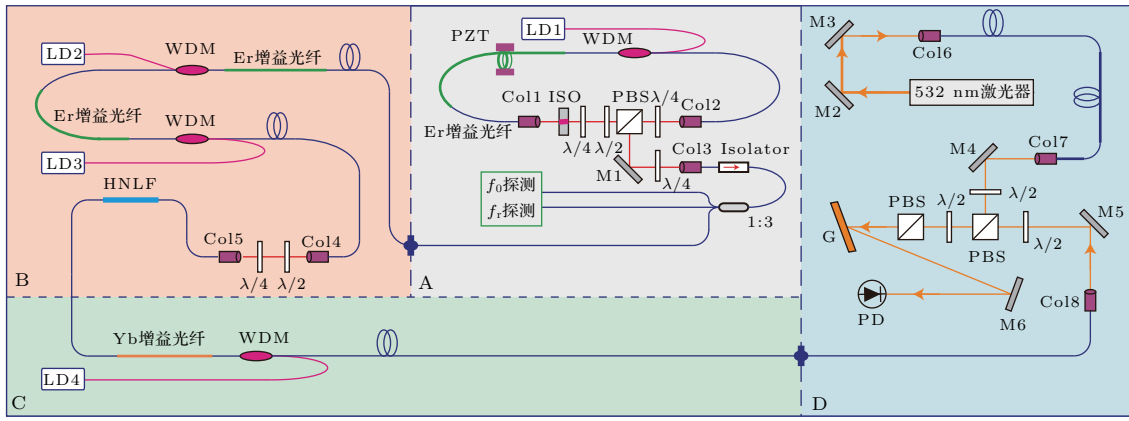


图1 (网刊彩色) 级联掺Yb增益光纤提高拍频信号信噪比的实验系统结构图 其中: LD1—LD4为980 nm单模抽运源, WDM为波分复用器, Col1—Col8为光纤准直器, PBS为偏振分光镜, ISO为空间光隔离器, Isolator为光纤光隔离器, PZT为压电陶瓷, HNLF为高非线性光纤,  $\lambda/4$ 为四分之一波片,  $\lambda/2$ 为二分之一波片, M1—M6为平面反射镜, G为衍射光栅, PD为InGaAs光电探测器

Fig. 1. (color online) Experimental setup for improving the SNR of the beat note by cascading an Yb-doped fiber amplifier in an Er-fiber comb. LD1—LD4, 980 nm single-mode laser diodes; WDM, wavelength division multiplexer; Col1—Col8, fiber collimators; PBS, polarization beam splitter; ISO, space isolator; PZT, piezoelectric transducer; HNLF, highly nonlinear fiber;  $\lambda/4$ , quarter wave plate;  $\lambda/2$ , half wave plate; M1—M6, plane mirrors; G, diffraction grating; PD, InGaAs photoelectric detector.

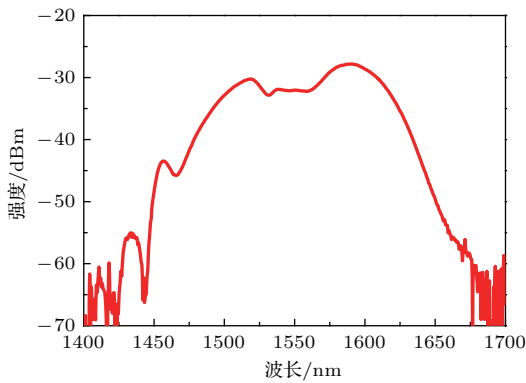


图2 掺Er光纤飞秒激光器输出的光谱曲线  
Fig. 2. Output spectrum from the Er-doped fiber femtosecond laser in log scale.

