

基于光谱增强技术实现对 532 nm 波长激光频率标定*

赵瀚宇¹⁾ 曹士英^{2)3)†} 戴少阳²⁾³⁾ 杨涛²⁾³⁾ 左娅妮²⁾³⁾ 胡明列¹⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电子信息技术重点实验室, 天津 300072)

2) (中国计量科学研究院, 时间频率计量科学研究所, 北京 100029)

3) (中国计量科学研究院, 国家市场监管重点实验室(时间频率与重力计量基准), 北京 100029)

(2024 年 1 月 16 日收到; 2024 年 2 月 16 日收到修改稿)

碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器在复现长度单位“米(m)”、绝对重力测量、引力波探测、精密光谱学、长度计量等领域有着重要应用, 对其进行频率测量和标定对于激光器的性能评价具有重要意义. 本文采用自行研制的掺 Er 光纤光学频率梳作为光源, 对其扩谱后的 1 μm 波段进行光谱增强并结合倍频晶体将光学频率梳输出的 1.5 μm 波段光脉冲扩展到 532 nm 波段. 其中掺 Er 光纤光学频率梳输出功率 20 mW, 首先经过掺 Er 光纤放大器将功率提到 370 mW, 经过脉冲压缩后脉冲宽度为 45.7 fs, 此后经过高非线性光纤扩谱实现光谱覆盖至 1 μm , 输出功率为 180 mW. 扩谱后的 1 μm 波段激光经过掺 Yb 光纤放大器放大至 601 mW, 经过压缩后脉冲宽度为 84.6 fs, 压缩后功率为 420 mW. 采用 MgO:PPLN 晶体对压缩后激光进行倍频得到 155 mW 的 532 nm 激光, 倍频效率为 36%. 利用该系统分别对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器输出的基频光 1064 nm 和倍频光 532 nm 进行拍频, 获得了优于 40 dB 信噪比的拍频信号, 后续进行了超过 10 h 的连续测量, 测量结果与国际推荐值保持一致.

关键词: 光谱增强, 频率测量, 稳频激光, 光学频率梳

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

DOI: 10.7498/aps.73.20240106

1 引言

高性能激光频率标准在复现长度单位“米(m)”^[1]、绝对重力测量^[2-4]、引力波探测^[5-8]、频率计量^[9,10]等领域有着重要应用. 20 世纪 80 年代, 国际计量大会颁布了长度单位“m”的新的定义, 并随之推荐了若干条可以复现单位“m”的高精度激光频率标准谱线. 其中在长度计量领域应用最广泛的是碘在 633 nm 和 532 nm 处的跃迁谱线参考. 常用的碘稳频 633 nm He-Ne 激光器国际推荐值的不确定度为 2.1×10^{-11} , 同时输出光中具有 (6 ± 0.3) MHz

的调制频率^[11], 秒级频率稳定度最高为 1×10^{-11} . 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器具有 532 nm/1064 nm 双波长输出的优势, 国际推荐值的不确定度为 8.9×10^{-12} ^[12], 采用调制转移光谱技术进行频率锁定时, 输出光中无调制^[13].

近年来随着光刻机、集成电路制造、引力波探测、冷原子物理等领域的需求牵引, 对更高稳定度指标稳频激光的需求日益强烈. 碘稳频 633 nm 激光已无法满足高端需求, 急需进行技术升级和产品换代. 与碘稳频 633 nm He-Ne 激光器相比, 碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器具有的稳定性高、功率高、无调制、光纤输出等诸多优点^[13]而倍受关注.

* 国家自然科学基金(批准号: 61827821)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器在保持高性能指标的同时, 开始向工程化、小型化、智能化的方向发展以适应更多应用场景. 其中对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器输出激光的频率监测, 不仅可以直接反映激光器本身性能, 还有助于对激光器锁定过程中的参数优化.

作为测量激光绝对频率和稳定度的有效工具^[14], 飞秒光学频率梳, 简称“飞秒光梳”, 是一种由众多频率稳定并且间隔严格相等的光频梳齿组成的宽带光谱, 在时域上表现为一系列等间距的超短脉冲输出, 其本质上是脉冲重复频率 (f_r) 和载波包络偏移频率被 (f_0) 精确锁定的飞秒激光器. 飞秒光梳有两个基本参数: 重复频率和载波包络偏移频率. 只需获得 f_r 和 f_0 两个参数并将其通过相位锁定的方式溯源到微波频率, 则频域上第 N 个梳齿的频率 f_N 可以通过表示为 $f_N = Nf_r \pm f_0$. 此时, 对于任何频率的连续激光, 只要其频率位于飞秒光梳的光谱覆盖范围之内, 就可通过 (1) 式得到激光频率:

$$f_{\text{cw}} = Nf_r \pm f_0 \pm f_b, \quad (1)$$

其中 f_{cw} 是被测激光频率. 通过锁相环将 f_r 和 f_0 锁定到微波参考频率上, 两者均为微波参考频率设定值. f_b 为待测激光与飞秒光梳临近梳齿的拍频频率, 采用频率计数器进行测量. N 为飞秒光梳中与待测激光频率最接近梳齿的序数, 可以采用波长计、光谱仪、用吸收谱线参考频率进行确定, 也可以通过大范围调节重复频率来获取^[15].

20 世纪末, Udem 等^[16]首次使用超短脉冲测量了铯原子 D_1 谱线的绝对光学频率. 2000 年 Jones 等^[17]基于谱线展宽技术研制出了飞秒光梳装置. 早期的飞秒光梳主要是基于钛宝石飞秒激光器, 其中心波长在 780 nm 附近, 具有输出功率高、脉冲宽度窄等特点, 经过光子晶体光纤 (PCF) 耦合后可以很容易地实现一个倍频程 (500—1000 nm) 的光谱输出^[18]. 2002 年 Rovera 等^[19]利用 PCF 将钛宝石光学频率梳扩谱获得了 530—1064 nm 范围的光谱输出, 耦合效率为 50%, 此后将扩谱后的脉冲分为两路, 一路与碘稳频 Nd:YAG 激光器的基频光 1064 nm 拍频, 另一路与倍频光 532 nm 光进行拍频, 在 1064 nm 处的拍频信号信噪比为 30 dB, 用于对碘稳频激光进行频率测量. 2007 年, 方占军等^[20]利用钛宝石光学频率梳对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器进行频率测定, 利用 PCF 将光学

频率梳光谱扩展至 532 nm 波段, 并且得到了 30 dB 的拍频信号信噪比. 2015 年, Kobayashi 等^[21]采用掺 Er 光纤光梳, 对硬币大小的碘稳频激光器输出的基频光 1062 nm 进行拍频测量, 从而获得锁定后倍频光 531 nm 的绝对频率. 其中, 基频光 1062 nm 与光梳拍频信号信噪比约为 30 dB.

