

引用格式: YANG Mei, WEN Qi, LIU Tingting, et al. Integrated Mid-infrared Dual-comb System Based on a Dual-wave-length Laser (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3):0352107

杨梅, 闻齐, 刘婷婷, 等. 基于双波长激光器的集成化中红外双光梳系统(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(3):0352107

基于双波长激光器的集成化中红外双光梳系统 (特邀)

杨梅¹, 闻齐¹, 刘婷婷¹, 闫明^{1,2}, 曾和平^{1,2,3}

(1 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

(2 华东师范大学重庆研究院 精密光学重庆市重点实验室, 重庆 401121)

(3 济南量子技术研究院, 济南 250101)

摘要: 中红外双光梳光谱检测系统因其高分辨、高灵敏、快速测量的特性为极低浓度气体的标定带来了革新技术。本文用单腔双波长激光器输出的异步双波长脉冲替代两台锁模激光器, 结合非线性差频技术, 发展了集成实用化的中红外双光梳系统。共腔产生的 1 034 nm 与 1 039 nm 双波长脉冲序列, 其重复频率差约为 1.18 kHz, 且因共模噪声被抑制, 脉冲间的相对稳定性较高。利用级联放大器将种子脉冲光功率提升至 1.1 W 后, 与 2 W 的 1 549.315 nm 的连续激光非线性差频, 将激光器输出波段拓展至中红外。产生的中红外激光功率可达 3.5 mW, 光谱覆盖范围超过 50 nm。对中红外双光梳的相干性进行测量, 与 1 μm 的底层双光梳相比, 中红外双光梳拍频梳齿频率间隔、信噪比、线宽等无明显劣化, 可为复杂环境下的痕量分析提供可行方案。

关键词: 光纤激光器; 光学频率梳; 双光梳光谱技术; 中红外; 双波长锁模

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235203.0352107

0 引言

光学频率梳(简称光梳)在时域上表现为周期性超短脉冲序列, 在频域上则为等间隔频率梳齿线, 相邻梳齿线间隔精确等于脉冲重复频率, 相当于一把超精细的频率尺, 为量子操控、精密测距及医学成像等领域^[1-3]提供了高精度、高分辨率、高灵敏度的频率标定工具。利用光梳的高度相干性, 通过异步光取样实现的双光梳光谱^[4-5]技术不仅能够突破机械扫描与色散元件的限制, 其宽谱特性还能在 ms 量级时间内对多气体的多吸收峰同时成谱检测, 极大地提高了测量精度与分辨率, 缩短了测量时间。同时, 鉴于中红外波段“分子特征指纹谱”与“大气传输窗口区”特性, 中红外波段双光梳在痕量分析^[6]、大气遥感^[7-8]、呼吸医学诊断^[9]方面具有重要实际应用价值并逐渐成为了研究的热点领域。

目前产生相干双光梳系统的技术主要有三种: 锁模激光器^[10-11]、电光调制^[12-13]和非线性光学微谐振腔^[14-15]。2018年, MURAVIEV A V 等通过两台相位相互锁定的光梳泵浦一对超宽带次谐波光参量振荡器, 在 3.1~5.5 μm 的中红外波段得到线宽为 25 mHz 的双光梳, 并对气体混合物中的 22 种微量分子进行检测, 其灵敏度达十亿分之一^[16]。同年, GAETA A L 等利用两个硅基底的微腔实现了覆盖 2.6~4.1 μm 的双光梳系统, 并对丙酮的吸收谱线进行了验证性测量, 为极简易的双光梳系统提供了可行方案^[17]。2022年, REN X Y 等以两台重复频率差可调的电调光梳为光源, 采用双光梳与非线性石英增强光声光谱技术相结合的方式, 实现了 8.3 ppb (1 ppb = 1×10^{-9}) 的检测灵敏度, 并可同时精确测量亚多普勒光谱特征^[18]。基于锁模激光

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62035005), 上海市市级科技重大专项(No. 2019SHZDZX01-ZX05), 重庆市自然科学基金(No. 2022NSCQ-JQX1103)

第一作者: 杨梅, 51250920033@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者: 刘婷婷, ttliu@lps.ecnu.edu.cn; 闫明, myan@lps.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-30; **录用日期:** 2022-12-29

<http://www.photon.ac.cn>

器的双光梳系统能够在宽带范围内获得近乎理想的光频梳,兼具高分辨率、高信噪比及绝对频率精度的优势,但锁定重复频率(f_r)与载波包络相位信号(f_{ceo})的电子伺服系统结构复杂、成本昂贵,在体积及功耗方面限制了其实际应用。而电调光梳与微腔光梳产生技术结构简单、易于实现,但其暂时无法突破输出谱宽有限、梳齿数量少的技术瓶颈,不适合高分辨率、一次性成谱测量的实际应用需求。

近年来,单腔双波长激光器,或称“单腔双梳”技术备受关注^[19-20]。在单个锁模激光谐振腔内加入调制元件,使得谐振腔内两个波长同时起振,从而输出两列重复频率略有差异的脉冲序列,用以替代两台锁模激光器。由于两个波长共腔产生,两者间的共模噪声得到了很好地抑制,两列脉冲间的相对频率稳定性高,无需外部锁相系统,脉冲间重复频率差值的频率抖动量标准差就能降低至5.1 mHz^[21],为双光梳系统提供了结构简单、成本低廉、体积小、稳定性高的可靠光源。