采用国产高非线性光纤作为光谱展宽器件, 其有效非线性系数为  $10.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 在 1550 nm 处的色散为  $-0.137 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 在 1550 m 处的色散斜率为  $0.0158 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ . 系统中采用的高非线性光纤长度为 40 cm. 高非线性光纤由于纤芯较细, 因此与普通单模光纤熔接时损耗较大. 为了减小熔接损耗, 我们通过优化放电次数和放电时间, 可将单个熔点损耗降低至 1 dB. 放大器输出激光经波片组合后进入高非线性光纤, 经高非线性光纤扩谱后功率为 185 mW. 通过优化波片组合, 可以实现不同范围的波长展宽, 光谱短波可以覆盖至 1  $\mu\text{m}$  波段, 如图 3 中红色曲线所示. 在两级放大系统中, 当一二级抽运源均未打开时, 高非线性光纤后的输出功率为 9 mW, 光谱如图 3 中黑色曲线所示, 当一

级抽运打开, 二级抽运关闭时, 高非线性光纤后的输出功率为 77.5 mW, 光谱如图 3 中蓝色曲线所示, 当二级抽运打开, 一级抽运关闭时, 高非线性光纤后的输出功率为 107.7 mW, 光谱如图 3 绿色所示. 在两级放大系统中二级放大器不仅效率高, 而且对扩谱的影响大.

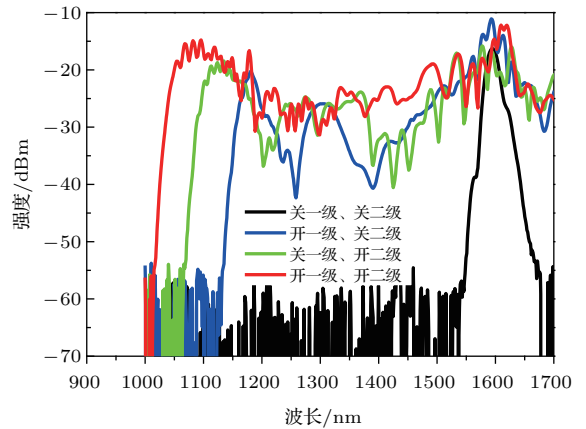


图3 (网刊彩色) 高非线性光纤获得的光谱展宽  
Fig. 3. (color online) Broadened spectra after the HNLF under different pump conditions of the amplifier. Red curve, the two pump sources were running simultaneously; blue curve, only the first-stage pump source was turned on; green curve, only the second-stage pump source was turned on; black curve, the two pump sources were both closed.

当其中一级放大器抽运电流固定在 1.5 A (对应抽运功率 800 mW) 时, 经过高非线性光纤获得的 900—1200 nm 范围内的光谱展宽随着另外一级抽

运功率的变化趋势如图4所示. 从图4中可以看出, 当二级抽运功率固定时, 经过高非线性光纤获得的光谱展宽随着一级抽运功率的变化存在着最佳值 0.9 A(对应抽运功率 473 mW), 此后光谱展宽量开

始减小. 而当一级抽运功率固定时, 经过高非线性光纤获得的光谱展宽随着二级抽运功率的增加而增加. 在最大抽运功率 800 mW 的条件下, 所获得的最佳光谱展宽如图3中红色曲线所示.

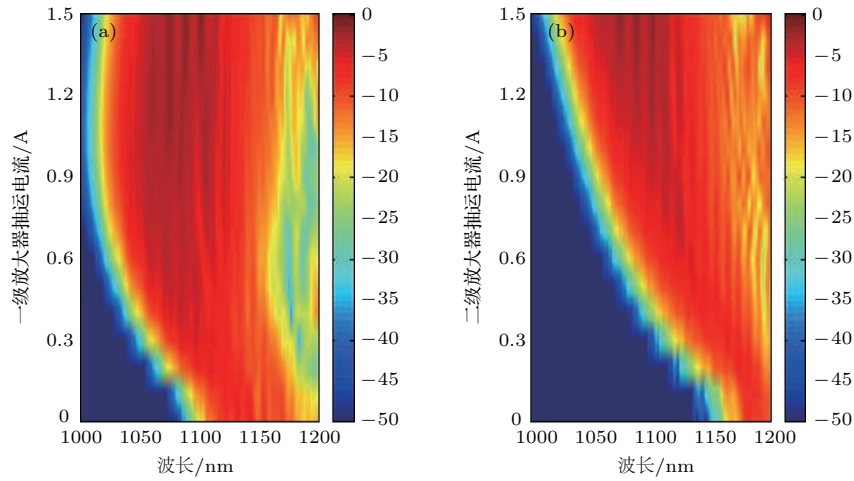


图4 (网刊彩色) 高非线性光纤获得的光谱展宽随抽运功率的演变 (a) 二级放大器抽运电流固定在 1.5 A; (b) 一级放大器抽运电流固定在 1.5 A

Fig. 4. (color online) Supercontinuum bandwidth versus pump current: (a) The pump current of the second-stage amplifier was set at 1.5 A; (b) the pump current of the first-stage amplifier was set at 1.5 A.