近年来, 随着光纤制造技术以及光纤通信技术的快速发展, 光纤飞秒激光器逐渐取代了钛宝石飞秒激光器成为光学频率梳的主力光源. 在众多掺杂稀土元素的光纤中, 掺 Er 光纤成本低且增益带宽为 1.5 μm 波段, 在单模光纤中损耗最小. 1.5 μm 的各种光学器件成本也较低, 使其相较于掺 Yb 和掺 Tm 光纤应用更加广泛. 掺 Er 光纤飞秒激光器不仅具有成本低、结构紧凑、灵活性高、稳定性高、易于集成化等显著优势, 而且输出的光脉冲可以很容易地扩谱至一个倍频程 (1100—2200 nm)^[22-24]. 2014 年, 刘欢等^[24]使用掺 Er 光纤飞秒激光器为光源, 经过双向抽运掺 Er 光纤放大器之后进入周期极化铌酸锂晶体 (PPLN) 倍频获得中心波长在 780 nm、功率为 170 mW 的脉冲, 将倍频后光脉冲耦合进 PCF 扩谱至 532 nm 波段与碘稳频 532 nm 激光器进行拍频, 获得了 30 dB 的信噪比输出.

采用钛宝石飞秒光学频率梳或经过放大-倍频后的掺 Er 光纤光梳结合 PCF 光谱展宽, 可以获得 500—1000 nm 的宽带光谱, 并实现对于碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器的频率测量. 但由于 PCF 纤芯较细, 加之空间耦合方案^[20,24], 会导致长时间测量时输出光谱不稳定, 引起拍频信号信噪比下降, 从而导致大量错误计数.

碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器具有 1064 nm 基频光输出, 因此长时间的测量通常采取测量基频光 1064 nm 的方式, 通过级联光谱技术可以提升掺 Er 光纤光梳扩谱后 1 μm 处的功率, 以保证基频光 1064 nm 的拍频信噪比^[25]. 但对于缺少基频光的其他类型 532 nm 激光器的测量则无法适用, 还需要在技术上解决飞秒光梳对 532 nm 激光的直接频率测量问题. 掺 Er 光纤光梳直接扩谱形成的 1 μm 波长点处功率较低, 直接提取此波长点功率进行倍频, 理论上可以实现 532 nm 激光输出, 但由于峰值功率低加之倍频效率低, 直接将扩谱后的 1064 nm 倍频到 532 nm 与激光拍频难度较大. 与其他基频光缺少合适的增益光纤不同, 1 μm 波段可以级联接入掺 Yb 光纤放大器, 通过对扩谱后

的 $1\ \mu\text{m}$ 波段光谱进行放大后再倍频, 从而提高光学频率梳在 $532\ \text{nm}$ 波长点的输出功率, 为后续拍频信噪比的改善提供条件.

基于此, 本文在掺 Er 光纤光梳的基础上, 通过对其中一路进行放大和光谱展宽实现光谱覆盖到 $1\ \mu\text{m}$, 此后级联掺 Yb 光纤放大器, 提升 $1\ \mu\text{m}$ 波段输出功率, 经过光栅对压缩后实现平均功率 $420\ \text{mW}$ 、脉冲宽度 $84.6\ \text{fs}$ 的激光输出, 进一步经过 PPLN 晶体倍频实现平均功率为 $155\ \text{mW}$ 的 $532\ \text{nm}$ 激光输出. 利用该装置分别对碘稳频 $532\ \text{nm}$ Nd:YAG 激光器输出的基频光 $1064\ \text{nm}$ 和倍频光 $532\ \text{nm}$ 进行拍频, 得到了信噪比优于 $40\ \text{dB}$ 的拍频信号, 后续进行了超过 $10\ \text{h}$ 的连续测量, 测量结果与国际推荐值保持一致.

2 实验装置

2.1 掺 Er 光纤光梳

基于光谱增强技术输出 $532\ \text{nm}$ 激光的掺 Er 光纤光梳测量装置主要包括 3 个部分, 如图 1 所示. 第 1 部分 (图 1 中 A 部分) 为掺 Er 光纤光梳的基本结构, 包括作为飞秒光梳种子光的基于非线性偏振旋转 (NPE) 锁模的掺 Er 光纤飞秒激光器; 第 2 部分 (图 1 中 B 部分) 为 $1.5\ \mu\text{m}$ 种子光的功率放大、脉冲压缩、 $1\ \mu\text{m}$ 波段的光谱展宽及 $1\ \mu\text{m}$ 波段放大; 第 3 部分 (图 1 中 C 部分) 为 $1\ \mu\text{m}$ 波段脉冲压缩、非线性倍频以及激光拍频.

掺 Er 光纤光梳的光源为 σ 腔结构的基于 NPE 锁模的掺 Er 光纤飞秒激光器, 采用 $980\ \text{nm}$ 半导体抽运光经过波分复用器件 (WDM) 耦合进光纤激光腔抽运掺 Er 增益光纤产生 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光. 在 σ 腔结构的激光器中, 将 σ 腔的一个端镜黏接在 PZT 上实现对重复频率的控制. 与通过 PZT 拉伸光纤的方式实现激光器重复频率控制的方式相比^[26], 此种方法避免了黏结在 PZT 的光纤可能出现塑性形变导致重复频率调节范围变小的风险, 而且 PZT 损坏后易于更换, 更有利于光梳的长期稳定运行和后期维护. 偏振分光片 (PBS1) 以及法拉第旋镜 (FR) 使从准直器 Col1 的光经反射镜 M1 反射后偏折耦合进准直 Col2 形成闭合回路. 通过调节三个波片改变腔内激光偏振状态实现 NPE 锁模后从 PBS2 输出, 经反射镜 M2 后耦合进 Col3 中. 从掺 Er 光纤飞秒激光器输出的激光经过 1:3 分束器

分成多路, 分别满足不同的需要. 其中两路用于探测飞秒光梳两个信号, 其他路可分别进行不同波长扩展, 实现不同覆盖范围的光谱输出.

