

用于光腔衰荡光谱测量的多支路掺铒光纤飞秒光梳系统

饶冰洁 张攀 李铭坤 杨西光 闫露露 陈鑫 张首刚 张颜艳 姜海峰

Multi-branch erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb for measurement of cavity ring-down spectroscopy

Rao Bing-Jie Zhang Pan Li Ming-Kun Yang Xi-Guang Yan Lu-Lu Chen Xin Zhang Shou-Gang
Zhang Yan-Yan Jiang Hai-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 084203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212162

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212162>

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

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>

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳

Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser

物理学报. 2018, 67(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172503>

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

基于高精度光腔锁频激光的分子吸收光谱测量

Measurement of molecular absorption spectrum with a laser locked on a high-finesse cavity

物理学报. 2018, 67(10): 104206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172532>

掺Er光纤飞秒激光器中电光晶体对激光器参数的影响

Influence of electro-optic modulator on Er-doped fiber femtosecond laser

物理学报. 2021, 70(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201564>

基于光纤中超短脉冲非线性传输机理与特定光谱选择技术的多波长飞秒激光的产生

Generation of multi-wavelength femtosecond laser pulse based on nonlinear propagation of high peak power ultrashort laser pulse in single-mode fiber and spectral selectivity technology

物理学报. 2018, 67(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181026>

用于光腔衰荡光谱测量的多支路 掺铒光纤飞秒光梳系统*

饶冰洁¹⁾ 张攀¹⁾²⁾ 李铭坤¹⁾²⁾ 杨西光¹⁾²⁾ 闫露露¹⁾
陈鑫¹⁾ 张首刚¹⁾²⁾ 张颜艳^{1)†} 姜海峰^{1)2)3)‡}

1) (中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学技术大学量子物理与量子信息研究部, 上海 201315)

(2021 年 11 月 24 日收到; 2021 年 12 月 17 日收到修改稿)

报道了用于光腔衰荡光谱测量的多支路掺铒光纤飞秒光梳系统. 该系统以“9”字型全保偏掺铒飞秒光纤激光器为激光源. 利用自制的锁相环电路, 获得的重复频率和载波包络相移频率秒级稳定度分别为 5.85×10^{-13} 和 4.95×10^{-18} . 为了满足 CO, CH₄ 等分子吸收光谱测量, 利用啁啾放大和非线性光谱展宽技术, 采用多支路结构, 将飞秒光梳直接输出光谱由 1500—1600 nm 分别扩展至 8 个目标波长 (1064, 1083, 1240, 1380, 1500, 1600, 1750 和 2100 nm) 处, 各目标波长处的单模功率均大于 300 nW, 满足光腔衰荡光谱测量实验的需求.

关键词: 掺铒光纤飞秒光梳, 锁模激光器, 光谱扩展, 光谱测量

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

DOI: 10.7498/aps.71.20212162

1 引言

飞秒光梳又称光学频率综合器, 可以直接对光学频率进行测量, 它的出现推动了光频测量和精密光谱学等领域的迅猛发展^[1–3]. 飞秒光梳 (简称光梳) 概念的提出可以追溯至 1978 年, Hänsch 等^[4]将脉冲锁模激光器应用于测量钠原子的跃迁谱线, 但受限于当时激光器的性能, 并未获得高精度测量结果. 最初的光梳主要基于钛宝石激光器, 它具有宽光谱, 低相位噪声, 高重复频率等优良特性, 成为国内外研究组应用的首要选择^[5–7]. 然而, 钛宝石光梳同样存在一些不足, 如体积较大, 不易连续

长期运行, 并且, 搭建和维护费用较高. 20 世纪以来, 受益于超短脉冲激光器发展的逐渐成熟及非线性光谱展宽技术的发明, 基于不同锁模机制的光纤光梳受到广泛关注和研究^[8–12]. 光纤光梳具有体积小、成本低等优点, 可以实现光梳系统小型化和集成化, 同时, 选择不同掺杂类型的增益光纤, 光纤光梳的直接输出光谱可以覆盖不同波段, 逐渐成为高精度测量领域应用的宠儿^[13–18].

分子光谱是研究分子内部结构以及分子间相互作用的重要途径. 光腔衰荡光谱技术 (cavity ring-down spectroscopy, CRDS) 是测量分子吸收光谱常见的技术之一, 1988 年由 O’keefe 和 Deason 提出^[19]. 其基本原理是以脉冲激光为光源, 通过光腔

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFA0309801)、中科院战略先导 B 类 (批准号: XDB35030101) 和陕西省自然科学基金研究计划 (批准号: 202-JQ-434) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyanyan@ntsc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: hjiang1@ustc.edu.cn