## 2.2 1 μm 光谱的增强

由于 1 μm 激光附近强度较低, 因此与碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 基频光拍频信号  $f_b$  的信噪比最高只有 30 dB, 处于计数器采数阈值附近. 为了进一步提高测量的准确性以及长时间测量的可靠性, 我们通过采用级联掺 Yb 增益光纤放大技术来增强高非线性光纤扩谱后 1064 nm 激光强度. 掺 Yb 增益光纤在 974 nm 处的吸收系数为 2750 dB/m(SCF-YB550-4/125-19, Coractive), 光纤长度为 15 cm, 采用后向抽运方式, 抽运功率最高为 780 mW. 扩谱后的激光通过掺 Yb 增益光纤后, 在无抽运功率的情况下, 透射功率为 27 mW. 随着抽运功率的增加, 经掺 Yb 增益光纤放大后的激光功率也逐渐增加, 如图5所示. 在最大抽运功率 780 mW 的激励下, 放大后输出功率为 376 mW.

光谱由于无法覆盖到 1 μm 波段, 因此即使打开掺 Yb 光纤放大器的抽运源, 1100 nm 以下部分仅仅为掺 Yb 光纤的荧光光谱. 由于 1100 nm 以上的光谱成分在掺 Yb 光纤中没有增益, 因此黑色曲线在 1100 nm 以上部分与红色曲线完全重合.

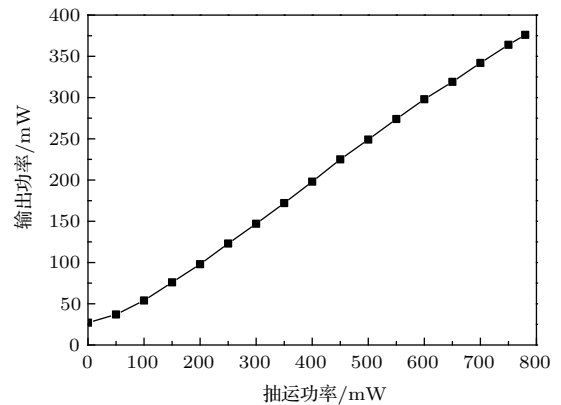


图5 光谱增强输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5. The output power of the Yb-doped fiber amplifier versus the pump power.

图6给出了高非线性光纤展宽后光谱经过掺 Yb 光纤放大器光谱增强前后对比图. 其中红色曲线为掺 Yb 光纤放大器抽运源关闭时的输出光谱, 黑色曲线为掺 Yb 光纤放大器抽运源抽运功率 780 mW 时的输出光谱. 从图6(a)—(c)中可以看出, 当掺 Er 光纤放大器的一级和二级抽运源均关闭或者只有一个关闭时, 经过高非线性光纤后的

当掺 Er 光纤放大器的一级和二级抽运源均打开时, 经过高非线性光纤后的光谱逐渐扩展到 1100 nm 波段以下并达到掺 Yb 光纤的增益谱线范围, 此时高非线性光纤扩谱后 1030 nm 附近的光谱成分在掺 Yb 光纤中产生增益放大, 图6中 1030 nm