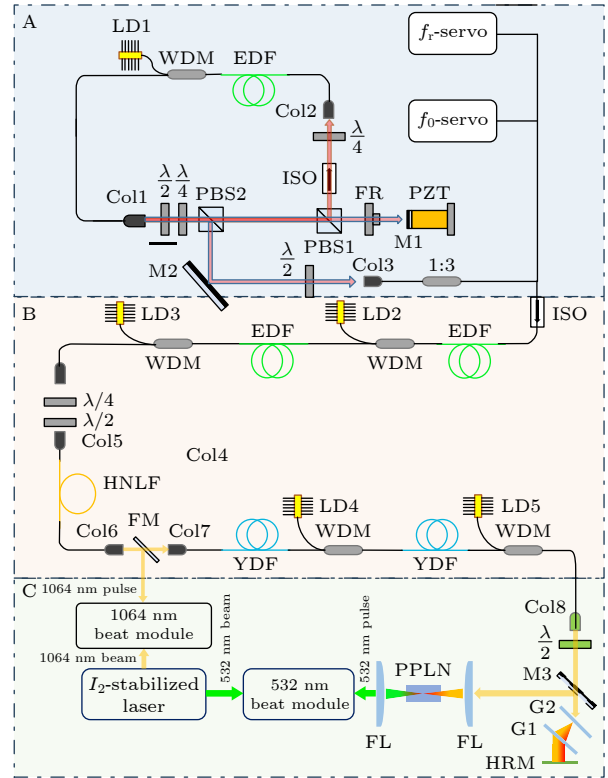


图 1 基于光谱增强技术输出 $532\ \text{nm}$ 激光的掺 Er 光纤光梳测量装置图 (其中, A 部分为掺 Er 光纤飞秒激光器, B 部分为掺 Er 光纤放大器、光谱展宽、掺 Yb 光纤放大器, C 部分为脉冲压缩器、非线性倍频及与激光拍频. LD1—5 为 $980\ \text{nm}$ 激光二极管, WDM 为波分复用器, 1:3 为分束器, EDF 为掺 Er 光纤, Col1—8 为准直器, M1—3 为反射镜, ISO 为隔离器, $\lambda/2$ 为半波片, $\lambda/4$ 为 $1/4$ 波片, FR 为法拉第旋光器, PZT 为压电陶瓷促动器, FM 为折叠镜, G1, G2 为光栅, PPLN 为周期极化铌酸锂晶体, FL 为聚焦透镜, HRM 为中空屋脊棱镜, Beat module 为拍频模块, f_r -servo 为重复频率伺服锁定系统, f_0 -servo 为载波包络偏移频率伺服锁定系统)

Fig. 1. Diagram of the frequency measurement of I_2 -stabilized Nd:YAG laser based on an Er-FOFC with the spectral enhancement technique. Part A is Er-doped fiber femto-second laser. Part B is EDFA, supercontinuum fiber, YDFA. Part C is pulse compressor, SHG module and beat frequency module. LD1–5 is a $980\ \text{nm}$ laser diode. WDM is a wavelength division multiplexer. 1:3 is a 1:3 beam splitter. EDF is an erbium-doped fiber. Col1–8 is a fiber collimator. M1–3 is a mirror, and ISO is an isolator. $\lambda/2$ is a half wave plate, $\lambda/4$ is a $1/4$ wave plate. FR is a Faraday rotator. PZT is a piezoelectric transducer. G1, G2 are gratings. PPLN is periodically polarized lithium niobate crystal. FL are spherical lenses. HRM is a hollow ridge prism, and beat module is a beat frequency module. f_r -servo is repetition frequency servo locking-loop. f_0 -servo is carrier envelope offset frequency servo locking-loop.

2.2 532 nm 激光的获取

从掺 Er 光纤光梳中分束后的一路激光进入后续放大和频率变换模块, 用于实现 532 nm 的激光输出. 首先采用 980 nm 半导体激光器 (LD2, LD3) 抽运掺 Er 光纤, 对飞秒激光器的种子光进行放大. 由于放大级的回光会影响振荡级的锁模稳定性, 所以在振荡级和放大级之间加入了隔离器 (ISO). 经过两级放大后通过单模光纤 (SMF-28) 以及调节 1/2 波片和 1/4 波片进行脉宽压缩. 压缩后的光耦合进高线性光纤 (HNLF) 进行扩谱至 1 μm . 经过可翻转折叠镜 (FM), 可选择实现 1 μm 波长输出, 用于与 1064 nm 激光拍频, 或者进入后续 1 μm 放大-倍频部分实现 532 nm 波长输出, 用于与 532 nm 激光拍频.

选择进入后续 1 μm 放大-倍频部分的激光, 首先进入掺 Yb 光纤放大器对扩谱后的种子光进行 1 μm 波段的放大, 其抽运源仍采用 980 nm 半导体抽运光 (LD4, LD5). 经两级放大后从 Col8 输出. 由于 1 μm 波段无法用光纤补偿放大器引入的正色散, 故在光脉冲从 Col8 输出经过 1 μm 波长的 1/2 波片后采用光栅对进行脉宽压缩, 1/2 波片的设置是为了调整光束偏振以达到最佳的衍射效率. 光栅对 (G1, G2) 选用刻痕为 1000/mm, 闪耀波长在 1 μm 的透射式闪耀光栅, 两个闪耀光栅厚度均为 1 mm. 光从 Col8 输出后经过光栅对后被中空屋脊棱镜 (HRM) 反射, 从略低于原来的位置反射, 按原光路再次经过光栅对, 完成脉冲压缩的过程. 压缩后的脉冲经反射镜 (M3) 反射经过焦距为 30 mm 的聚焦透镜 (FL) 聚焦到 PPLN 晶体倍频产生中心波长为 532 nm 的脉冲, 再经过焦距为 30 mm 的准直透镜 (FL) 后进入拍频模块.