衰荡时间与分子吸收系数之间的关系测量分子吸收谱线,进而选择合适的光谱线型加以分析,获得高精度的光谱参数. CRDS 具有高探测灵敏度、高分辨率、高信噪比等优点,在探测相关分子谱线结构,确定基本物理常数(里德伯常数,精细结构常数以及玻尔兹曼常数等)等方面都有重要作用^[20–23]. 通常,将衰荡光腔腔长锁定在稳定的参考激光上,由于腔长的稳定性取决于参考激光的稳定性,从而限制了测量精确度;或将探测激光相位锁定在稳定的外部参考源如超稳腔或光梳上,能够实现亚 MHz 量级的光谱扫描精度^[24–28]. 为了提高测量精度,中国科学技术大学利用锁相技术,将探测激光和精确控温的衰荡光腔腔长同时锁定在光梳上,获得了精度为 0.5 kHz 的 CO 分子饱和吸收光谱频率^[29]. 同样,利用上述技术也可以实现光谱学研究中常见的多个分子吸收光谱测量,如 H₂O 及 N₂O 分子等,在基础研究和痕量气体的探测等领域都具有重要意义^[30–32].

在进行 CRDS 测量时,光梳需要满足两个必要条件:一是光梳的频率稳定度满足 CRDS 百赫兹的测量精度需求;二是光梳输出光谱覆盖待测分子吸收光谱,且具有较高的单模功率(>100 nW). 本文介绍用于 CRDS 的掺铒光纤飞秒光梳系统,该系统以自主研发的全保偏掺铒光纤飞秒激光器为源,通过优化参数,激光器具有“即插即用”的功能;采用电光调制晶体(electronic optical modulator, EOM)与压电陶瓷驱动器(piezoelectric ceramic transducer, PZT)等频率控制器,实现光梳系统的长期稳定运行. 采用多支路结构,利用啁啾放大和高非线性光谱展宽技术,分别得到了单模功率均大于 300 nW 的 8 路光谱扩展应用,覆盖了光谱学研究中多个常见的分子吸收谱线.

2 实验系统及结果讨论

光梳任意梳齿的频率可以表示为^[23]

$$f_n = N \times f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}, \quad (1)$$

其中, N 为光梳相应梳齿的序数, f_{rep} 表示光梳的重复频率, f_{ceo} 表示光梳的载波包络相移频率. 利用锁相环技术,将这两个频率锁定到稳定的参考频率上,就可以获得稳定输出的任意梳齿频率.

用于 CRDS 的光梳系统由掺铒光纤飞秒激光源、频率探测及控制和光谱扩展三部分组成,系统

结构如图 1 所示. 左半部分为飞秒激光源的结构示意图,右半部分为光梳光谱扩展单元示意图,频率探测及控制如图 1 下半部分所示. 飞秒激光源经波分复用器输出被分为两路,一路用于探测光梳 f_{rep} 和 f_{ceo} ,另一路用于 8 路光谱扩展. 光谱扩展单元将光梳的光谱扩展到待测分子吸收谱线处,用于实现以外参考频率为标准的 CRDS.

2.1 飞秒激光源

本系统采用基于非线性光纤放大环型镜(nonlinear amplifying loop mirror, NALM)锁模机制的“9”字型激光器作为飞秒激光源,它由光纤环路和自由空间直线臂组成. 光纤环路中所有光纤和器件均采用保偏结构,可极大提高系统鲁棒性. 自由空间光路包括非互易相移器(由法拉第旋光器和 1/8 波片组成),以及用于频率控制的 EOM 和 PZT. 其中,非互易相移器增大了光纤环路中相向传输激光脉冲的相位差,有效降低了激光器的锁模阈值,从而可以实现激光器自启动锁模. EOM 用于高带宽控制光梳 f_{rep} , PZT 用于大范围控制 f_{rep} . 整个系统光纤长度约 90 cm,自由空间长度约 20 cm,考虑所有元器件色散,光学腔的净色散量约为 4000 fs².

在泵浦功率 650 mW 抽运时,飞秒激光源可以获得稳定的锁模激光输出,此时,波分复用器 TAP 端输出功率为 16 mW,输出光谱如图 2(a)所示,输出光谱中心波长为 1554 nm,半高全宽约为 44 nm,重复频率为 204.5 MHz. 图 2(b)为飞秒激光源输出脉冲的强度自相关曲线. 可以看出,激光源输出为单脉冲激光,按照双曲正割型脉冲形状计算,脉冲宽度为 55 fs.