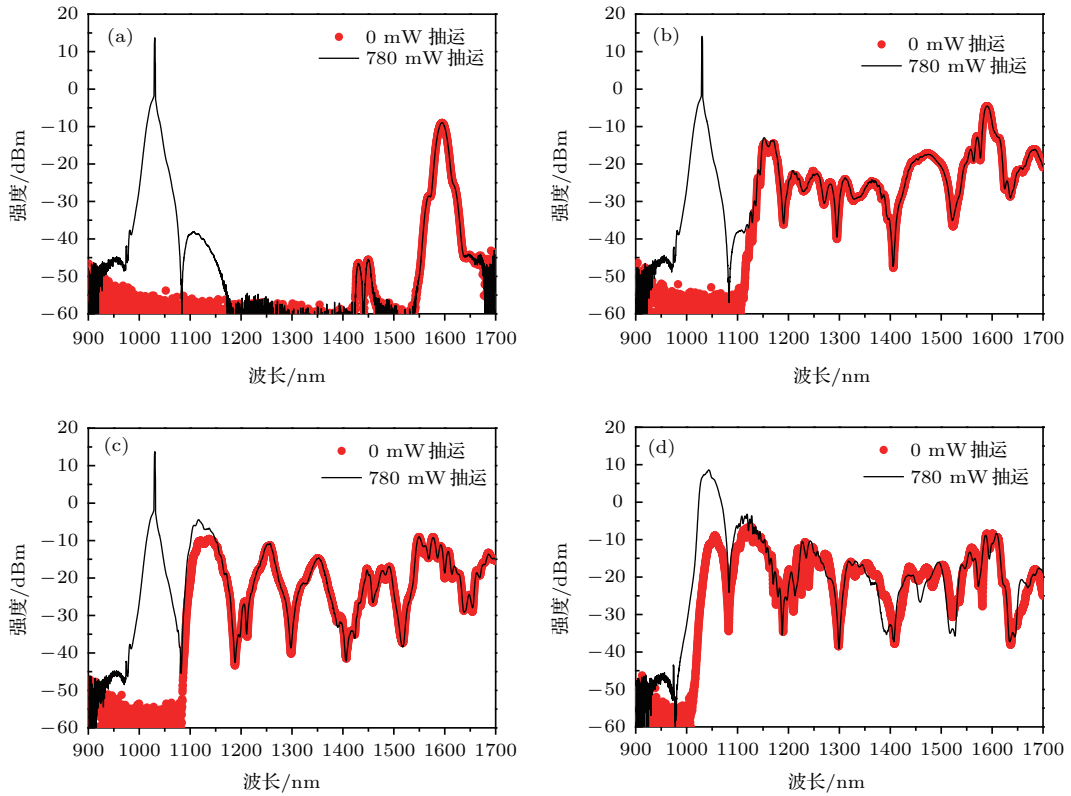


图6 (网刊彩色) 高非线性光纤展宽后光谱经过掺Yb光纤放大器光谱增强前后对比图 (a) 掺Er光纤放大器中两级放大器抽运源均关闭; (b) 掺Er光纤放大器中一级放大器抽运源关闭, 二级放大器抽运电流固定在1.5 A; (c) 掺Er光纤放大器中二级放大器抽运源关闭, 一级放大器抽运电流固定在1.5 A; (d) 掺Er光纤放大器中两级放大器抽运电流均固定在1.5 A

Fig. 6. (color online) Comparisons of optical spectra after cascading an Yb-doped fiber amplifier without spectral enhancement (red curve, the pump source of the Yb-doped fiber amplifier was closed) and with spectral enhancement (black curve, the pump power of the Yb-doped fiber amplifier was 780 mW): (a) The two pump sources of the two-stage Er-doped fiber amplifier were both closed; (b) the pump source of the first-stage amplifier was closed and the pump current of the second-stage amplifier was set at 1.5 A; (c) the pump source of the second-stage amplifier was closed and the pump current of the first-stage amplifier was set at 1.5 A; (d) the pump currents of the two pump sources were both set at 1.5 A.

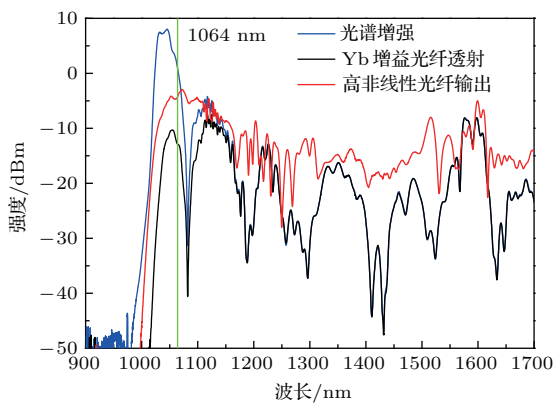


图7 (网刊彩色) 光谱增强前后输出光谱的对比图  
 Fig. 7. (color online) Comparison of spectra before and after spectral enhancement. Red curve, output spectrum after the HNLFF; black curve, output spectrum after the Yb-doped fiber amplifier without spectral enhancement; and blue curve, output spectrum after the Yb-doped fiber amplifier with spectral enhancement.