2.3 激光拍频模块

激光拍频模块主要是将光学频率梳输出的激光和被测连续激光合束到光电探测器, 并利用频谱分析仪记录拍频信号的信噪比, 利用频率计数器记录拍频信号的频率. 掺 Er 光纤光梳与碘稳频激光器输出激光的拍频模块如图 2 所示.

对于 1064 nm 和 532 nm 激光的测量, 拍频模块除了器件对应波段不同之外其余完全相同. 两路激光在 PBS 合束之前, 分别经过各自 1/2 波片调整偏振状态后, 在经过偏振分光镜实现光路的空间重合. 为了降低光电探测过程的散粒噪声, 使用衍射光栅将不同频率成分的激光在空间上分离, 选择待测激光的波长滤波后进入光电探测器进行拍频信号测量.

3 实验结果

掺 Er 光纤飞秒光梳的核心部分——飞秒激光器, 采用 980 nm 激光二极管抽运. 激光二极管 LD1 输出 980 nm 激光通过 WDM 进入光纤激光器腔内抽运增益光纤 (Er110-4-125, LEIKKI), 其增益系数 110 dB/m, 群速度色散约为 +0.012 ps²/m. 在 1 W 的功率抽运下, 掺 Er 光纤激光器在未锁模运转状态下 PBS2 直接输出功率 130 mW. WDM 两端尾纤各保留 5.5 cm 和 8.5 cm, 两准直器尾纤分别为 17 cm 和 19 cm, 增益光纤为 37 cm, 两准直器间的光程为 17.5 cm. 锁模后激光器的重复频率为 200 MHz, PBS2 直接输出功率 70 mW, 经准直器 Col3 耦合后输出功率为 67 mW. 锁模后的光谱如图 3 所示, 其 3 dB 带宽为 79.5 nm.

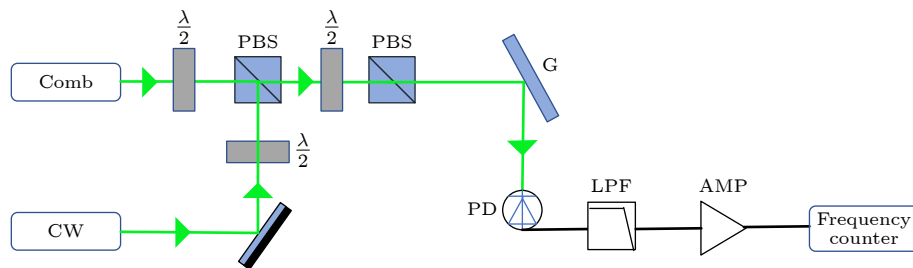


图 2 激光拍频模块图 (其中, Comb 为光学频率梳, CW 为待测连续光, $\lambda/2$ 为半波片, PBS 为偏振分光棱镜, G 为光栅, PD 为光电探测器, LPF 为低通滤波器, AMP 为信号放大器, Frequency counter 为微波频率计数器)

Fig. 2. Beat note module. Comb is an optical frequency comb, and CW is the continuous wavelength laser to be measured. $\lambda/2$ is a half wave plate. PBS is a polarizing beam splitter prism. PD is a photodetector. G is a grating. LPF is a low-pass filter. AMP is an optical amplifier. Frequency counter is a microwave frequency counter.

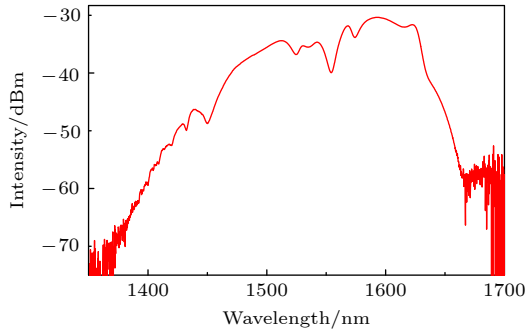


图3 掺 Er 光纤飞秒激光器输出光谱

Fig. 3. Spectrum of the Er-doped fiber femtosecond laser.

在重复频率和载波包络偏移频率探测的基础上,通过频率锁定技术^[26],可实现激光器重复频率和载波包络偏移频率超过 30 天的长时间连续锁定^[27].重复频率的锁定通过控制掺 Er 光纤飞秒激光器中的 PZT 实现, PZT 在 100 V 电压驱动下,调节范围为 1.8 kHz;载波包络偏移频率的锁定通过控制掺 Er 光纤飞秒激光器的抽运源——激光二极管 LD1 的驱动电流实现,其伺服带宽 30 kHz,对载波包络偏移频率的调谐曲线为 1 MHz/mA,调谐范围约为 60 MHz.过大的调谐范围会由于抽运电流变化引起激光器状态改变,进而导致 f_0 信噪比下降.锁定后重复频率的平均值为 200 MHz,标准偏差为 0.356 mHz.锁定后载波包络偏移频率的平均值为 20 MHz,标准偏差为 0.923 mHz.

从掺 Er 光纤光梳中飞秒激光器分束后的其中一路进入后续放大模块,用于实现 532 nm 的激光输出.飞秒激光脉冲通过一分三耦合器,耦合进 1550 nm 放大器的种子光约 20 mW.掺 Er 光纤放大器共两级放大,均采用后向抽运方式,980 nm 激光二极管 LD2 与 LD3 最大输出功率分别为 978 mW 与 961 mW.第一级放大器中增益光纤长度为 70 cm,在 978 mW 抽运下种子光功率可以放大到 200 mW.第二级放大中增益光纤长度为 60 cm,在 961 mW 抽运下种子光功率可以放大到 370 mW.

为了满足后续 1 μm 放大要求,需要尽可能地拓宽超连续光谱,而超连续光谱的拓展的关键在于脉冲的功率以及脉冲宽度.由于在两级掺 Er 光纤放大器中所用的增益光纤和 WDM 尾纤均为正色散,因此利用负色散的单模光纤 SMF-28 来补偿正色散所带来的光谱展宽.通过不断调整 WDM 尾纤以及 Col4 的尾纤长度,调节 1/2 波片和 1/4 波

片组,最终把脉宽可以压缩到了 45.7 fs.压缩后的强度自相关曲线如图 4 所示,脉冲形状符合双曲正割曲线.