2.2 光梳频率探测和控制

利用光电探测器(photodetector, PD)直接探测飞秒激光源输出脉冲的重复频率可以实现 f_{rep} 的探测,而 f_{ceo} 一般通过 $f/2f$ 自参考技术得到. 自参考技术要求光梳光谱分布包含一个倍频程,然后提取低频成分将其倍频后与高频成分拍频得到 f_{ceo} . 一般的光纤激光源直接输出光谱范围较窄,无法满足倍频程要求,需要先利用高非线性光纤(highly nonlinear fiber, HNLF)对飞秒激光进行光谱展宽. 如图 1 频率探测及控制单元部分实线所示,波分复用器 TAP 端输出光经光纤耦合器分光后用于倍频程光谱的产生. 输出脉冲首先经普通单

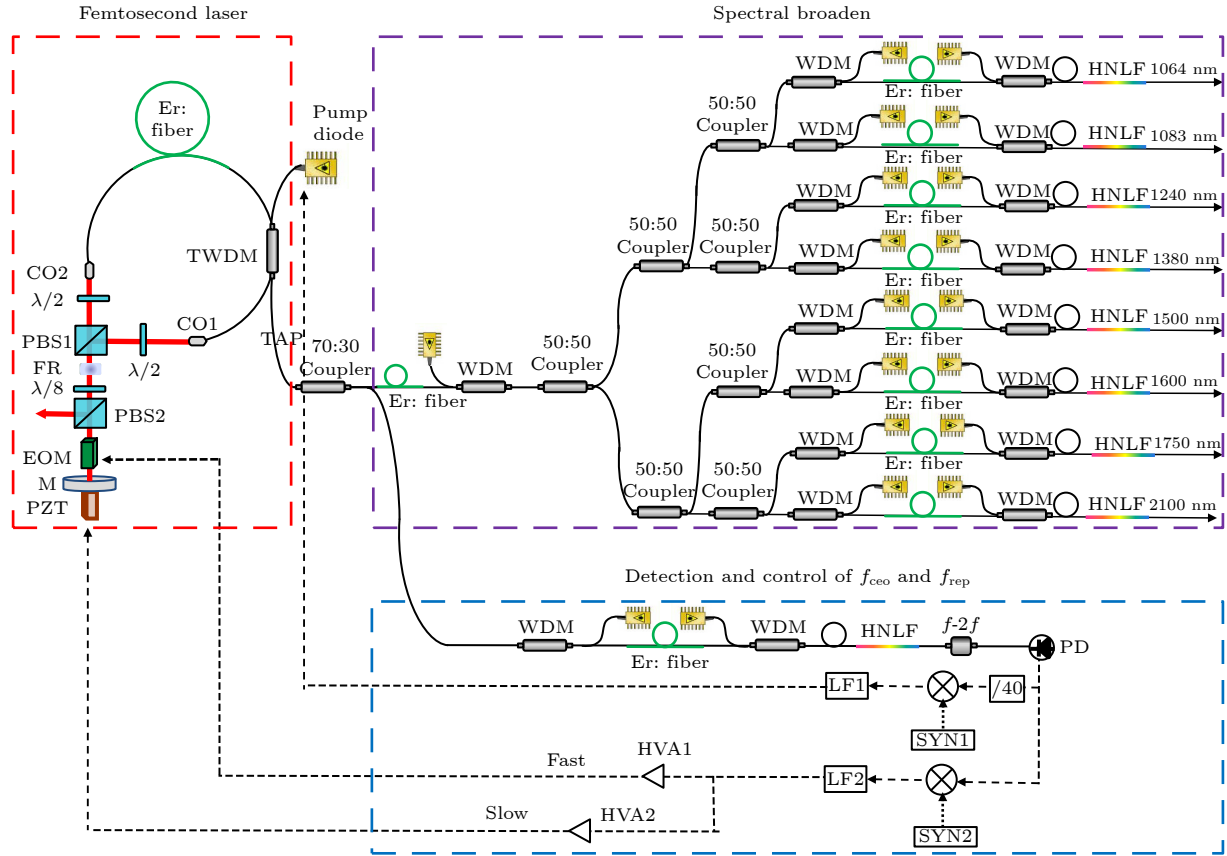


图 1 多支路掺铒光纤飞秒光梳结构示意图, CO 为准直器; $\lambda/2$, $\lambda/8$ 为 $1/2$ 和 $1/8$ 波片; FR 为法拉第旋光器; PBS 为偏振分光棱镜; EOM 为电光晶体调制器; PZT 为压电陶瓷; TWDM 为反射式波分复用器; M 为反射镜; HNLF 为高非线性光纤; Coupler 为光纤耦合器; PD 为光电探测器; WDM 为带隔离器的波分复用器; SYN 为频率综合器; LF 为环路滤波器; HVA 为高压放大器

Fig. 1. Multi-branch Er:fiber based femtosecond optical comb system. CO, collimator; $\lambda/2$, $1/2$ waveplate; $\lambda/8$, $1/8$ waveplate; FR, faraday rotator; PBS, polarization beam splitter; EOM, electronic optical modulator; PZT, piezoelectric ceramic transducer; M, mirror; HNLF, highly nonlinear fiber; PD, photodetector; WDM, wavelength division multiplexer; SYN, synthesizer; LF, loop filter; HVA, high voltage amplifier.

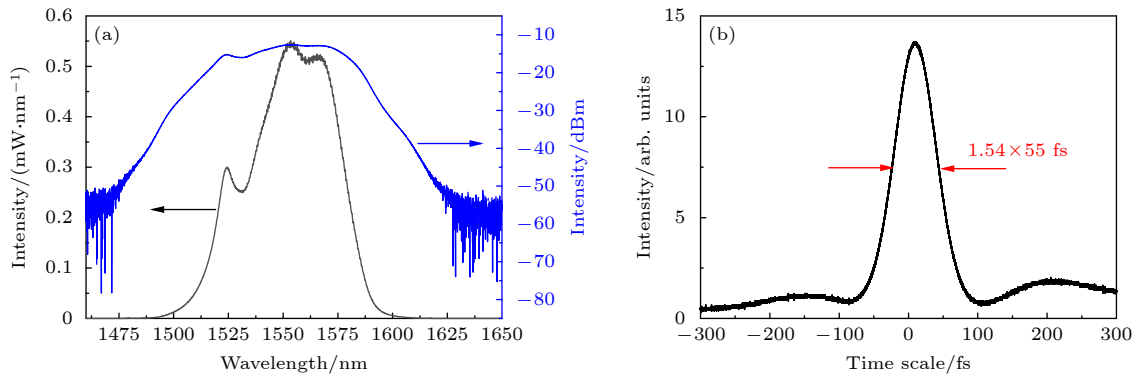


图 2 飞秒激光源输出特性 (a) 输出光谱; (b) 强度自相关曲线

Fig. 2. Output parameter of femtosecond laser: (a) Measured spectrum; (b) autocorrelation curve of output pulse.

模光纤 PM1550 对脉冲进行预啁啾管理, 使脉冲在时域上展宽, 以降低激光脉冲的峰值功率, 减小脉冲放大过程中产生的非线性相移引起的脉冲分裂. 经展宽后的脉冲输入到掺铒光纤放大器中. 该放大器为双向泵浦输入的方式, 泵浦光采用两支最大功

率为 850 mW、中心波长为 976 nm 的激光管, 经波分复用器进入掺铒光纤中, 可以有效提高放大功率. 经过光纤放大后输出的高功率脉冲光输入到普通单模光纤 PM1550 中, 进行压缩处理, 同时将增益光纤引入的正啁啾去除. 经过压缩后的脉冲信号

输入到 HNLF 中, 最终获得包含一个倍频程的超连续光谱.

f_{rep} 和 f_{ceo} 的锁定由图 1 下虚线框图所示. f_{rep} 的锁定通过外加电压到 PZT 和 EOM 上改变飞秒激光源的光学腔长来实现. 由 PD 输出的信号滤波后得到 f_{rep} , 与同频率的参考信号源混频得到误差信号, 最后将得到的误差信号反馈到 PZT 和 EOM 的高压放大器上实现 f_{rep} 的锁定. f_{ceo} 的锁定通过控制飞秒激光源的泵浦电流实现. PD 输出信号经中心频率为 270 MHz (带宽 10 MHz) 的带通滤波器滤波得到 f_{ceo} 信号后, 将 f_{ceo} 信号经 40 分频后与同频率参考信号源混频得到误差信号, 通过环路滤波器反馈控制飞秒激光源的泵浦电流, 从而实现 f_{ceo} 的锁定.

图 3(a) 为获得的倍频程光谱, 在 1050, 2100 nm 处的光功率分别为 0.59 和 0.17 mW/nm. 图 3(b) 为得到的 f_{ceo} 信号, 在分辨率带宽 (resolution bandwidth, RBW) 为 300 kHz 时, 其信噪比约为 35 dB. 图 3(c) 为系统锁定后 f_{ceo} 分频的输出频谱, 可以看出, 增益峰出现在 50 kHz 附近, 即 f_{ceo} 的锁定带宽约为 50 kHz (RBW = 300 Hz). 图 3(d) 给出了系

统锁定后两个频率分量 f_{ceo} 和 f_{rep} 的环内频率稳定度, f_{ceo} 频率稳定度为 $4.95 \times 10^{-18}/\tau^{1/2}$, f_{rep} 频率稳定度为 $5.85 \times 10^{-13}/\tau$. 环内稳定度优于基准频率信号, 满足 CRDS 测量百赫兹准确度的需求.

2.3 用于 CRDS 测量的扩展光谱

为了测量氦气 $2^3\text{S}-2^3\text{P}$ 跃迁频率、甲烷的 $10\text{F}_2-9\text{F}_2$ 跃迁频率及其可能的其他跃迁频率和其他分子的跃迁频率, 光谱扩展单元共包含 8 路应用端口, 输出的超连续光谱分别覆盖 1064, 1083, 1240, 1380, 1500, 1600, 1750 和 2100 nm. 为了同时获得高单模功率的 8 路目标光谱, 本系统采用多支路光谱扩展方式, 即单个支路只用于产生单个目标波长. 首先, 飞秒激光器输出的 11 mW 脉冲光, 经过一级放大, 获得约 33.4 mW 的功率输出. 一级放大采用单端后向抽运的泵浦方式, 以保持较高抽运效率和降低泵浦光引入噪声. 然后, 将预放大后激光功率平均分为 8 路, 作为啁啾脉冲放大模块的输入. 经过预啁啾管理后的脉冲, 输入到单级双向泵浦的掺铒光纤放大器中. 经过放大后的脉冲通过调节压缩光纤的长度, 使脉冲宽度均小于 60 fs. 经

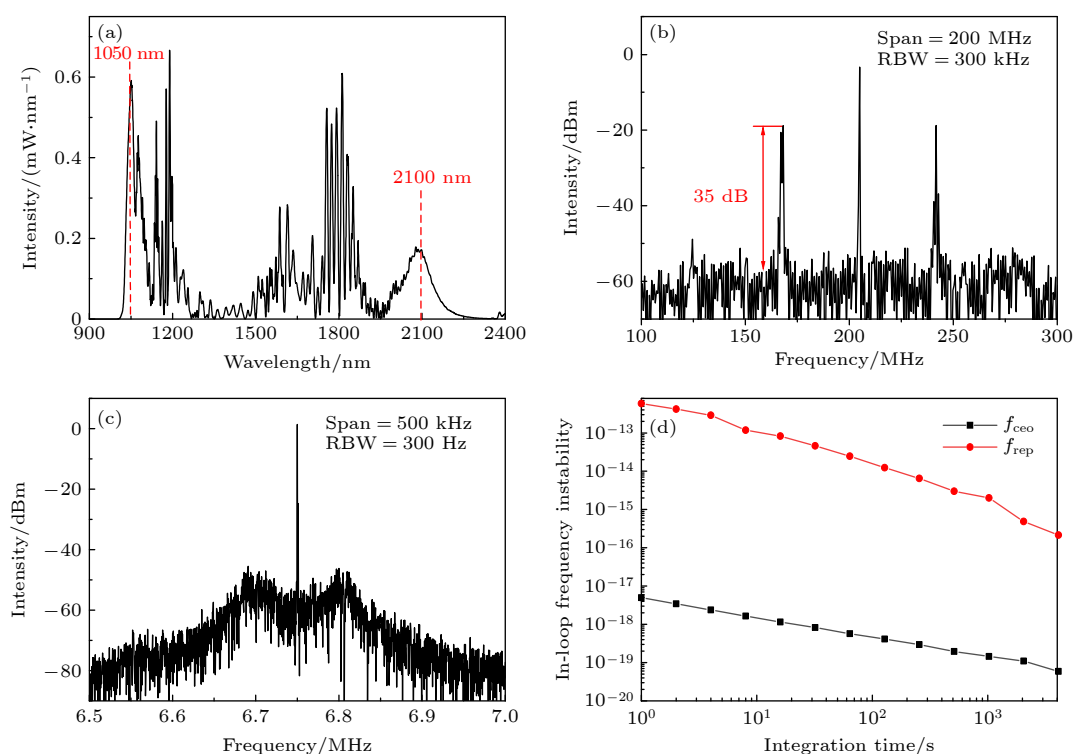


图 3 载波包络相移频率和重复频率的探测和控制 (a) 倍频程光谱; (b) f_{ceo} 频谱; (c) 相位锁定后 f_{ceo} 环内频谱; (d) 环内频率控制稳定度

Fig. 3. Detection and control of f_{ceo} and f_{rep} : (a) Measured octave-spanning spectrum; (b) RF spectrum of f_{ceo} ; (c) in-loop RF spectrum of phase locked f_{ceo} ; (d) in-loop frequency instability.

过压缩后的脉冲输入到 HNLF 中, 实现超连续光谱产生.

在给定泵浦源的情况下, 超连续谱光谱的结构

和能量分布与 HNLF 的参数有关, 特别是与 HNLF 的零色散波长 (zero dispersion wavelength, ZDW) 关系密切^[33,34]. 当 ZDW 距泵浦源波长较远, 处于

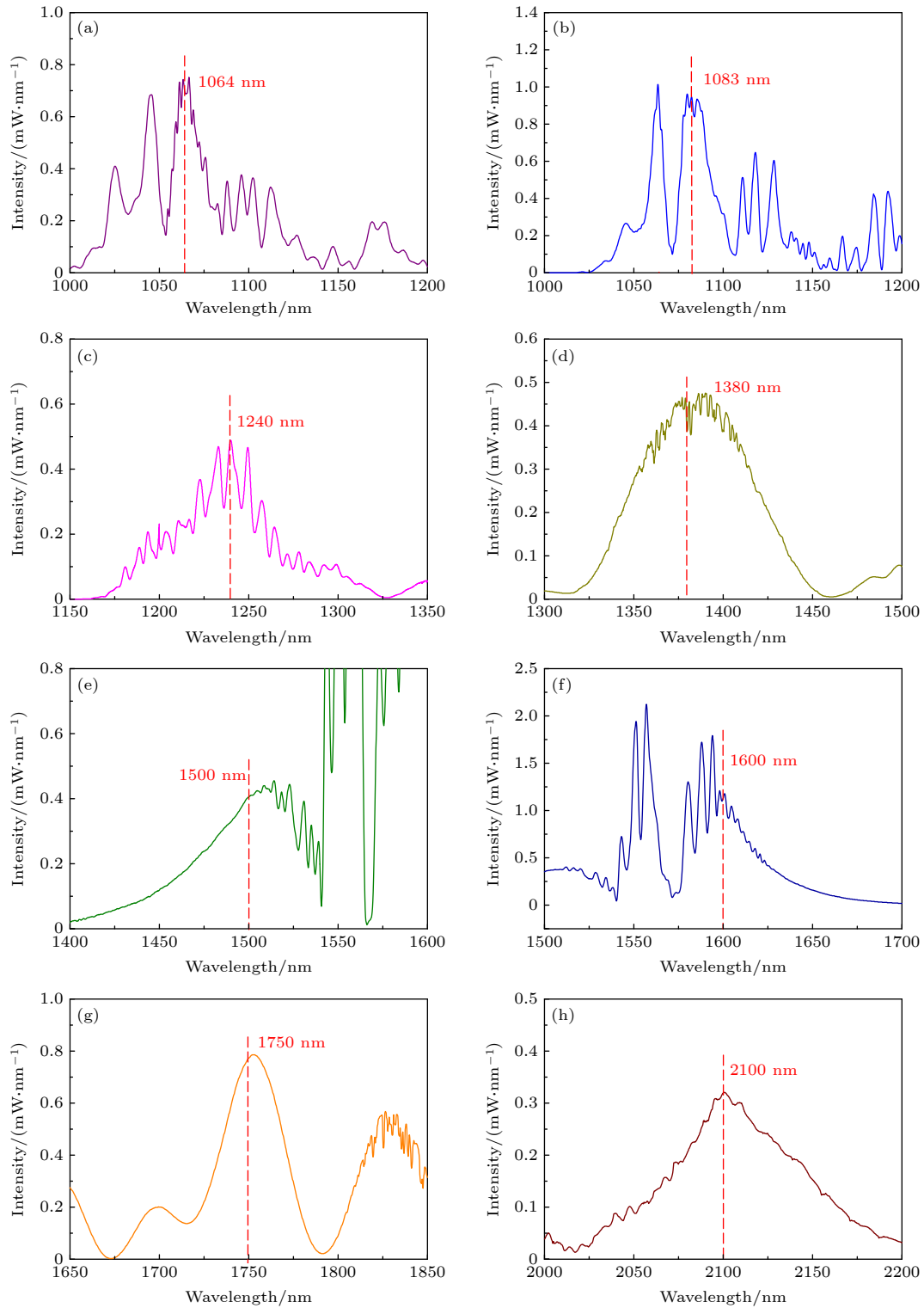


图 4 各目标波长附近的光谱展宽分布 (a) 1064 nm; (b) 1083 nm; (c) 1240 nm; (d) 1380 nm; (e) 1500 nm; (f) 1600 nm; (g) 1750 nm; (h) 2100 nm

Fig. 4. Observed supercontinuum spectrum near each target wavelength: (a) 1064 nm; (b) 1083 nm; (c) 1240 nm; (d) 1380 nm; (e) 1500 nm; (f) 1600 nm; (g) 1750 nm; (h) 2100 nm.

光纤的反常色散区时,入射的高功率脉冲在高阶色散和拉曼散射的共同作用下,在短波和长波处分别形成色散波和不断红移的拉曼峰;当ZDW在泵浦源波长附近时,入射脉冲光谱在孤子分裂和色散的共同作用下使距泵浦源波长更近处的光谱能量更充沛.系统中选用三种HNLF,通过改变入射脉冲光功率可以使尽量多的光谱能量集中至目标波长处.覆盖目标波长为1240, 1380, 1500和1600 nm的扩展应用端口中,采用的HNLF为美国ofs公司生产,该光纤零色散波长为1550 nm,使用长度分别为25, 12, 10和10 cm;覆盖目标波长为1064, 1083和1750 nm的扩展应用端口中,采用的HNLF为美国ofs公司生产,该光纤零色散波长为1405 nm,使用长度分别为30, 30和25 cm;覆盖目标波长为2100 nm的扩展应用端口中,采用的HNLF为日本住友公司生产,使用长度为12 cm,该光纤零色散波长为1350 nm,该光纤不仅非线性系数更高,而且其零色散波长偏离光梳直接输出光谱更远,使得输出的超连续光谱带宽更大,在长波处能量更集中.

将8路超连续光分别接入光谱仪观测目标波长处的光谱分布,并利用光功率计测量超连续光功率,计算得到目标波长的单模能量.图4为扩展光谱单元各目标波长附近的光谱分布.中心波长为1064, 1083, 1240, 1380, 1500, 1600, 1750和2100 nm的光谱宽度分别约为21, 20, 34, 83, 65, 34, 40和77 nm,各目标波长光谱宽度不同是由于HNLF特性和脉冲参数的不同导致的,光谱扩展单元输出的光谱宽度可以覆盖CRDS中单频激光的频率范围.光梳的扩展光谱在上述8个目标波长处的单模功率分别为362, 478, 504, 438, 408, 1311, 667和640 nW.单模功率均远大于100 nW,满足后续CRDS中与单频激光拍频所需的功率.一般来说,单模功率为100 nW的激光信号拍频后可以产生30 dB的信号(RBW = 300 kHz),30 dB的拍频信号足以驱动商用锁频电路^[35].

3 结 论

本文介绍了用于CRDS的“9”字腔多支路掺铒光纤飞秒光梳系统的研制.搭建的光梳系统 f_{ceo} 信噪比约为35 dB(RBW = 300 kHz),可满足锁定系统对 f_{ceo} 信噪比的需求.采用EOM与PZT

等频率控制器,实现了光梳系统的长期稳定运行, f_{rep} 和 f_{ceo} 的环内稳定度分别为 $5.85 \times 10^{-13}/\tau$ 和 $4.95 \times 10^{-18}/\tau^{1/2}$.在此基础上,光谱扩展单元将光梳光谱扩展至8个目标波长处,获得的8路光谱扩展应用端口的目标波长处的单模功率均大于300 nW.本文报道的光梳系统可满足多个光谱学研究中常见的分子吸收谱线测量应用.

参考文献

- [1] Hartl I, Schibli T R, Marcinkevicius A, Yost D C, Hudson D D, Fermann M E, Ye J 2007 *Opt. Lett.* **32** 2870
- [2] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [3] Phillips C R, Langrock C, Pelc J S, Fejer M M, Jiang J, Fermann M E, Hartl I 2011 *Opt. Lett.* **36** 3912
- [4] Eckstein J N, Ferguson A I, Hansch T W 1978 *Phys. Rev. Lett.* **40** 847
- [5] Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, Stenger J, Sutter D H, Keller U 1999 *Appl. Phys. B* **69** 327
- [6] Morgner U, Kärtner F X, Cho S H, Chen Y, Haus H A, Fujimoto J G, Ippen E P, Scheuer V, Angelow G, Tschudi T 1999 *Opt. Lett.* **24** 411
- [7] Ell R, Morgner U, Kärtner F X, Fujimoto J G, Ippen E P, Scheuer V, Angelow G, Tschudi T, Lederer M J, Boiko A 2001 *Opt. Lett.* **26** 373
- [8] Tauser F, Leitenstorfer A, Zinth W 2003 *Opt. Express* **11** 594
- [9] Holzwarth R, Zimmermann M, Udem T, Hänsch T W, Russbildt P, Gbel K, Poprawe R, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P 2001 *Opt. Lett.* **26** 1376
- [10] Yan M, Li W X, Yang K W, Zhou H, Shen X L, Zhou Q, Ru Q T, Bai D B, Zeng H P 2012 *Opt. Lett.* **37** 1511
- [11] Stumpf M C, Pekarek S, Oehler A E H, Stüdemeyer T, Dudley J M, Keller U 2010 *Appl. Phys. B* **99** 401
- [12] Washburn B, Fox R, Newbury N, Nicholson J, Feder K, Westbrook P, Jorgensen C 2004 *Opt. Express* **12** 4999
- [13] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Opt. Lett.* **24** 881
- [14] Ranka J K, Windeler R S and Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [15] D J Jones, S A Diddams, J K Ranka, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [16] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, Holzwarth R, Hänsch T W, Pasquini L, Manescau A, D'Odorico S, Murphy M T, Kentischer T, Schmidt W, Udem T 2008 *Science* **321** 1335
- [17] Kim S 2009 *Nat. Photonics* **3** 313
- [18] Niering M, Holzwarth R, Reichert J, Pokasov P, Udem T, Weitz M, Hänsch T W, Lemonde P, Santarelli G, Abgrall M, Laurent P, Salomon C, Clairon A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5496
- [19] O'Keefe A, Deacon D A G 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 2544
- [20] Paul J B, Lapson L, Anderson J G 2001 *Appl. Opt.* **40** 4904
- [21] Kassi S, Campargue A 2012 *J. Chem. Phys.* **137** 234201
- [22] Tan Y, Wang J, Cheng C F, Zhao X Q, Liu A W, Hu S M 2014 *Mol. Spectrosc.* **300** 60
- [23] Rao B J, Zhang Y Y, Yan L L, Wu Y L, Zhang P, Fan S T, Guo W G, Zhang X F, Zhang S G, Jiang H F 2019 *Acta Photon. Sin.* **48** 0114003 (in Chinese) [饶冰洁, 张颜艳, 闫露

- 露, 武跃龙, 张攀, 樊松涛, 郭文阁, 张晓斐, 张首刚, 姜海峰 2019 *光子学报* **48** 0114003]
- [24] Pan H, Cheng C F, Sun Y R, Gao B, Liu A W, Hu S M 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 103110
- [25] Gatti D, Sala T, Gotti R, Cocola L, Poletto L, Prevedelli M, Laporta P, Marangoni M 2015 *J. Chem. Phys.* **142** 074201
- [26] Martinez R Z, Metsala M, Vaittinen O, Lantta T, Halonen L 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 727
- [27] Hodges J T, Laver H P, Miller W W, Scace G E 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 849
- [28] Cygan A, Lisak D, Maslowski P, Bielska K, Wojtewicz S, Domyslawska J, Trawinski R S, Ciurylo R, Abe H, Hodges J T 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 063107
- [29] Wang J, Sun Y R, Tao L G, Liu A W, Hua T P, Meng F, Hu S M 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 043108
- [30] Kang P, Sun Y, Wang J, Liu A W, Hu S M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 104206 (in Chinese) [康鹏, 孙羽, 王进, 刘安雯, 胡水明 2018 *物理学报* **67** 104206]
- [31] Zheng X, Sun Y R, Chen J J, Jiang W, Pachucki K, Hu S M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 263002
- [32] Tan Y, Wang J, Tao L G, Sun Y, Liu A W, Hu S M 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 0911002 (in Chinese) [谈艳, 王进, 陶雷刚, 孙羽, 刘安雯, 胡水明 2018 *中国激光* **45** 0911002]
- [33] Fan S T, Zhang Y Y, Yan L L, Guo W G, Zhang S G, Jiang H F 2019 *Chin. Phys. B* **28** 064204
- [34] Ning K, Hou L, Fan S T, Yan L L, Zhang Y Y, Rao B J, Zhang X F, Zhang S G, Jiang H F 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 064202
- [35] Zhang Y Y, Yan L L, Jiang H F, Zhang S G 2017 *J. Time Freq.* **40** 130 (in Chinese) [张颜艳, 闫露露, 姜海峰, 张首刚 2017 *时间频率学报* **40** 130]

Multi-branch erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb for measurement of cavity ring-down spectroscopy^{*}

Rao Bing-Jie¹⁾ Zhang Pan¹⁾²⁾ Li Ming-Kun¹⁾²⁾ Yang Xi-Guang¹⁾²⁾
 Yan Lu-Lu¹⁾ Chen Xin¹⁾ Zhang Shou-Gang¹⁾²⁾
 Zhang Yan-Yan^{1)†} Jiang Hai-Feng^{1)2)3)‡}

1) (Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

2) (School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Division of Quantum Physics and Quantum Information, University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China)

(Received 24 November 2021; revised manuscript received 17 December 2021)

Abstract

In this paper, we demonstrate an optical frequency comb (OFC) based on an erbium-doped-fiber femtosecond laser, for the measurement of cavity ring-down spectroscopy (CRDS) with wavelengths of 1064, 1083, 1240, 1380, 1500, 1600, 1750 and 2100 nm. We adopt a multi-branch structure to produce high power at the specific wavelengths to meet the requirement for application in the spectral measurement. The OFC is developed by using a mode-locked fiber ring laser based on the nonlinear amplifying loop mirror mechanism. The laser is self-starting by introducing a nonreciprocal phase bias in the cavity and insensitive to the environmental perturbation. Using the chirped pulse amplification and highly nonlinear fibers, the broad spectra at the specific wavelengths are obtained. By optimizing the parameters of the pulses, the power of per mode at each target wavelength is greater than 300 nW.

The f_{rep} is obtained by detecting the output of the femtosecond laser directly, while the f_{ceo} is detected by f - $2f$ interference. The signal-to-noise ratio of the f_{ceo} is about 35 dB with a 300-kHz resolution bandwidth. By controlling the intra-cavity electro-optic modulator and piezoactuator, the f_{rep} is stabilized with high bandwidth and large range (about megahertz bandwidth and 3 kHz range). The f_{ceo} is stabilized by using feedback to the pump current of the femtosecond laser dynamically. The in-loop frequency instability degree of the f_{ceo} , evaluated by the Allan deviation, is approximately $4.95 \times 10^{-18}/\tau^{1/2}$ at 1 s and integrates down to 10^{-20} level after 2000 s, while that of the f_{rep} is well below $5.85 \times 10^{-13}/\tau$. The all polarization-maintaining erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb with multi-application branches we demonstrate in this paper is efficient and reliable for many other applications including optical frequency metrology and optical atomic clocks.

Keywords: erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb, mode-locked laser, spectral broaden, spectroscopy measurement

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

DOI: 10.7498/aps.71.20212162

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFA0309801), the Strategic Leader Category B of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB35030101), and the Natural Science Basic Research Program of Shannxi Province, China (Grant No. 202-JQ-434).

† Corresponding author. E-mail: zhangyanyan@ntsc.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hjiang1@ustc.edu.cn