附近的尖峰消失, 转化为1030 nm激光输出. 从图6(d)中可以看出, 掺Yb光纤放大器抽运功率为780 mW时输出光谱在950—1150 nm之间的光谱强度明显高于掺Yb光纤放大器抽运源关闭时输出的光谱强度. 图7给出光谱增强前后输出光谱的对比图. 采用中心波长1064 nm, 带宽10 nm的窄带滤波器进行光谱滤波, 滤波后的输出功率为43 mW.

### 2.3 拍频信噪比的改善

经过高非线性光纤光谱展宽后的激光与经过掺Yb光纤光谱增强后的激光分别通过光纤传输至拍频模块, 图1中D部分. 碘稳频532 nm激光器输出的1064 nm基频光最高可达2 W. 将其中一小部分激光耦合进入光纤传递至拍频模块. 光纤后耦

合输出激光功率保持在 10 mW, 与光谱展宽后的激光进行拍频. 两束光分别经过准直器转换成空间光路, 再经过波片和 PBS 合束. 利用 1200/mm 的光栅 G(Thorlabs, GR13-1210) 将光谱成分在空间分开, 选取 1064 nm 待测激光的频率成分通过反射镜耦合进入 InGaAs 光电探测器 PD(APD110C/M, Thorlabs) 中, 探测拍频信号  $f_b$ . 经过仔细调节两路光的空间重合以及偏振状态, 在频谱仪 300 kHz 带宽分辨率的条件下获得 35 dB 的拍频信号, 如图 8 所示. 其中图 8 (a) 为 1  $\mu\text{m}$  光谱增强前, 即经过高非线性光纤光谱展宽后的激光与 1064 nm 激光的拍频信号, 图 8 (b) 为 1  $\mu\text{m}$  光谱增强后, 即经过高非线性光纤光谱展宽后再经过掺 Yb 光纤放大后的激光与 1064 nm 激光的拍频信号. 从图中可以看出, 拍频信号信噪比提高了 5 dB.

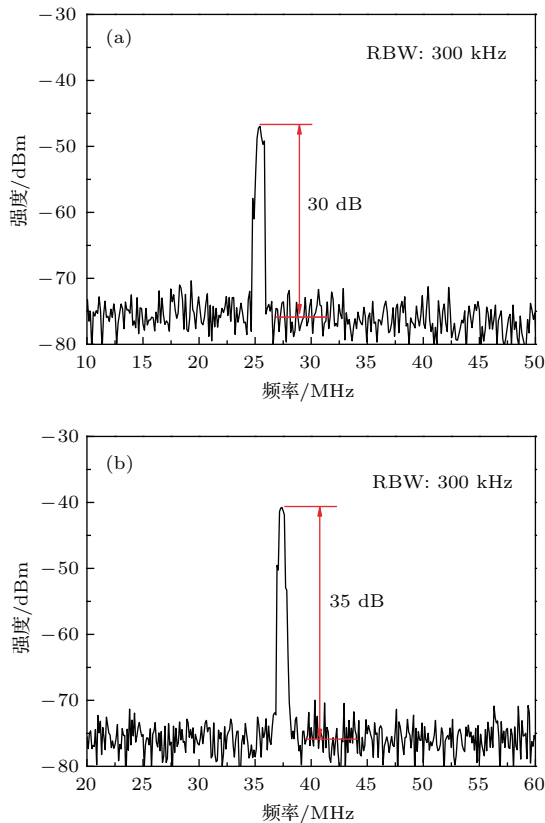


图 8 掺 Er 光纤光学频率梳与小型化碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器的拍频信号, 其中 RBW 为 300 kHz (a) 1  $\mu\text{m}$  光谱增强前与 1064 nm 激光的拍频信号; (b) 1  $\mu\text{m}$  光谱增强后与 1064 nm 激光的拍频信号

Fig. 8. The beat note between the comb light and an iodine-stabilized 532 nm laser at 300 kHz RBW: (a) The beat note between a 1  $\mu\text{m}$  laser without spectral enhancement and a 1064 nm laser; (b) the beat note between a 1  $\mu\text{m}$  laser with spectral enhancement and a 1064 nm laser.