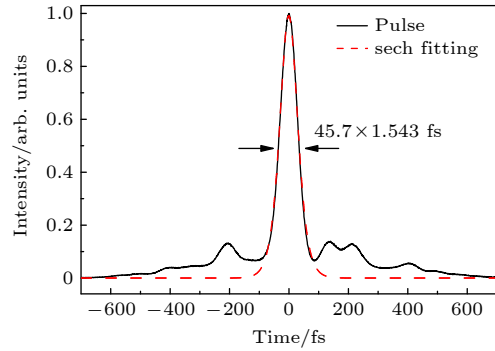


图4 种子光放大压缩后脉冲的自相关曲线

Fig. 4. Autocorrelation trace of the dechirped pulse after the Er-fiber amplifier.

压缩后的光脉冲通过 Col5 耦合进 HNLF 中,耦合后准直器 Col5 输出 359 mW,耦合效率约为 97%,选用的 HNLF 零色散点在 1550 nm 附近. HNLF 的扩谱效果不仅仅与脉宽有关,光束的偏振状态和长度也会影响扩谱的效果.通过调整 Col5 的尾纤长度以及 HNLF 长度以及旋转 1/2 波片和 1/4 波片组合达到最佳扩谱效果.经过优化后 Col5 的尾纤长度为 20 cm, HNLF 长度为 46 cm.展宽后的超连续光谱覆盖到了 1000 nm,如图 5 所示.扩谱后输出脉冲平均功率为 180 mW.

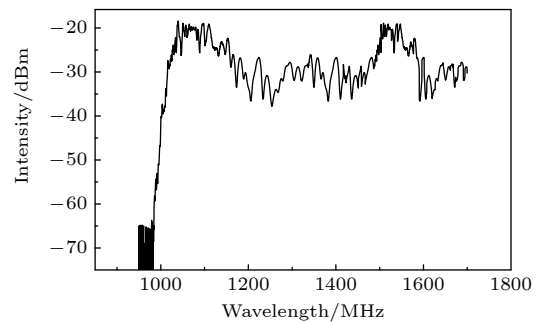


图5 经高非线性光纤扩谱后超连续光谱

Fig. 5. Supercontinuum spectrum after high nonlinear optical fiber.

扩谱后的光进入到掺 Yb 光纤放大器对其中的 1 μm 波段激光进行放大.掺 Yb 光纤放大器采用两级放大结构,均采用后向抽运方式.为了保护两级放大器抽运源 (LD4, LD5) 抽运,在 WDM 和抽运源之间加入了 980 nm 光隔离器. LD4 和 LD5 经过光隔离器后的最大输出功率分别为 900 mW

和 865 mW. 两级放大器采用的掺 Yb 增益光纤 (SCF-Yb550/125-19) 长度分别为 27 cm 和 23 cm. 经过第一级放大后, 脉冲的平均功率提到了 390 mW, 此后在经过第二级放大器后, 平均功率达到 601 mW. 经过两级掺 Yb 放大器后所获得的光谱如图 6(a) 所示, 从光谱图可以看出被放大的波段覆盖至 1064 nm, 达成了倍频至 532 nm 所需要的条件. 采用透射式闪耀光栅对进行 1 μm 的脉冲进行压缩, 闪耀光栅对光栅常数为 1000 线/mm, 入射角度约为 32° , 光栅对距离为 1.2 cm. 压缩后光脉冲平均功率为 420 mW, 压缩后脉宽 84.6 fs, 其强度自相关曲线如图 6(b) 所示, 脉冲形状符合双曲正割拟合.

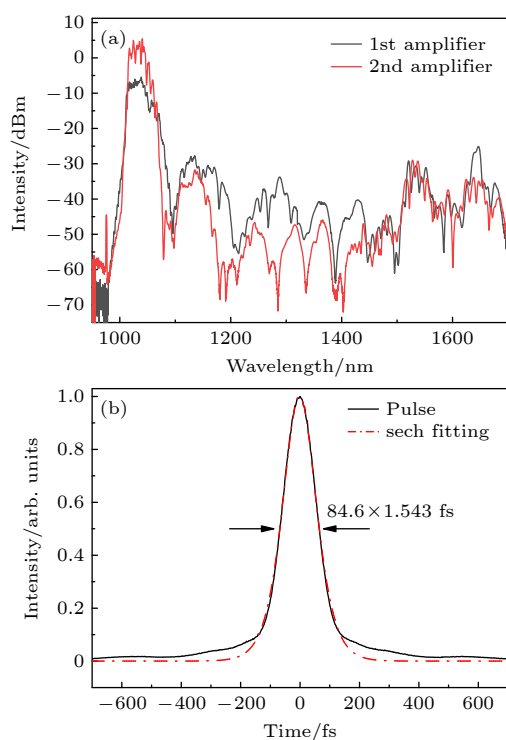


图 6 1 μm 波段激光放大及压缩后曲线 (a) 经掺 Yb 光纤放大后的光谱图; (b) 光栅对压缩后脉冲自相关曲线
Fig. 6. Spectra and autocorrelation traces the dechirped pulse after the Yb-fiber amplifier: (a) Spectra; (b) autocorrelation trace.

压缩后脉冲经反射镜进入 PPLN 晶体进行倍频. 系统中采用的 PPLN 晶体为多通道结构, 晶体周期 6.97 μm , 晶体通光截面尺寸为 0.5 mm $\times$ 1 mm. 为了提升倍频效率以获得尽可能高的 532 nm 脉冲功率, PPLN 通光长度为 10 mm, 晶体前后表面分别镀有对 1064 nm 和 532 nm 中心波长的宽带减反膜, 反射率小于 1%. 在 PPLN 上加装了温

控装置, 以调节倍频光的中心波长, 温控装置调节范围 20—95 $^\circ\text{C}$, 调节精度 0.01 $^\circ\text{C}$, 最终在温控装置设置温度 61.25 $^\circ\text{C}$ 时倍频光输出波长覆盖 532 nm, 如图 7 所示. 倍频脉冲平均功率 155 mW, 倍频效率约为 36%.