本文搭建了基于单腔双波长激光器产生的简化中红外双光梳系统。在非线形放大环形镜锁模腔内,利用保偏光纤与角度偏差的光纤耦合镜对构成Lyot滤波器,通过调节入射激光与保偏光纤光轴夹角,可以调节Lyot滤波器的透射峰。在腔内增益光谱的共同限制下,激光器可输出两列脉冲序列,其中心波长分别为1 034与1 039 nm,脉冲间重复频率差值约为1.183 kHz。结合非线性频率转化技术,将放大后的激光脉冲与1 550 nm的连续激光在周期性极化铌酸锂(Periodically Polarized Lithium Niobate, PPLN)晶体中进行光学差频,即可获得中红外双光梳系统。同时,中红外双光梳保持了底层单腔双梳的高相干性,拍频梳齿信噪比超25 dB,其宽谱、高信噪比特性为特征气体检测、痕量分析等提供了可靠手段。

1 实验装置

基于单腔双波长激光器的中红外双光梳系统包括全保偏光纤结构掺镱双波长激光器、多级级联光放大器、光学差频模块及长光程气体吸收探测模块,整体实验装置如图1(a)所示。

基于非线性放大环形镜(Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM)锁模的全保偏掺镱双波长激光器由一个非线性环和一个Lyot滤波器通过光纤分束器(Coupler, CP2)桥接而成,其中非线性环部分由980/1 030 nm波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM1)、掺镱增益光纤(Yb-doped Single-mode Fiber,

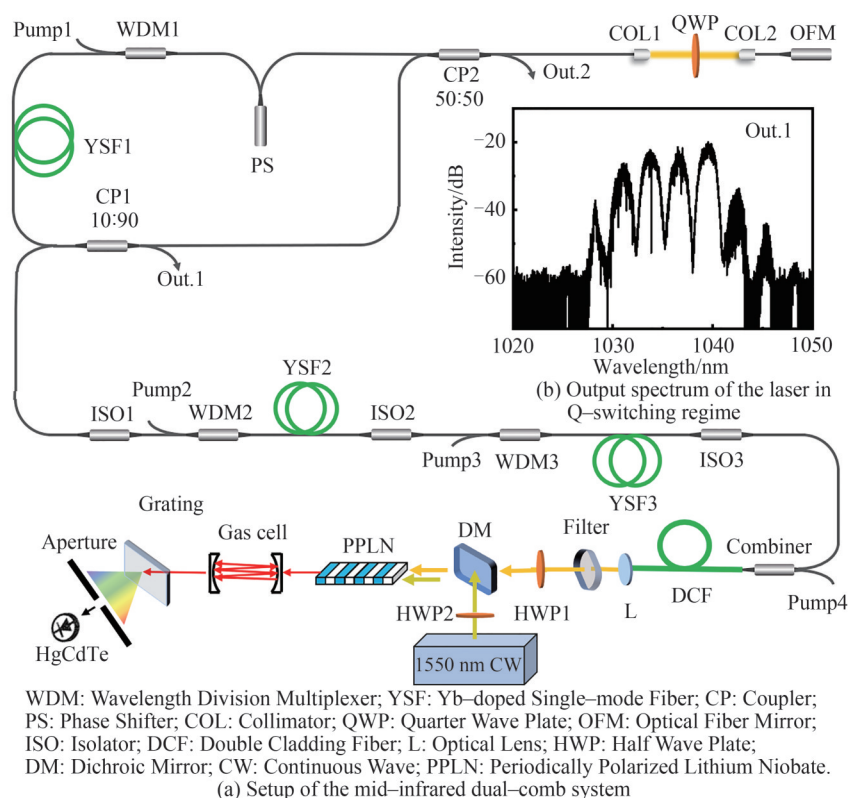


图1 中红外双光梳系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of mid-infrared dual-comb system

YSF1)、光纤分束器(CP1)与非互易性相移器构成,而光纤耦合镜(Collimator, COL1&2)、四分之一波片(Quarter Wave Plate, QWP)、全保偏光纤与光纤反射镜(Optical Fiber Mirror, OFM)组成的 Lyot 滤波器则充当了 NALM 腔的线性臂部分。谐振腔的 Out.1 输出端用于光谱监测, Out.2 输出端则用于锁模状态与输出功率监测。在非线性环内,最大功率 400 mW 的 976 nm 泵浦光沿 WDM1 的泵浦端耦合进 1 m 的全正色散保偏掺镱增益光纤(YSF1, Nufern, PM-YSF-HI)中,受激辐射产生的 1 030 nm 激光脉冲在谐振腔内传输。环内的非互易相移器能为正反传输两束光提供 $\pi/2$ 的线性相移,同时,为增大非对称性,环内顺时针传输的脉冲先经过 4.4 m 的负色散单模光纤,再进入 YSF1 中进行功率放大;而逆时针传输的脉冲则先经过 0.9 m 的负色散单模光纤,再进入 YSF1 中进行放大,非对称放置的增益光纤能为两束光引入非线性相移。对于 NALM 锁模的“9”字型腔来说,当总相移量达到 π 的奇数倍时,腔内损耗最小,激光器可实现锁模。在线性臂中, COL1 与 CP2 之间的尾纤长度为 0.27 m,而工作距离为 30 cm 的光纤耦合镜对、四分之一波片、43 cm 的保偏光纤(PM980-XP, Nufern)及双轴工作的光纤反射镜共同构成了保偏 Lyot 滤波器。根据琼斯矩阵计算可得, Lyot 滤波器透射率可表示为