经过掺 Yb 光纤光谱增强后, 虽然 1064 nm 光谱能量得到了较大的提高, 但由于放大过程中噪声的存在, 使得目前信噪比只提高了 5 dB. 此外, 掺 Yb 增益光纤的增益光谱的峰值处于 1030 nm, 而待测激光的波长 1064 nm 处于增益较低的位置, 也是导致 1064 nm 能量提高较小的原因. 但由于掺 Er 光纤光梳系统稳定度高, 特别是全光纤的放大扩谱结构, 使得扩谱后光谱非常稳定, 与外激光拍频信号信噪比保持恒定, 可以满足数天以上长时间的连续监测.

### 3 结 论

针对碘稳频 532 nm 激光绝对频率测量的特定需求, 以 532 nm 激光的基频光 1064 nm 的绝对频率测量为着眼点, 采用 303 MHz 重复频率的掺 Er 光纤光梳, 通过级联掺 Yb 增益光纤技术有效地提高了光纤光梳扩谱后 1  $\mu\text{m}$  波长附近激光的强度. 实验表明, 与未经过光谱增强的激光相比, 光谱增强后的激光与 1064 nm 拍频信号的信噪比提高了 5 dB, 保持在 35 dB 附近, 可以满足数天以上长时间的连续监测. 该技术有效地缓解了采用掺 Er 光纤光梳测量 1064 nm 激光绝对频率时对直接扩谱所获得的 1  $\mu\text{m}$  波长激光的强度要求.

### 参考文献

- [1] Ma L S, Zucco M, Picard S, Robertsson L, Windeler R S 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.* **9** 1066
- [2] Ma L S, Robertsson L, Picard S, Chartier J M, Karlsson H, Prieto E, Windeler R S 2003 *IEEE. Trans. Instrum. Meas.* **52** 232
- [3] Millo J, Boudot R, Lours M, Bourgeois P Y, Luiten A N, Coq Y L, Kersalé Y, Santarelli G 2009 *Opt. Lett.* **34** 3707
- [4] Peng J L, Ahn H, Shu R H, Chui H C, Nicholson J W 2007 *Appl. Phys. B* **86** 49
- [5] Klose A, Ycas G, Maser D L, Diddams S A 2014 *Opt. Express* **22** 28400
- [6] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jørgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [7] Liu H, Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094204 (in Chinese) [刘欢, 曹士英, 孟飞, 林百科, 方占军 2015 物理学报 **64** 094204]
- [8] Liu H, Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J 2015 *Laser Phys.* **25** 075105
- [9] Lea S N, Rowley W R C, Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Gill P, Chartier J M, Windeler R S 2003 *Metrologia* **40** 84

- [10] Eickhoff M L, Hall J L 1995 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **44** 155
- [11] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [12] Lin B K, Cao S Y, Zhao Y, Li Y, Wang Q, Lin Y G, Cao J P, Zang E J, Fang Z J, Li T C 2014 *Chinese J. Lasers* **41** 0902002 (in Chinese) [林百科, 曹士英, 赵阳, 李焯, 王强, 林弋戈, 曹建平, 臧二军, 方占军, 李天初 2014 中国激光 **41** 0902002]
- [13] Kharenko D S, Podivilov E V, Apolonski A A, Babin S A 2012 *Opt. Lett.* **37** 4104
- [14] Li C, Ma Y X, Gao X, Niu F Z, Jiang T X, Wang A M, Zhang Z G 2015 *Appl. Opt.* **54** 8350
- [15] Chen W, Song Y, Jung K, Hu M L, Wang C Y, Kim J 2016 *Opt. Express* **24** 1347
- [16] Xie C, Liu B W, Niu H L, Song Y J, Li Y, Hu M L, Zhang Y G, Shen W D, Liu X, Wang C Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 4149
- [17] Wang S J, Liu B W, Gu C L, Song Y J, Qian C, Hu M L, Chai L, Wang C Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 296
- [18] Ycas G, Osterman S, Diddams S A 2012 *Opt. Lett.* **37** 2199
- [19] Kieu K, Jones R J, Peyghambarian N 2010 *Opt. Express* **18** 21350
- [20] Kim Y, Kim Y J, Kim S, Kim S W 2009 *Opt. Express* **17** 18606
- [21] Alder F, Diddams S A 2012 *Opt. Lett.* **37** 1400
- [22] Klose A, Ycas G, Cruze F C, Maser D L, Diddams S A 2016 *Appl. Phys. B* **122** 77
- [23] Liu H, Gong M L, Cao S Y, Lin B K, Fang Z J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114210 (in Chinese) [刘欢, 巩马理, 曹士英, 林百科, 方占军 2015 物理学报 **64** 114210]