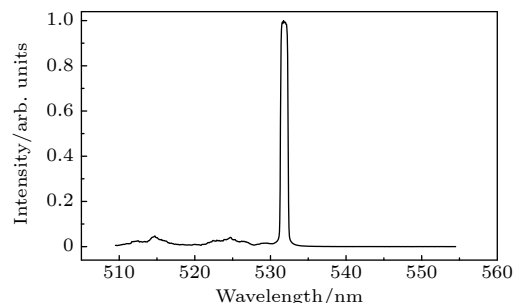


图 7 倍频后 532 nm 脉冲输出光谱
Fig. 7. Spectrum of 532 nm pulse output after frequency doubling.

将掺 Er 光纤光梳获得的 532 nm 激光与碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器的 532 nm 倍频光耦合进入拍频模块进行拍频, 经过系统优化在分辨率带宽 (RBW) 为 100 kHz 的条件下, 可以很容易实现 40 dB 信噪比的拍频信号, 如图 8(a) 所示. 与采用

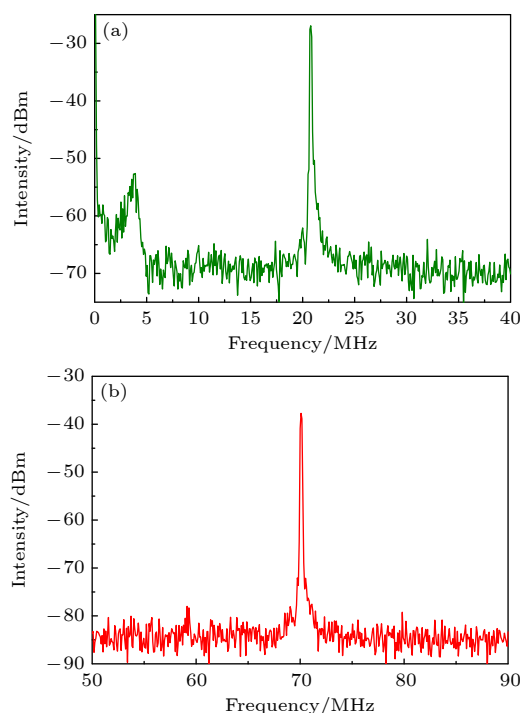


图 8 掺 Er 光纤光梳与碘稳频 532 nm 激光器拍频信号 (a) 与倍频光 532 nm 激光拍频信号; (b) 与基频光 1064 nm 激光拍频信号
Fig. 8. Beat note signal between the Er-FOFC and an I_2 -stabilized Nd:YAG laser: (a) Beat note signal at 532 nm; (b) beat note signal at 1064 nm.

将放大后种子光经 PPLN 倍频后耦合进 PCF 直接扩谱覆盖到 532 nm 波段进行拍频的结果相比^[24], 信噪比提升了 13 dB, 并且在几天的连续监测过程中未发现有信噪比下降的风险. 这说明采用本方案不仅可以获得高信噪比的拍频信号, 更重要的是可以形成信噪比非常稳定的拍频信号, 有利于后续对稳频激光器的长期的频率监测.

为了更有效地对比 532 nm 波段的频率测量结果, 在光梳光经 HNLF 后使用折叠镜分出一路脉冲, 与小型化碘稳频 532 nm 激光器的基频光 1064 nm 波段耦合进拍频装置进行拍频, 拍频信号如图 8(b) 所示, 在 RBW 为 100 kHz 条件下, 信噪比优于 40 dB.

4 激光测量结果

考虑到光学频率梳测量结果的可溯源性, 本系统以国家时间频率基准——激光冷却铯原子喷泉钟 (NIM5) 为信号, 通过其定期校准的 10 MHz 氢钟信号作为光学频率梳的参考信号, 也可以通过溯源到国际单位制 (SI) 秒定义的氢钟提供的 10 MHz 信号作为光学频率梳的参考信号. 前者形成独立自主的激光波长向国家时间频率基准的溯源, 后者实现激光波长向 SI 秒定义溯源, 均形成了激光波长与时间频率基准的连接. 氢钟输出 10 MHz 标准频率信号, 1 s 频率稳定度优于 1×10^{-13} , 氢钟到 SI 秒定义链路不确定度优于 5×10^{-16} .

碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的国际推荐频率值为 $(563260223513 \pm 5) \text{ kHz}$, 不确定度为 8.9×10^{-12} . 被测碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器是中国计量科学研究院自行研制的稳频激光标准. 激光器为半导体抽运 Nd:YAG 半非平面单块环形激光器, 倍频晶体为单次通过 PPKTP, 可输出 2 W 的 1064 nm 基频光和 100 mW 的 532 nm 倍频光. 为了验证测量结果, 采用分别测量基频光 1064 nm 和倍频光 532 nm 绝对频率的方式获得碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值.

在利用单次测量倍频光 532 nm 绝对频率的方式获得碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值时, 掺 Er 光纤光学频率梳重复频率 f_r 的锁定值为 199969.97 kHz, 载波包络偏移频率 f_0 的锁定值为 20000 kHz. 由于在测量倍频光 532 nm 绝对频率时, 采用的是光学频率梳基频光倍频的方式获

取 532 nm 波段输出, 所以在计算频率时载波包络偏移频率 f_0 的前面要乘以系数 2. 频率计数器记录拍频频率 f_b 的频率值, 采样时间为 1 s, 总测量时间约为 10 h, 有效点数 38067, 如图 9(a) 所示. 拍频频率 f_b 的平均值为 70265.271 kHz. 碘稳频 532 nm 激光中声光调制器移频 f_{AOM} 为 -40000 kHz. 由碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的国际推荐频率值估算的梳齿序数为 $N = 2816724$. 在判断 f_0 和 f_b 前符号的基础上, 通过记录 f_b 值, 利用 (1) 式可以得到待测激光的绝对频率. 此后, 去除待测激光中声光调制器移频后, 可以得到碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值为 563260223513 kHz, 测量相对扩展不确定度为 2.4×10^{-15} .

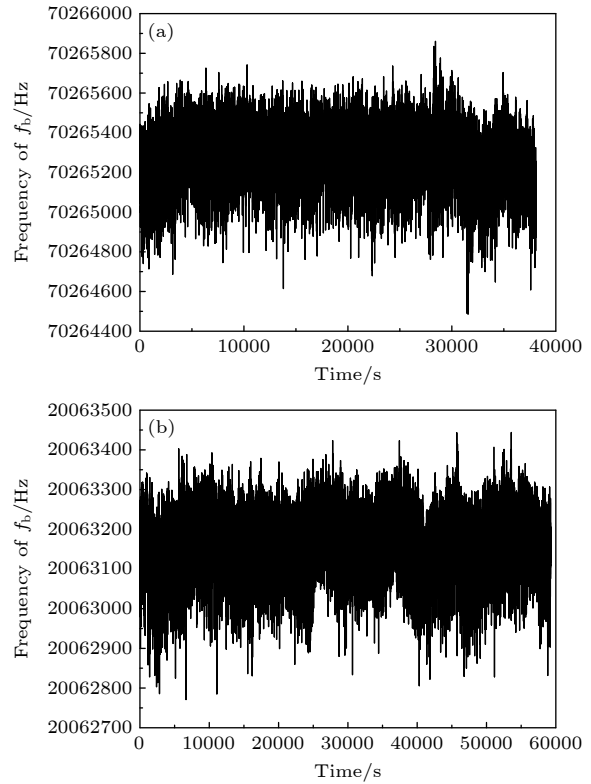


图 9 掺 Er 光纤光梳与碘稳频 532 nm 激光器拍频信号计数结果 (a) 与倍频光 532 nm 激光拍频信号计数结果; (b) 与基频光 1064 nm 激光拍频信号计数结果

Fig. 9. Beat note signal counting results between the Er-FOFC and an I_2 -stabilized Nd:YAG laser: (a) Beat note signal counting result at 532 nm; (b) beat note signal counting result at 1064 nm.

在利用单次测量基频光 1064 nm 绝对频率的方式获得碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值时, 掺 Er 光纤光学频率梳重复频率 f_r 的锁定值为 199969.9593 kHz, 载波包络偏移频率 f_0 的锁定值为 20000 kHz. 频率计数器记录拍频频率 f_b 的

频率值, 采样时间为 1 s, 总测量时间约为 16 h, 有效点数 59239, 如图 9(b) 所示. 拍频频率 f_b 的平均值为 20063.161 kHz. 碘稳频 532 nm 激光中声光调制器移频 -40000 kHz, 折合到基频光 1064 nm 移频为 -20000 kHz. 由碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的国际推荐频率值估算的梳齿序数为 $N = 1408362$. 在判断 f_0 和 f_b 前符号的基础上, 通过记录 f_b 值, 利用 (1) 式可以得到待测激光的绝对频率. 此后, 去除待测激光中声光调制器移频后, 可以得到碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值为 563260223513 kHz, 测量相对扩展不确定度为 1.9×10^{-15} .

从测量结果可以看出, 无论是采用对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器的基频光 1064 nm 还是倍频光 532 nm 的频率测量, 所得到的碘 $^{127}\text{I}_2$ 的 a_{10} 峰 R(56) 32-0 吸收线的频率值均在国际推荐值的不确定度范围之内. 两次测量结果的微小差异由于采用的是非同时测量引入, 从国际推荐值的不确定度范围考虑, 可以予以忽略.

5 总 结

本文主要介绍了掺 Er 光纤光学频率梳向 532 nm 波段的扩展的研究工作, 在自行搭建的掺 Er 光纤 NPE 锁模飞秒激光器引出一路做放大-压缩-扩谱-放大-压缩-倍频的光谱扩展方案, 完成了 1550 nm 波段的光梳光谱向 532 nm 波段的扩展, 1550 nm 波段放大后输出平均功率 370 mW, 扩谱后平均功率 180 mW, 再次经过 1 μm 波段放大后输出功率 601 mW, 经过光栅对压缩后功率 420 mW, 再经过 PPLN:MgO 光谱成功覆盖 532 nm 波段, 功率为 155 mW. 利用该系统分别对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器输出的基频光 1064 nm 和倍频光 532 nm 进行拍频, 均获得了优于 40 dB 信噪比的拍频信号, 后续进行了超过 10 h 的连续测量, 测量结果与国际推荐值保持一致.

对碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器进行频率标定, 不仅有助于对复现“m”的定义, 将长度单位“m”溯源至“s”, 也可以满足在自由落体型绝对重力仪系统中, 重力基准溯源体系下面的频率/长度标准溯源系统长度标准溯源装置的建设需求. 对于其他波段激光器如 515 nm, 也可用类似本文提出的方法获得高信噪比且稳定的拍频信号, 推进我国在光钟以及绝对重力探测领域的研究发展.

参考文献

- [1] Quinn T J 2003 *Metrologia* **40** 103
- [2] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, Hilt R, Klopping F 1995 *Metrologia* **32** 159
- [3] Qian J, Wang G, Wu K, Wang L J 2018 *Meas. Sci. Technol.* **29** 025005
- [4] Wang G, Hu H, Wu K, Wang L J 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 035001
- [5] Kolkowitz S, Pikovski I, Langellier N, Lukin M. D, Walsworth R L, Ye J 2016 *Phys. Rev. D* **94** 124043
- [6] Meylahn F, Knust N, Willke B 2022 *Phys. Rev. D* **105** 122004
- [7] Cai R G, Cao Z J, Guo Z K, Wang S J, Tao Yang 2017 *Nat. Rev. Phys.* **4** 687
- [8] Bailes M, Berger B K, Brady P R, et al. 2021 *Nat. Rev. Phys.* **3** 344
- [9] Hong F L, Ishikawa J, Sugiyama K, Onae A, Matsumoto H, Ye J, Hall J L 2003 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52** 240
- [10] Okhapkin M V, Skvortsov M N, Belkin A M, Kvashnin N L, Bagayev S N 2002 *Opt. Commun.* **203** 359
- [11] https://www.bipm.org/documents/20126/41549560/M-e-P_I2_633.pdf/c4c25f25-ae65-e05d-402a-9bfc84c715c3 [2024-1-16]
- [12] https://www.bipm.org/documents/20126/41549514/M-e-P_I2_532.pdf/16c7ddb8-4854-9f16-34cc-5bcebe299ce8 [2024-1-16]
- [13] Lin B K, Cao S Y, Zhao Y, Li Y, Wang Q, Lin Y, Cao J P, Zang E J, Fang Z J, Li T C 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 0902002 (in Chinese) [林百科, 曹士英, 赵阳, 李烨, 王强, 林弋戈, 曹建平, 臧二军, 方占军, 李天初 2014 中国激光 **41** 0902002]
- [14] Wu X J, Li Y, Wei H Y, Zhang J T 2012 *Laser Optoelectron. Prog.* **49** 030001 (in Chinese) [吴学健, 李岩, 尉昊赞, 张继涛 2012 激光与光电子学进展 **49** 030001]
- [15] Ma L S, Zucco M, Picard S, Robertsson L, Windeler R S 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1066
- [16] Udem T H, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [17] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stenz A, Windler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [18] Ranka J K, Windler R S, Stenz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [19] Rovera G D, Ducos F, Zondy J J, Acef O, Wallerand J P, Knight J C, Russell P St J 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 918
- [20] 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]
- [21] Kobayashi T, Akamatsu D, Hosaka K, et al. 2015 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, CA, USA, May 10-15, 2015 p1
- [22] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J, Li T C 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 231 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 林百科, 方占军, 李天初 2011 中国激光 **38** 231]
- [23] 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]
- [24] 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]
- [25] Liu H, Cao S Y, Yu Y, Lin B K, Lu W P, Fang Z J 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 105202
- [26] Wang S F, Wu T F, Cao S Y, Xia C Q, Han J B, Zhao C B 2017 *Metrolog. Meas. Technol.* **37** 8 (in Chinese) [王少峰, 武腾飞, 曹士英, 夏传青, 韩继博, 赵春播 2017 计量技术 **37** 8]
- [27] Cao S, Lin B, Yuan X, Fang Z 2021 *Opt. Commun.* **478** 126376

Realization of frequency calibration for 532 nm wavelength laser based on spectral enhancement technology*

Zhao Han-Yu¹⁾ Cao Shi-Ying^{2)3)†} Dai Shao-Yang²⁾³⁾Yang Tao²⁾³⁾ Zuo Ya-Ni²⁾³⁾ Hu Ming-Lie¹⁾

1) (*Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

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

3) (*Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*)

(Received 16 January 2024; revised manuscript received 16 February 2024)

Abstract

The iodine frequency stabilized 532 nm Nd:YAG laser plays an important role in realizing the reproduction unit of length “meter (m)”, absolute gravity measurement, gravitational waves detection, precision spectroscopy, distance metrology, etc. Absolute frequency measurement and calibration of the laser are of great significance for evaluating the performance of laser. The previous method of extending the erbium-doped fiber optical frequency comb (Er-FOFC) to the wavelength of 532 nm was to first amplify the seed light, then realize frequency-doubled with a periodic polarization lithium niobate crystal, and finally couple it into a photonic crystal fiber to expand the spectrum to the 532 nm band. With such a technique, the a signal-to-noise ratio (SNR) of the beat signal between the iodine-stabilized 532 nm Nd:YAG laser and the Er-FOFC was approximately 30 dB. Moreover, the SNR of the beat signal was unstable, resulting in the errors in frequency measurement with a counter. This is not conducive to the long-term frequency measurement of the iodine-stabilized 532 nm Nd:YAG laser. Therefore, a method that can obtain both high SNR and long-term stable beat signals is required. In this paper, an Er-FOFC is developed. The spectral enhancement of its broadening at 1 μm is carried out, and then expanded to the wavelength at 532 nm by using a frequency-doubling crystal. The output power of the Er-FOFC is 20 mW, which is first amplified to 370 mW by an Er-fiber amplifier and then compressed to a pulse width of 45.7 fs. Subsequently, the spectrum is extended to cover the wavelength at 1 μm with a highly nonlinear fiber, resulting in an output power of 180 mW. The broadened spectrum at 1 μm is amplified to 601 mW by a Yb-fiber amplifier, and the compressed power increases to 420 mW. Using an MgO:PPLN crystal, the compressed laser is frequency-doubled to produce a 532 nm laser output with 155 mW power and a doubling efficiency of 36%. Utilizing this system, the absolute frequency measurements are conducted on the fundamental frequency light at 1064 nm and the doubled frequency light at 532 nm from the iodine-stabilized 532 nm Nd:YAG laser, yielding a beat signal with an SNR of greater than 40 dB. This SNR represents a 13 dB improvement compared with the result obtained when an amplified seed light is frequency-doubled by using PPLN and then coupled into a PCF for direct spectral broadening to cover the 532 nm band. Over several days of continuous monitoring, there is no observed risk of SNR degradation. Moreover, subsequent frequency measurements are carried out continuously for over several hours, with the results maintaining consistency with recommended values.

Keywords: spectral enhancement, frequency measurement, stabilized laser, optical frequency comb

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

DOI: 10.7498/aps.73.20240106

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61827821).

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

基于光谱增强技术实现对532 nm波长激光频率标定

赵瀚宇 曹士英 戴少阳 杨涛 左娅妮 胡明列

Realization of frequency calibration for 532 nm wavelength laser based on spectral enhancement technology

Zhao Han-Yu Cao Shi-Ying Dai Shao-Yang Yang Tao Zuo Ya-Ni Hu Ming-Lie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 094204 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240106

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240106>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

物理学报. 2021, 70(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

光频链接的双光梳气体吸收光谱测量

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement

物理学报. 2018, 67(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180150>

重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距

Absolute distance measurement using cross correlation interferometer with a repetition rate multiplication frequency comb

物理学报. 2022, 71(9): 090602 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073>

极紫外飞秒光学频率梳的产生与研究进展

Generation and research progress of femtosecond optical frequency combs in extreme ultraviolet

物理学报. 2020, 69(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200851>

光频梳频域干涉测距主要参数分析及一种改进的数据处理方法

Analysis of main parameters of spectral interferometry ranging using optical frequency comb and an improved data processing method

物理学报. 2019, 68(19): 190602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190836>

一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法

Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb

物理学报. 2020, 69(9): 090601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200081>