$$T = 1 - \sin^2(2\theta) \cos^2(2\pi BL/\lambda) \quad (1)$$

式中, θ 为光纤耦合镜之间的角度偏差,在实验中,为获得最大调制深度,设置 θ 为 45° ;保偏光纤双折射系数 $B = 4.1 \times 10^{-4}$;光纤耦合镜 COL2 与光纤反射镜 OFM 之间保偏光纤的长度 $L = 0.43$ m; λ 为入射光中心波长。Lyot 滤波器透射峰的频谱间隔可以表示为

$$\Delta\lambda' = \lambda^2/2BL \quad (2)$$

插图 1(b) 为激光器未锁模时,由光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370C)记录的 Out.1 端输出光谱。从图中可看出,谐振腔可输出多个透射峰,且透射峰间的频谱间隔 ~ 3 nm,与我们的计算结果相一致。

谐振腔由非线性环内的光纤分束器(CP1)输出,其分束比为 10:90,10% 的激光作为种子脉冲进入全保偏光纤结构的级联光纤放大器中。为减少因种子脉冲功率过小而引入的放大噪声,放大器采用两级前向预放大与一级主放大级联的方式,将谐振腔输出种子脉冲的平均功率由 1 mW 逐步提升至瓦量级。两级预放大中,掺镱增益光纤长度均为 1 m,在 pump2 与 pump3 的功率分别增加到 300 mW 与 410 mW 后,预放大输出激光平均功率达 50 mW。主放大器由 980/1 030 nm 合束器、7 W 的 976 nm 泵浦源以及 1.5 m 长双包层光纤(Double Cladding Fiber, DCF; Nufern, PLMA-YDF-10/125-M)组成。合束器将泵浦光耦合进双包层光纤,当泵浦功率增加到 3.5 W 时,主放大输出脉冲平均功率达到 1.1 W。

放大后的高功率脉冲经焦距为 11 mm 的准直透镜耦合至空间的光学差频模块中,激光中 980 nm 的杂散光由中心波长 1 030 nm,带宽 10 nm 的带通滤波器(filter)滤除。高功率 1 030 nm 激光脉冲与波长为 1 549.315 nm 的连续激光通过二向色镜(Dichroic Mirror, DM)合束,共同注入 PPLN 晶体内进行光学差频。为提高中红外转化效率,PPLN 晶体的温度由高精度温控炉恒定在 125°C 。同时,两束激光的输入端分别放置了中心波长为 1 030 nm 与 1 550 nm 的半波片(Half Wave Plate, HWP1&HWP2),用以调节输入激光的偏振态,从而实现准相位匹配。当连续激光功率增加至 2 W 时,产生的中红外激光功率提升至 3.5 mW。根据朗伯比尔定律,气体分子对光的吸收强度与气体浓度及光程长度成正比。因此,我们从增长接触光程的角度出发,将产生的中红外激光注入一个多通长光程气体池中,激光在气体池中经历 50 次反射,可将相互作用长度延长至 10 m,有利于极低浓度的气体探测。最后,通过光栅及光阑的组合,滤除杂散光,即可由碲镉汞 HgCdTe 光伏探测器测到气体分子特征吸收光谱。

如图 1 所示,中红外双光梳系统的双波长激光器、级联光纤放大器部分均采用光纤及光纤器件直接熔融耦合的方式连接,光纤结构具有良好的柔绕性和集成性。谐振腔中的光纤耦合镜对可采用角度偏差胶合的方式,空间距离可缩短至 < 1 cm。光学差频模块则采用空间结构,出于对系统集成度的考量,所用透镜焦距仅有 11 mm。掺镱双波长激光器、级联光纤放大器、光学差频模块可集成在 3U 机箱内。对比于其他集成化双光梳系统,2014 年,NIST 实验室运用车载双光梳系统在 km 级开放光程中实现了遥感^[22],但其系统依赖于两套独立光学频率梳源及配套锁相环实现,未体现出简易性和集成度方面的优势。本文基于单腔双波长激光器搭建的中红外双光梳系统为简化其系统结构,减小体积,降低成本提供了可行方案。

2 结果与讨论

实验装置中的双波长激光器可通过泵浦功率调谐实现单波长锁模与双波长锁模的切换。当泵浦功率增加到 ~ 150 mW时,锁模呈现单波长多脉冲状态,逐渐将泵浦功率降低至 ~ 85 mW,可实现单波长单脉冲锁模。由于1 034 nm与1 039 nm的透射率相近,锁模脉冲的中心波长具有随机性,旋转四分之一波片的角度,可实现两个波长的切换。Lyot滤波器的多峰透射特性允许多个波长在谐振腔内同时起振,为双波长甚至多波长锁模提供了必要条件^[23]。当泵浦功率增加到 ~ 180 mW时,腔内能量足以支持两个波长脉冲起振,激光器工作在双波长多脉冲状态,泵光功率降低至 ~ 90 mW,可获得稳定的双波长双脉冲锁模,其中心波长分别为1 034 nm与1 039 nm,光谱数据如图2(a)所示,每个波长的3 dB谱宽 ~ 1.6 nm。由于Lyot滤波器其他通带的自发辐射无法完全抑制,所以在1 034与1 039 nm的相邻通带内仍存在微弱的光谱成分。图2(b)为射频分析仪(KEYSIGHT, N9320B)记录的双波长脉冲射频域信号。由于腔内色散影响,双波长脉冲的群速度不同,因而其重复频率会存在微小差异,射频频率分别为25.520 5 MHz与25.521 7 MHz的主峰信号验证了双波长脉冲的异步特性。双波长脉冲间的重频差 Δf_r 可由式(3)描述

$$\Delta f_r = L_{\text{fiber}} D \Delta \lambda / T^2 \quad (3)$$

式中, L_{fiber} 为腔内光纤长度, D 为群速度色散, T 为脉冲在腔内运行周期, $\Delta \lambda$ 为中心波长差值。实验中,腔内各器件尾纤和增益光纤长度共计7 m,平均群速度色散为 -46 ps/nm/km,脉冲运行周期约为39.2 ns,理论上双波长脉冲重频差为1 173 Hz,与实际测量的1 180 Hz重频差吻合,其间的微小差异起源于色散值的微小变化。在射频域内,两个重频信号的信噪比均超过60 dB,说明双波长锁模脉冲较为稳定。对双波长脉冲的调控能力进行测量,随着腔温从 19°C 逐步提升到 26°C ,两串脉冲的中心波长均蓝移了 ~ 5.7 nm,同时,脉冲对应的重复频率同步线性降低 ~ 800 Hz,证明了双波长脉冲良好的调控能力和相对稳定性。

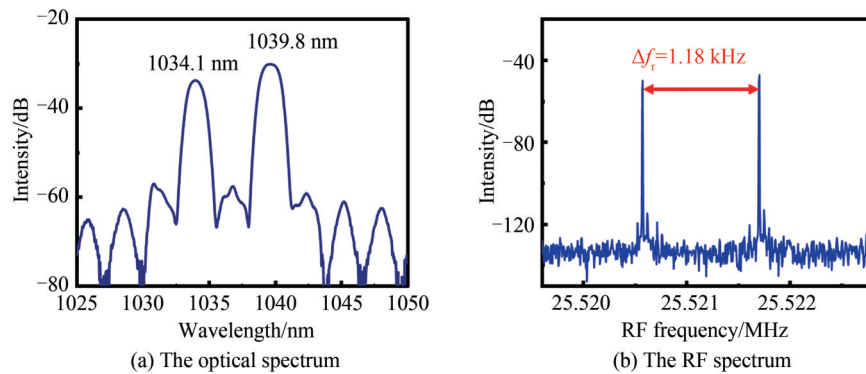


图2 输出双波长脉冲特征图

Fig.2 The output characteristics of the dual wavelength pulses

为验证底层双光梳光源脉冲间的相对稳定性,对双波长脉冲的重复频率及其差值进行了测量。谐振腔输出的双波长脉冲经由光栅与反射镜的组合进行分光,并由两个高速光电探测器(MenloSystems, FPD 510-FS NIR)分别测量其重复频率的变化。图3记录了10 h内双波长脉冲各自重频偏移与相应的重复频率差。如图3所示,黑线和蓝线分别为1 040 nm和1 034 nm脉冲重复频率漂移曲线。在10 h测量时间内,由环境扰动引起的脉冲重复频率偏移量约为60 Hz,且两个波长脉冲的重复频率同步下降。红线为相应的重复频率差值,其最大偏移量约为3.5 Hz。在1 Hz的采样频率下,双波长重复频率差的标准差为0.45 Hz。无需外部锁相环,重复频率差的漂移量较双波长脉冲各自重频漂移量小1~2个量级,说明实验采用的单腔双波长激光器可以很好地抑制共模噪声,并在较长时间范围内保持良好的脉冲相对稳定性。

脉冲间的高相干性是构成双光梳测量系统的必要条件。为了验证单腔双波长激光器输出脉冲间的相干性能,我们利用平衡探测器、高速示波器、频谱分析仪搭建相干性测试链路,测量并记录了双波长脉冲的时域拍频信号与频域拍频包络。

用平衡光电探测器(Thorlabs, PDB410C)接收谐振腔 Out.1 端输出的脉冲光,电信号经低通滤波器

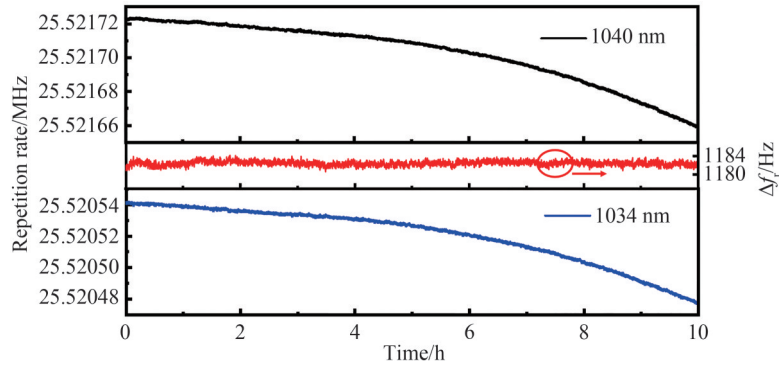


图3 双波长脉冲重复频率长期稳定性

Fig.3 Long term stability of repetition rates of dual wavelength pulses

(LPF: DC-15 MHz)滤波后送入示波器(Teledyne LeCroy, HDO6104A),此示波器兼具时域与频域分析功能。将示波器采样时间设为5 ms,采样频率设为1 GHz时,示波器可在时域上探测到脉冲干涉信号序列,如图4(a)所示,其周期约为840 μ s,与1.18 kHz的重频差相对应。图4(a)中插图为0时刻附近展开的单个时域干涉包络,蓝色为单次采样值,红色为200次平均值,将单次采样值进行傅里叶变换(FFT)后,即可得到脉冲干涉的频域包络信号。图4(b)比较了单次采集的频域干涉信号包络(黑)与FFT变换后的射频信号(红),两者迹线趋于一致。图4(c)为图4(b)中~11.6 MHz附近蓝框内展开后获得的拍频梳齿信号,梳齿间隔等于1.18 kHz的重复频率差,梳齿信号信噪比超过25 dB。受限于示波器的分辨率,读取到每根梳齿半高宽在12 Hz。高信噪比的拍频梳齿信号证明了双波长脉冲序列之间的高相干性,而梳齿的窄线宽特性则证实了单腔双波长激光器的高稳定、低噪声性能。

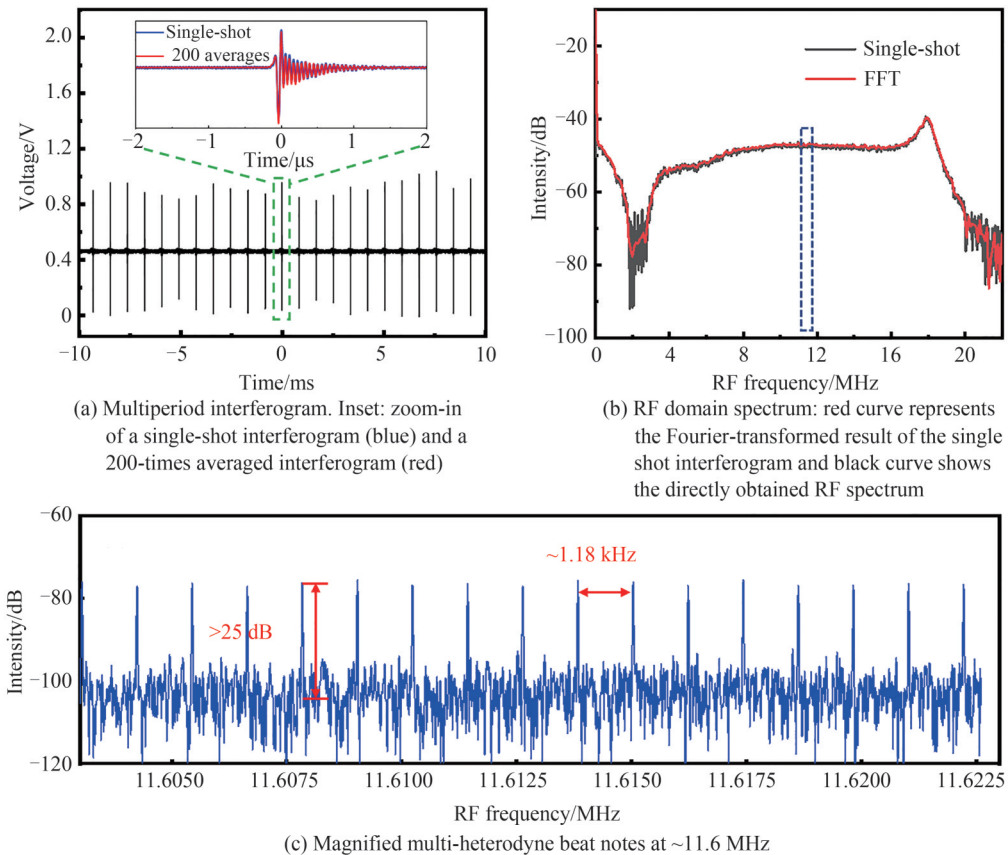


图4 双波长脉冲拍频信号图

Fig.4 Output spectra of the beat signal

以高相干、高稳定、低噪声的单腔双波长激光器为光源,将其功率放大后与 1550 nm 连续光非线性差频,发展出集成化的中红外双光梳系统。单腔双波长激光器输出的种子脉冲平均功率仅有 1 mW,为避免因种子脉冲过于微弱,而在放大中引入大量自发辐射噪声,在实验中采用两级前向预放大与一级主放大级联的结构,将种子光脉冲功率逐级提升,以维持脉冲之间的高相干性。预放大器与主放大器均采用全保偏光纤结构,增强了系统的环境免疫性。与前向预放大中各采用 1 m 的单模掺镱增益光纤不同,在主放大器中,采用双包层结构的掺镱光纤作为增益介质,进行脉冲功率的提升。双包层结构有利于承载更高功率的脉冲,当主放泵浦光功率增加至 3.5 W 时,级联放大器可将双波长脉冲的平均功率提升至 1.1 W。在放大过程中,由于多种非线性效应的综合影响,例如自相位调制、交叉相位调制等,种子脉冲的输出光谱不断展宽,同时,由于光纤对 1 μm 激光呈现正色散特性,脉冲宽度不断增加。图 5(a)为记录的功率衰减后的主放大输出光谱。对比于图 2(a)可以看出,1 034 nm 与 1 039 nm 的光谱均被展宽,两个波长的光谱重叠部分增加,光谱较为连续,在非线性效应的作用下,放大后光谱的 3 dB 带宽超过 20 nm。产生中红外激光的技术手段有多种,例如利用增益介质直接泵浦产生或利用非线性频率变换技术间接产生等。本实验中,采用 1 030 nm 的激光脉冲与 1 550 nm 的连续激光在 PPLN 中非线性差频的方式来产生中红外激光,此种方法的优势在于产生的中红外激光光谱较宽、转化效率高,且中红外的光谱覆盖范围可以通过波长调谐技术扩展。将放大后的激光通过准直透镜耦合至非线性差频模块中,激光脉冲与 1 550 nm 附近的连续激光在二向色镜(DM)处合束,共同进入 PPLN 晶体。为提高中红外激光的转化效率,PPLN 晶体的温度精确控制在了 125 $^{\circ}\text{C}$ 。连续激光器的线宽 < 10 kHz,其中心波长可调谐。图 5(b)为连续激光中心波长调节到 1 549.315 nm 时,记录的中红外激光光谱。产生的中红外激光平均功率大于 3.5 mW,光谱处于多种气体的特征吸收带且范围超过 50 nm,可为多种气体多个吸收峰的同时成谱检测提供良好光源。

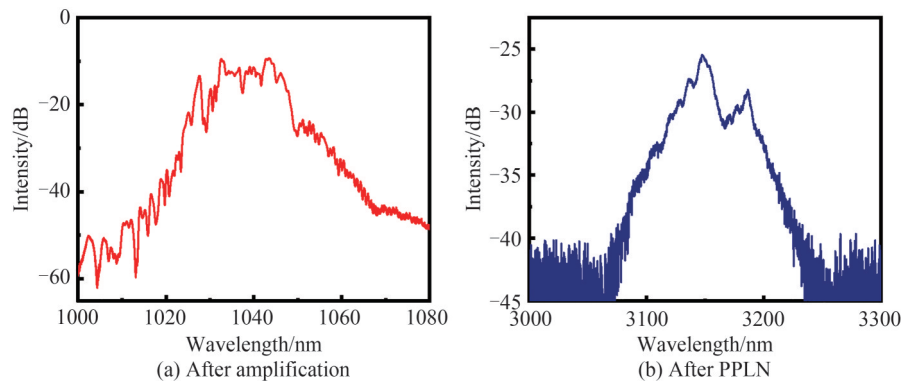


图 5 不同位置的双波长脉冲光谱图

Fig.5 The optical spectra of the dual-wavelength pulses after amplification and PPLN

根据朗伯-比尔定律,气体分子对光的吸收强度与气体浓度及相互作用长度成正比。因此,在 PPLN 晶体后,放置了一个多通长光程气体池。气体池由两面高反射镜组成,经过精确的光路调整,中红外激光在气体池中来回反射 50 次后才出射,可将气体与激光的接触光程增长至 10 m,更有利于极低浓度气体检测。值得注意的是,对于双波长脉冲来说,其光谱重叠部分相干性较强。对于非线性差频产生的中红外激光来说,其中心波长附近相干性强,而边带部分相干性则较弱。中红外激光的边带部分会引入噪声,增加拍频包络探测的基底,降低梳齿信号的信噪比。因此,在气体池出射端,用衍射光栅将中红外激光按波长空间分布,并结合光阑取出中心部分,滤除边带部分,即可实现光谱滤波。

用碲镉汞探测器测得滤波后的频域拍频包络信号,如图 6 所示。将 2.6 MHz 附近的包络展开,可得到图 6 插图中的中红外双光梳拍频梳齿信号。与图 4(c)比较,可看出梳齿信号的频率间隔、信噪比及线宽没有明显劣化,说明中红外双光梳保持了底层双光梳的相干性。由此,我们以 1 030 nm 的单腔双波长激光器为光源,通过非线性差频技术将其输出波段频率转换至中红外,发展了集成化的中红外双光梳系统,且中红外双光梳能保持底层双光梳的高相干性,为复杂环境下的高灵敏微量气体检测提供了良好光源。

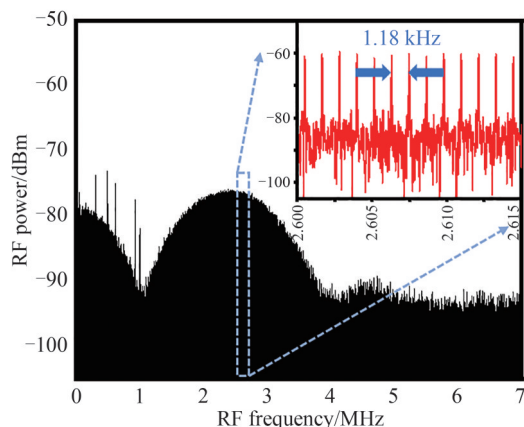


图6 中红外拍频梳齿频谱图

Fig.6 The RF spectrum of the mid-infrared beat signal

3 结论

中红外双光梳技术兼具光谱技术的高分辨、高精度,双光梳技术的快速测量、高灵敏与中红外波段特征指纹谱特性,为极低浓度的气体分子标定提供了革新手段。目前构建中红外双光梳系统的技术手段存在结构复杂、成本昂贵、梳齿根数少、实用性不强等难题。针对上述问题,本文搭建了基于NALM锁模的全保偏单腔双波长激光器,以其输出的异步双波长脉冲替代两台锁模激光器作为简易的双光梳光源。通过在谐振腔内构建多通带Lyot滤波器,激光器可输出1 034与1 039 nm的双波长脉冲,其重复频率差为1.18 kHz。以此作为种子脉冲,利用级联放大技术,在引入较低噪声的情况下,将激光器输出脉冲的平均功率逐级从1 mW提升至1.1 W。放大后的激光与1 549.315 nm的连续光合束后,在PPLN晶体内非线性差频,将激光器输出波段拓展至中红外。通过精确晶体控温及准相位匹配调制,产生中红外激光的功率可达3.5 mW。为验证双光梳系统的相干性,分别测量了1 μm 与3 μm 波段双光梳的拍频梳齿信号。比较来看,非线性差频产生的中红外双光梳拍频梳齿信号的频率间隔、线宽及信噪比无明显劣化,可保持底层双光梳特性。本文以单腔双波长激光器为基础,结合非线性差频技术,发展了集成化的中红外双光梳系统,体积小、成本低、结构简单,能为复杂环境下极低浓度的气体检测提供可行方案。

参考文献

- [1] HU Huiqin, REN Xinyi, WEN Zhaoyang, et al. Single-pixel photon-counting imaging based on dual-comb interferometry[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1379.
- [2] LOMSADZE B, SMITH B C, CUNDIFF S T. Tri-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 676-680.
- [3] WU Guanhao, ZHOU Siyu, YANG Yuetang, et al. Dual-comb ranging and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504002.
吴冠豪,周思宇,杨越棠,等. 双光梳测距及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504002.
- [4] CHANG Lin, LIU Songtao, BOWERS J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(2): 95-108.
- [5] HU Dingtong, WU Ziling, CAO Hui, et al. Dual-comb absolute distance measurement of non-cooperative targets with a single free-running mode-locked fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126566.
- [6] COSSEL K C, ADLER F, BERTNESS K A, et al. Analysis of trace impurities in semiconductor gas via cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2010, 100(4): 917-924.
- [7] GALTIER S, PIVARD C, RAIROUX P. Towards DCS in the UV spectral range for remote sensing of atmospheric trace gases[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3444.
- [8] GIORGETTA F R, PEISCHL J, HERMAN D I, et al. Open-path dual-comb spectroscopy for multispecies trace gas detection in the 4.5-5 μm spectral region[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000583.
- [9] METSALA M. Optical techniques for breath analysis: from single to multi-species detection [J]. *Journal of Breath Research*, 2018, 12(2): 027104.
- [10] LI Bowen, XING Jian, KWON D, et al. Bidirectional mode-locked all-normal dispersion fiber laser[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 961-964.

- [11] GU Xiaorong, CHEN Haidong, LI Yao, et al. Ultrashort pulse duration and broadband dual-comb laser system based on a free-running passively mode-locked Er-fiber oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 18(12): 125101.
- [12] FDIL K, MICHAUD-BELLEAU V, HEBERT N B, et al. Dual electro-optic frequency comb spectroscopy using pseudo-random modulation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4415-4418.
- [13] MARTIN-MATEOS P, PORRO A, ACEDO P. Fully adaptable electro-optic dual-comb generation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(2): 161-164.
- [14] ZHANG Mian, BUSCAINO B, WANG Cheng, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 373-377.
- [15] SUH M G, YANG Qifan, YANG K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy [J]. *Science*, 2016, 354(6312): 600-603.
- [16] MURAVIEV A V, SMOLSKI V O, LOPARO Z E, et al. Massively parallel sensing of trace molecules and their isotopologues with broadband subharmonic mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 209-214.
- [17] YU Mengjie, OKAWACHI Y, GRIFFITH A G, et al. Silicon-chip-based mid-infrared dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1869.
- [18] REN Xinyi, YAN Ming, WEN Zhaoyang, et al. Dual-comb quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Photoacoustics*, 2022, 28: 100403.
- [19] IDEGUCHI T, NAKAMURA T, KOBAYASHI Y, et al. Kerr-lens mode-locked bidirectional dual-comb ring laser for broadband dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 748-753.
- [20] LI Ting, ZHAO Xin, CHEN Jie, et al. Tri-comb and quad-comb generation based on a multi-dimensional multiplexed mode-locked laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(20): 5178-5184.
- [21] CHEN Jie, NITTA K, ZHAO Xin, et al. Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036004.
- [22] RIEKER G B, GIORGETTA F R, SWANN W C, et al. Frequency-comb-based remote sensing of greenhouse gases over kilometer air paths[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 290-298.
- [23] ZHANG Xianting, WANG Shaokang, GUO Nan, et al. Design of a dual-channel mode locked fiber laser that avoids multi-pulsing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14173-14183.

Integrated Mid-infrared Dual-comb System Based on a Dual-wavelength Laser (Invited)

YANG Mei¹, WEN Qi¹, LIU Tingting¹, YAN Ming^{1,2}, ZENG Heping^{1,2,3}

(1 State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(2 Chongqing Key Laboratory of Precision Optics, Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China)

(3 Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan 250101, China)

Abstract: The mid-infrared dual-comb spectroscopy has innovated the detection of trace gases due to its high resolution, high sensitivity, and short response time. The traditional dual-comb system based on mode-locked lasers, electro-optic modulation or nonlinear optical micro-resonators is always combined with shortcomings of complex structure, high cost, few comb teeth, and poor practicability. In recent years, dual-wavelength mode-locked lasers that allow two asynchronous pulse trains to oscillate simultaneously have attracted increasing attention owing to their great potential in facilitating robust and precise dual-comb spectroscopy. In this paper, with two collimators and a segment of polarization-maintaining fiber acting as a Lyot filter, two asynchronous pulse trains centered at 1 034 nm and 1 039 nm respectively can emit from a single-cavity dual-wavelength laser, which is based on a Nonlinear Amplifying Loop Mirror structure. The repetition rate difference between the dual-wavelength pulses is about 1.18 kHz and the 3 dB spectral width per wavelength is ~ 1.6 nm. The mutual coherence is maintained owing to a shared laser cavity, and common-mode noise is canceled. The radio frequencies of the dual-wavelength pulses are traced and ~ 60 Hz frequency drift of each wavelength is measured within 10 hours yet only a 3.5 Hz frequency shift and 0.45 Hz standard deviation of the repetition rate difference is observed. The difference in magnitude indicates the high coherence and great environmental stability of the dual-wavelength pulses. To demonstrate the coherence between the dual-wavelength pulses, the

multiheterodyne beat notes are detected. Because of the optical spectral overlap, the mode-resolved beat notes with a frequency interval of 1.18 kHz and ~ 25 dB signal-to-noise ratio are observed. Limited by the resolution bandwidth of the spectrum analyzer, the obtained full width at half maximum of each beat note is about 12 Hz. The average power of the seed pulses is scaled up to 1.1 W with a cascade amplifier to avoid excessive spontaneous emission noise and maintain high coherence. Then, the amplified pulses transform into a mid-infrared band by difference frequency generation with a 2 W continuous laser centered at 1 549.315 nm in the periodically polarized lithium niobite crystal. To improve the conversion efficiency, the temperature of the periodically polarized lithium niobite crystal is accurately controlled at 125 °C by high precision temperature control furnace. The power of the generated mid-infrared laser reaches 3.5 mW, and the corresponding spectrum covers more than 50 nm. The spectral width could be expanded by tuning the wavelength of the continuous laser. Moreover, the coherence of the mid-infrared dual-comb is measured and its frequency interval, signal-to-noise ratio and linewidth are consistent with the fundamental dual-comb. According to the Lambert-Beer theory, the absorption intensity of light is proportional to the concentration of the gas molecules and the length of the optical path. Hence, a multi-pass gas cell with an optical path of up to 10 m is employed. The generated mid-infrared laser experiences 50 times of reflection in the gas cell, which can greatly extend the interaction length and is conducive to the detection of trace gases. In a word, we have developed an integrated mid-infrared dual-comb system based on a single-cavity dual-wavelength laser. The two asynchronous pulse trains centered at 1 034 and 1 039 nm with a repetition rate difference of 1.18 kHz can replace the traditional complicated mode-locked lasers and show high coherence due to the suppression of the common-mode noise. The seed pulses are transformed into a mid-infrared band by difference frequency generation in the periodically polarized lithium niobite crystal. The generated mid-infrared dual-comb characteristics are consistent with the fundamental dual-comb. The integrated mid-infrared dual-comb system demonstrated in this paper can provide a potential approach for trace gases detection under complicated conditions.

Key words: Fiber laser; Optical frequency comb; Dual-comb spectroscopy; Mid-infrared; Dual-wavelength mode locking

OCIS Codes: 320.7150; 140.3515; 300.6340; 140.4050