# Experimental study on increasing signal-to-noise ratio of a beat note by cascading an Yb-doped fiber in an Er-fiber comb\*

Liu Huan<sup>1)</sup> Cao Shi-Ying<sup>2)†</sup> Yu Yang<sup>1)</sup> Lin Bai-Ke<sup>2)</sup> Fang Zhan-Jun<sup>2)</sup>

1) (Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

( Received 2 July 2016; revised manuscript received 31 August 2016 )

## Abstract

The harmonic optical frequency chain is the only tool for measuring optical frequency till the advent of a femtosecond optical frequency comb (FOFC). However, its disadvantages are obvious, such as high cost, difficult construction, complex usage, and complicated maintenance. The emergence of femtosecond optical frequency combs (FOFCs) makes it possible to measure the absolute frequency of a laser, which greatly simplifies the quantity traceability of the absolute frequency value and comparison, and allows the length unit “m” to be directly traced back to the time unit “s”. The beat note ( $f_b$ ) between an FOFC and a test laser is one of the most important data in measuring absolute frequency of the test laser. In order to ensure the accuracy and reliability of the measurement, the signal-to-noise ratio (SNR) of  $f_b$  should be above 30 dB at 300 kHz resolution bandwidth. Among the wavelength standards recommended to replicate “meter” (SI), iodine-stabilized 633 nm lasers and iodine-stabilized 532 nm lasers have been widely used. Compared with iodine-stabilized 633 nm lasers, iodine-stabilized 532 nm lasers have the advantages of high stability, high output power, no modulation and fiber coupled output. Therefore, it is of great importance to measure and monitor the absolute frequency of an iodine-stabilized 532 nm laser. Aiming at the specific requirements for absolute frequency measurement of an iodine-stabilized 532 nm laser, the absolute frequency measurement of its fundamental 1064 nm laser has been studied. In this paper, a high-repetition-rate Er-doped femtosecond fiber laser is adopted as an optical source in the system. The repetition rate of the fiber laser is 303 MHz, the output power in the continuous-wave state is 130 mW and the average output power in the mode-locking state is 80 mW. The highest SNR of  $f_b$  between the comb light and a 1064 nm laser generated by an iodine-stabilized 532 nm laser is only 30 dB due to the low intensity at 1  $\mu$ m wavelength in the supercontinuum, which just reaches the SNR threshold meeting the counter’s working condition. In order to improve the accuracy and reliability of absolute frequency measurement, the technique of cascading an Yb-doped fiber amplifier after spectral broadening is adopted to enhance the spectral intensity at 1  $\mu$ m wavelength. The experimental results indicate that the SNR of  $f_b$  between a 1  $\mu$ m laser after spectral enhancement and a 1064 nm laser is increased by 5 dB and kept at 35 dB for several days, meeting requirements for long-term continuous monitoring. This method can effectively reduce the intensity requirements at 1  $\mu$ m wavelength when the spectrum is directly broadened in the Er-FOFC.

**Keywords:** Er-doped fiber femtosecond laser, spectral enhancement, beat note, fiber optical frequency comb

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.66.024206

\* Project supported by Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 20131089299) and the Special Scientific Research Foundation of General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (Grant No. 201310007).

† Corresponding author. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn