

基于全保偏光纤的宽带宽调谐 DFG 中红外光梳

马挺^{1,2}, 路桥¹, 赵晨亮^{1,2}, 马金栋¹, 毛庆和^{1,2,3*}¹中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 本文报道了一种性能稳定的宽带宽调谐差频产生(DFG)中红外光梳设计方案。采用保偏光纤构建光纤链路, 以确保其性能稳定; 采用自相似光纤放大、光纤孤子压缩及负色散高非线性光纤产生超连续谱等技术, 获得了宽带、弱啁啾和窄脉宽基频脉冲; 通过严格控制双色基频脉冲的空间重叠、时间同步和偏振特性, 仅通过调整硒化镱非线性晶体的相位匹配角和时间同步, 无须改变双色基频频率的光谱特性, DFG 中红外光梳就可以实现宽光谱带宽和宽光谱调谐范围输出。集成封装仪器化的 DFG 中红外光梳的光谱覆盖范围为 7~13 μm , 每个调谐波段的带宽均较宽, 9.5 μm 波段的带宽达到了 2.43 μm ; 7~13 μm 光谱调谐范围内的平均功率都大于 240 μW , 其中 8 μm 波段的平均功率达到了 470 μW 。

关键词 激光器; 光学频率梳; 差频产生; 飞秒脉冲; 中红外光梳

中图分类号 O437 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230539

1 引言

中红外光学频率梳(简称“中红外光梳”)在精密光谱、光频计量、仪器校准等领域^[1-3]具有广泛应用。通过差频产生(DFG)^[4]、光参量振荡^[5]、量子级联激光器^[6]、克尔微腔^[7]、超连续谱(SC)产生^[8]等方法, 均可产生中红外光梳。其中, DFG 技术能够自动消除来自同一台锁模激光器双色基频脉冲的载波包络偏移频率, 只需要锁定重复频率即可获得光梳, 具有锁定方案和结构均简单的优点, 自 2004 年 Keilmann 等^[9]首次报道后迅速得到了研究人员的广泛关注。基于飞秒锁模钛宝石激光器实现的 DFG 中红外光梳的噪声性能优越, 但其造价昂贵、系统复杂。近年来, 锁模光纤激光器及超短脉冲光纤色散非线性调控技术的快速发展^[10], 为高性能基频脉冲提供了灵活可控的产生方法, 基于锁模光纤激光器的光纤型 DFG 中红外光梳得到了广泛研究^[11-13], 该方案也逐渐成为产生中红外光梳的主流技术。

光谱调谐范围和光谱带宽是 DFG 中红外光梳的两项关键指标。例如, 在分子光谱^[14]、气体检测^[15]等实际应用中, 通常要求 DFG 中红外光梳具有宽带和宽调谐等特点, 以实现快速实时的分析检测。其中, DFG 中红外光梳的宽光谱调谐范围通过基频脉冲宽

调谐特性来保证, 而光谱带宽则与晶体相位匹配接收带宽、基频脉冲谱宽等特性相关。参与 DFG 过程的基频脉冲的谱宽越宽、线偏振度越高、携带的啁啾量越小, DFG 中红外光梳的光谱带宽就越宽。对于 5 μm 以下波段的 DFG 中红外光梳, 为克服准相位匹配周期极化铌酸锂晶体相位匹配接收带宽较窄的难题, 人们通过设计周期沿纵向变化的晶体^[16]以及采用级联晶体等方案^[17]来拓宽光梳的光谱带宽。5 μm 以上波段的中红外光梳主要采用理论接收带宽较大的角度相位匹配的晶体, 如 GaSe 晶体, 此时, DFG 中红外光梳的带宽将取决于双色基频脉冲的光谱特性。通常, 基频泵浦脉冲通过对脉冲振荡器输出脉冲直接放大产生, 而基频信号脉冲则通过对振荡器输出脉冲放大压缩后泵浦高非线性光纤(HNLF)产生超连续谱, 再从超连续谱中提取出长波频移孤子来获得。因此, 双色基频脉冲特性与放大器性能直接相关。

尽管宽调谐 DFG 中红外光梳已有很多报道^[18-19], 但受光纤放大器增益带宽的限制, 双色基频脉冲带宽均较窄, 这使得产生的 DFG 中红外光梳带宽不宽。2018 年, 本课题组采用啁啾脉冲光纤放大(CPFA)技术提升脉冲能量, 经光纤压缩后获得了脉宽为 65 fs 的脉冲, 用该脉冲泵浦 HNLF, 获得了 130 nm 的基频信

收稿日期: 2023-02-17; 修回日期: 2023-04-02; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21010300)

通信作者: *mqinghe@aiofm.ac.cn

号脉冲,产生了光谱调谐范围为 $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 、最大带宽为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的DFG中红外光梳^[20]。但是,由于CPFA难以获得比振荡器输出脉宽更窄的脉冲,因此产生的基频信号脉冲带宽不宽,而且非保偏光纤系统易受环境温度、振动变化等因素的影响,经光纤传输的双色基频脉冲难以保持高度稳定的线偏振度,导致处在晶体接收带宽内的基频脉冲光谱成分不能有效参与DFG过程,最终制约了DFG光梳的输出光谱宽度。尽管Sotor等^[21]于2018年就设计出了全保偏光纤系统的DFG中红外光梳,但是,受所用掺铥光纤放大器增益带宽的限制,基频信号脉冲带宽较窄,而且采用的定向图案磷化镓晶体可用周期有限,最终导致获得的DFG光梳的光谱调谐范围和带宽都不宽,分别为 $6\sim 9\ \mu\text{m}$ 和 $460\sim 900\ \text{nm}$ 。2019年,本课题组也报道了^[22]基于全保偏光纤的宽带DFG中红外光梳,通过严格控制双色基频脉冲的偏振态、抑制基频泵浦脉冲啁啾量,获得了光谱调谐范围达 $7\sim 10.5\ \mu\text{m}$ 、最大光谱带宽达 $2.05\ \mu\text{m}$ 的中红外光梳。但该光梳所用非线性脉冲光纤放大技术导致HNLF泵浦脉冲携带了不易压缩的非线性啁啾,制约了超连续谱中长波段频移孤子的带宽,最终限制了DFG光梳的光谱调谐范围和光谱带宽。因此,如何产生具有更宽光谱的基频脉冲,获取更大带宽和更大调谐范围的DFG中红外光梳,进而研制出实用化的光源设备,仍需要进一步深入研究。

本文提出了一种具有高稳定性、宽带、宽光谱调谐范围的DFG中红外光梳的产生方案。在该方案中,所有光纤链路均采用保偏光纤,利用自相似光纤放大和光纤孤子压缩方法获得高功率、窄脉宽、弱啁啾的基频泵浦脉冲和HNLF泵浦脉冲,HNLF泵浦脉冲经

负色散HNLF产生的宽带频移孤子作为基频信号脉冲。通过精确控制双色基频脉冲之间的时间同步和空间重叠,经GaSe晶体差频产生了 $7\sim 13\ \mu\text{m}$ 光谱范围内带宽可调的输出脉冲,其最大光谱宽度可达 $2.43\ \mu\text{m}$;接着通过反馈环路锁定脉冲振荡器的重复频率,获得了稳定输出的光梳。最后采用光电分离方案集成封装光梳系统,研制出了DFG中红外光梳光源样机。

2 光梳结构

图1是笔者设计研制的光纤型DFG中红外光梳的结构示意图。采用全保偏9字腔光纤激光器作为脉冲源,其输出脉冲的中心波长在 $1560\ \text{nm}$ 附近,重复频率为 $100\ \text{MHz}$,单端口输出平均功率为 $22\ \text{mW}$ 。脉冲重复频率经伺服反馈环路锁定在铷原子钟(Rb-clock)上^[23]。为获得宽带、宽调谐范围的DFG中红外光梳,要求双色基频脉冲具有高功率、宽带和弱啁啾等特性^[22]。显然,振荡器输出脉冲不满足双色基频脉冲要求。为此,采用自相似脉冲放大技术^[24],在提升脉冲平均功率的同时获得近线性啁啾脉冲输出,以便于后续的光纤压缩,获得窄脉宽的高功率脉冲。振荡器输出脉冲先经过光滤波器进行滤波整形,滤波后的脉冲经过第一只掺铒光纤放大器(EDFA-1)后,由分光比为3:7的光纤耦合器(OC)分成两路,这两路分别再经EDFA-2和EDFA-3进行自相似光纤放大。这三只EDFA的增益光纤的型号均为Liekkie Er80-4/125-PM,该增益光纤沿慢轴的群速度色散为 $0.03\ \text{ps}^2/\text{m}@1550\ \text{nm}$ 。EDFA-1的增益光纤的长度为 $0.4\ \text{m}$,采用 $980\ \text{nm}$ 的激光二极管(LD)正向泵浦。为使EDFA-2和EDFA-3逼近自相似放大,需要足够长的增益光纤,故而在实验

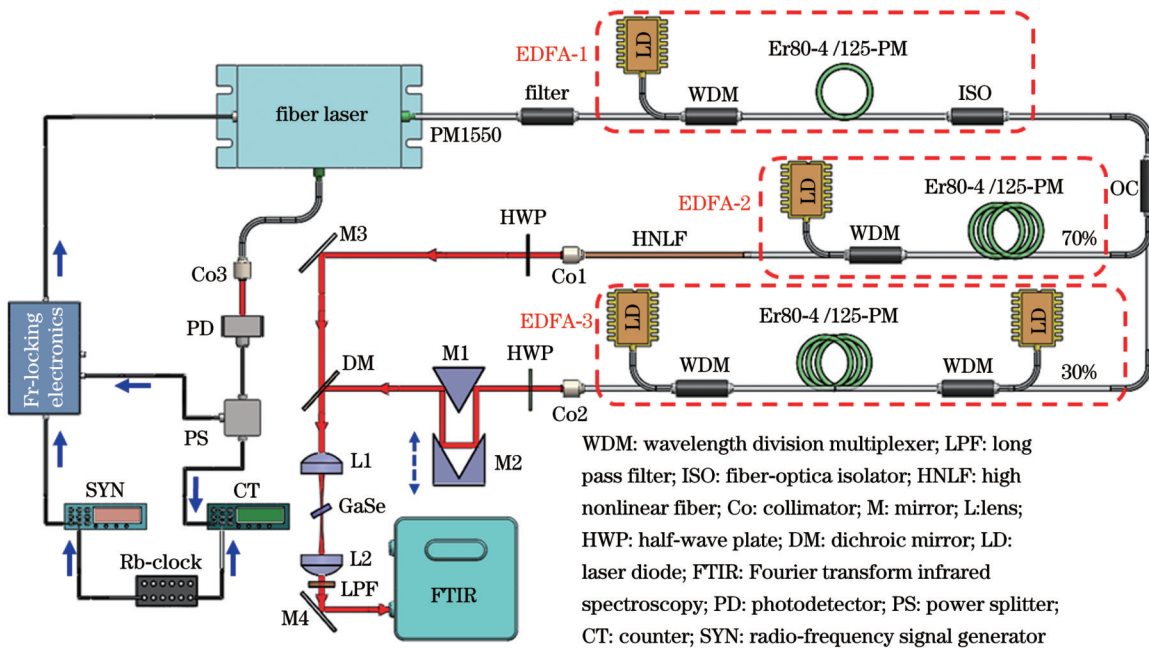


图1 光纤型DFG中红外光梳结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber-type DFG mid-infrared optical comb

中采用了吸收系数很低的 1480 nm 泵浦;为获取更高的输出功率,采用了后向泵浦。同时,为了获得更高的增益系数,增加了吸收系数更高的 980 nm 正向泵浦。基于上述考虑,EDFA-2 的增益光纤的长度为 1.4 m,采用 2 个 1480 nm LD 合束后反向泵浦;EDFA-3 的增益光纤的长度为 1.85 m,采用 2 个 980 nm LD 合束后前向泵浦和 2 个 1480 nm LD 合束后反向泵浦。EDFA-2 和 EDFA-3 的后端均采用 PM1550 光纤进行孤子压缩^[25],以获取窄脉宽、高峰值功率的脉冲。OC 30% 输出端的脉冲经 EDFA-3 放大压缩后用作 DFG 的基频泵浦脉冲;70% 输出的脉冲端经 EDFA-2 放大压缩后用来泵浦负色散保偏高非线性光纤(HNLF-PM,其群速度色散系数为 0.20 ps/(nm·km)@1550 nm,非线性系数为 10.5 W/km),产生超连续谱,在其中提取出长波段频移孤子,用作基频信号脉冲。光纤链路中所有光纤器件尾纤的型号均为 PM1550,其群速度色散为 $-0.022 \text{ ps}^2/\text{m}@1550 \text{ nm}$ 。

光纤链路中传输的双色基频脉冲均由准直器(Co)准直输出,并由消色差半波片(HWP)将基频泵浦脉冲和信号脉冲分别调节为水平和垂直偏振光。为精确实现双色基频脉冲间的时间同步,在 Co2 输出端附近加入了由刀锋直角棱镜反射镜(M1)和可移动空心直角棱镜反射镜(M2)组成的可调延迟线。双色基频脉冲经截止波长为 1800 nm 的双色镜(DM,

Thorlabs DMLP1800)空间合束后,由焦距为 40 mm 的消色差透镜(L1)聚焦到硒化镓(GaSe)晶体。硒化镓晶体的非线性系数约为 $56 \text{ pm}/\text{V}@10.6 \mu\text{m}$,透光波段为 $0.4\sim 20 \mu\text{m}$,尺寸为 $\varnothing 7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,沿 z 方向切割,胶合在铝环中。胶合了铝环的晶体安装在多维调整架上,以对晶体的空间位置、相位匹配角与方位角进行调节。双色基频脉冲经非线性晶体 DFG 后,由长通滤波片(LPF, Edmund Optics)滤除基频光,再经焦距为 40 mm 的 Ge 透镜(L2)准直输出。

3 结果与讨论

3.1 双色基频脉冲

锁模光纤激光器输出特性与重复频率锁定结果如图 2 所示。图 2(a)、(b)分别是由光谱分析仪(OSA, Yokogawa AQ6370D)和频率分辨光逻辑门(FROG, Mesa Photonics MP002)测得的振荡器输出脉冲光谱和色散补偿后的脉冲时域分布,3 dB 光谱带宽为 36.3 nm,经光纤压缩后的脉宽为 65 fs,脉冲时域分布近似为高斯型。图 2(c)是频率计数器记录的锁定后 4 h 的重复频率,其标准偏差为 0.2 mHz。图 2(d)是由图 2(c)中的测量数据计算的环内信号的 Allan 偏差,1 s、100 s 和 1000 s 时的频率稳定度分别为 2.18×10^{-12} 、 1.78×10^{-13} 和 4.82×10^{-14} ,表明锁定结果良好,锁定精度主要受限于铷原子钟的精度^[23]。

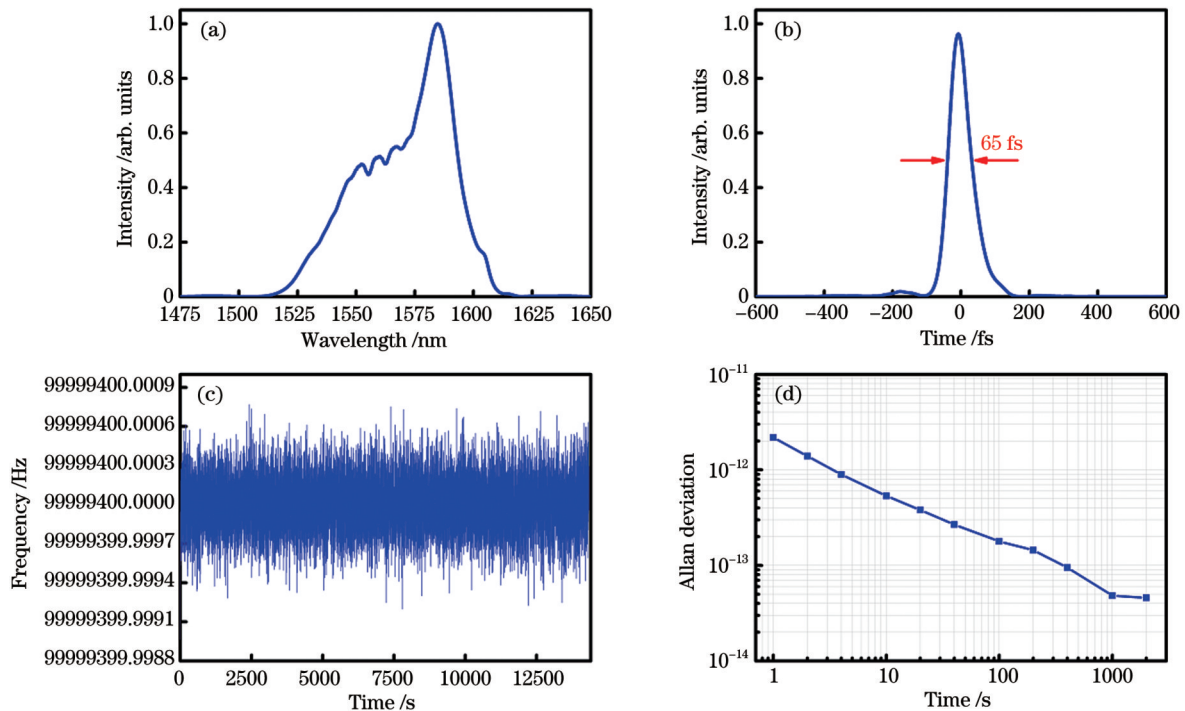


图 2 振荡器输出脉冲特性与重复频率锁定结果。(a) OSA 测得的脉冲光谱;(b) FROG 测得的脉冲压缩后的时域分布;(c) 1 s 采样时间下相位锁定的重复频率的实时抖动;(d) 由(c)中数据计算得到的 Allan 偏差

Fig. 2 Output pulse characteristics and locking results of repetition frequency of the oscillator. (a) Pulse spectrum measured by OSA; (b) time domain distribution of the pulse after compression measured by FROG; (c) real time jitter of phase-locked repetition frequency with sampling time of 1 s; (d) Allan deviation calculated according to the data in Fig. 2(c)

采用图 1 所示的自相似光纤放大链路产生 DFG 所需的波长相隔数百纳米的高峰值功率宽带双色基频脉冲。若振荡器输出脉冲直接作为自相似光纤放大器的输入脉冲,则较宽光谱的输入脉冲在光纤放大过程中易受增益谱形状的影响,不利于快速演化至自相似脉冲。因此,先对振荡器输出脉

冲进行光谱滤波,再利用 EDFA-1 提高其功率,既补偿滤波、分束等造成的损耗,又为后续自相似光纤放大输入脉冲能量提供调整手段。实际选取的滤波器 3 dB 带宽为 12 nm,滤波后脉冲的平均功率为 3 mW,实测 3 dB 谱宽为 12.3 nm,如图 3(a) 中实线所示。

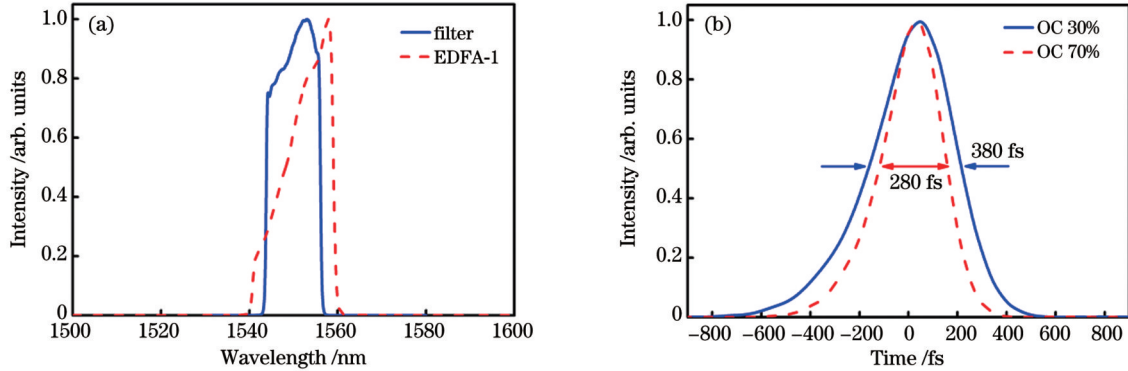


图 3 脉冲预整形结果。(a) 滤波器(实线)滤波和 EDFA-1(短划线)放大后的脉冲光谱;(b) OC 30% 输出端(实线)和 70% 输出端(短划线)的脉冲时域分布

Fig. 3 Results of pulse pre-shaping. (a) Pulse spectra after filtering with filter (solid line) and amplification with EDFA-1 (dashed line); (b) pulse time domain distribution of OC 30% port (solid line) and 70% port (dashed line)

须采取一定措施来确保 EDFA-2 与 EDFA-3 实现自相似放大。对于给定的输入脉冲谱宽,脉冲的能量、脉宽及预啁啾大小是影响其自相似演化速度的关键因素^[26]。因此,通过调控 EDFA-1 的泵浦光功率来调控 EDFA-2 与 EDFA-3 的输入脉冲能量,再在给定输入脉冲能量的基础上,进一步优化 EDFA-1 和 EDFA-2、EDFA-3 之间的光纤链路长度,将在适宜的压缩光纤长度下获得的最佳可压缩性输出脉冲作为判据,判定 EDFA-2 与 EDFA-3 是否对输入脉冲实现了自相似放大。将 EDFA-2 后向泵浦功率固定为 1.2 W, EDFA-3 的前向和后向泵浦功率分别固定为 0.5 W 和 1.2 W,经一系列优化实验后发现:当 EDFA-1 的泵浦功率为 0.18 W 时,其平均输出脉冲功率为 21 mW[图 3(a) 中短划线为输出脉冲光谱,光谱平滑无调制,表明 EDFA-1 在放大过程中的自相位调制等非线性效应极

弱],经分光比为 3:7 的 OC 分为两路的脉冲能量分别为 0.06 nJ 和 0.14 nJ;在 0.06 nJ 和 0.14 nJ 输入脉冲能量下,当将 EDFA-1 和 EDFA-2、EDFA-3 之间的光纤链路长度分别调整为 1.1 m 和 1.15 m 时,EDFA-2 和 EDFA-3 的输入脉冲宽度分别为 280 fs 和 380 fs[如图 3(b) 所示],这时,采用 0.60 m 和 0.65 m 长的压缩光纤可使 EDFA-2 和 EDFA-3 的输出脉冲得到最佳压缩,脉宽分别为 38 fs 和 45 fs,如图 4(a) 所示。放大后的脉冲的可压缩性能良好,表明两只光纤放大器基本实现了对输入脉冲的自相似放大。图 4(b) 是经 EDFA-2 和 EDFA-3 中的光纤压缩后的光谱。实测 EDFA-2 和 EDFA-3 输出脉冲的平均功率分别高达 338 mW 和 485 mW,对应的单脉冲能量分别为 3.38 nJ 和 4.85 nJ。

由 EDFA-3 输出并经压缩后的 485 mW、45 fs 脉冲直接用作基频泵浦脉冲;由 EDFA-2 输出压缩后的

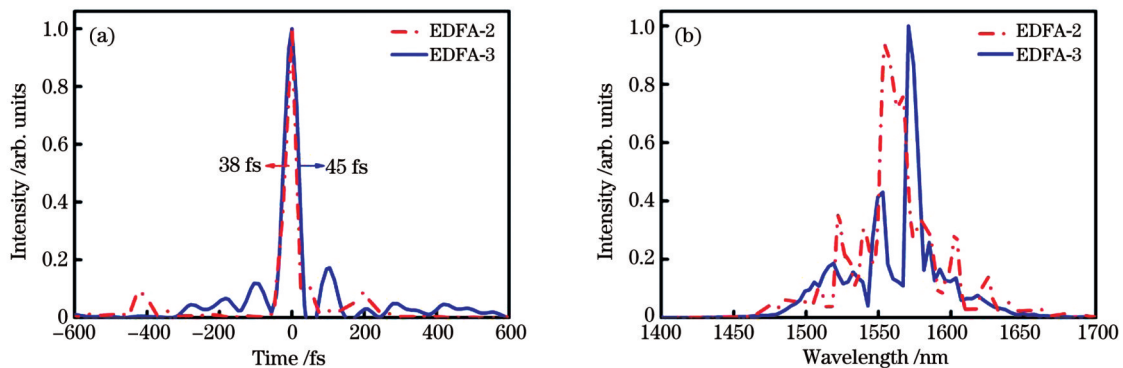


图 4 EDFA-2 和 EDFA-3 的输出脉冲特性。(a) EDFA-2 和 EDFA-3 输出脉冲的时域分布;(b) EDFA-2 和 EDFA-3 输出脉冲的光谱
Fig. 4 Output pulse characteristics of EDFA-2 and EDFA-3. (a) Time domain distribution of EDFA-2 and EDFA-3 output pulses; (b) spectra of EDFA-2 and EDFA-3 output pulses

338 mW、38 fs 脉冲则用作 HNLFP-PM 的泵浦脉冲,产生超连续谱,再从中提取出长波段孤子基频信号脉冲。为获得覆盖 8~14 μm 大气窗口的光梳,通过优化 HNLFP-PM 的长度来调控超连续谱中长波段频移孤子的光谱位置。最终选择的 HNLFP-PM 长度约为 10 cm,获得的超连续谱如图 5(a)所示。这样就可以提取出中心波长位于 1.85 μm 附近的长波段孤子基频信号脉冲。从图 5(a)可以看出,1.85 μm 附近有明显的基阶孤子峰,其 3 dB 带宽约为 250 nm,对应的变换限制孤子脉冲宽度约为 15 fs。该宽带窄脉宽孤子脉冲可用作基频信号脉冲。

采用光束质量分析仪(Coherent, BM-7)探测双色基频脉冲光束的空间位置,调节图 1 中 M3 和 DM 的位置与角度,实现双色基频脉冲光束的空间重叠。通过改变空间光程差来弥补光纤链路引入的双色基频脉冲

之间的光程差,并结合调节可调延迟线来精细调控双色基频脉冲的时间同步。图 5(b)是自相关仪测得的双色基频脉冲具有不同时域间隔时的结果。可见,通过调节可调延迟线可将双色基频脉冲之间的时域间隔由 35.60 ps 变为 20.35 ps,并最终在时域上实现“同步”。值得注意的是,由于探测器响应波段的原因,这里所测的“同步”是基频泵浦脉冲与超连续谱中 1560 nm 波段之间的情况。而实际上,超连续谱中 1560 nm 波段与长波段频移孤子(即基频信号脉冲)之间也存在时间延迟,且时间延迟值与 HNLFP-PM 的色散系数、长度有关,但这种时间延迟在延迟线可调谐范围之内(延迟线最大可调 165 ps),在后续 DFG 过程中只需要小范围调节可调延迟线即可。经聚焦透镜 L1 聚焦后,基频泵浦脉冲、信号脉冲的光斑直径分别为 50 μm 和 75 μm ,然后将 GaSe 晶体放置在 L1 焦点位置处。

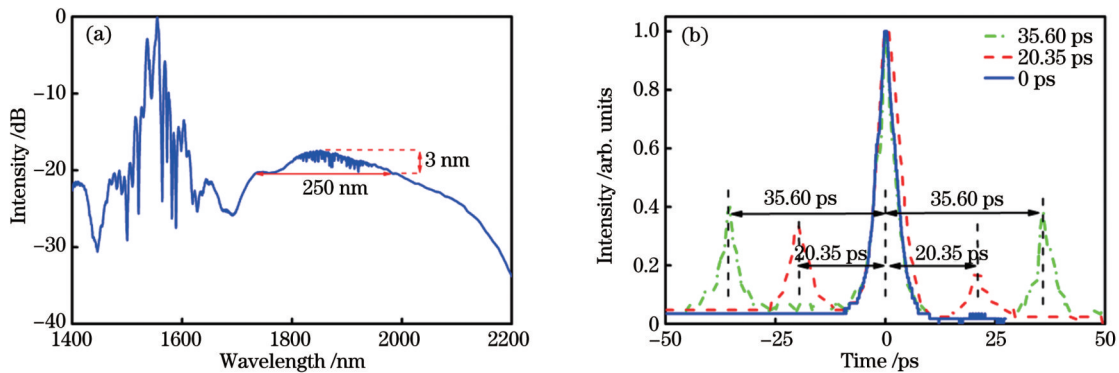


图 5 负色散 HNLFP-PM 产生的超连续谱以及双色基频脉冲的时域同步特性。(a) OSA 所测超连续谱;(b) 自相关仪所测双色基频脉冲时域间隔为 35.60、20.35、0 ps 时的自相关曲线

Fig. 5 SC generated by negative dispersion HNLFP-PM and time domain synchronization characteristics of bicolor fundamental frequency pulses. (a) SC measured by OSA; (b) autocorrelation curves of two-color fundamental frequency pulses measured by autocorrelator with time interval of 35.60, 20.35, 0 ps, respectively

3.2 样机的研制与测试

将上述时间同步、空间重叠的双色基频脉冲通入 GaSe 晶体,微调晶体相位匹配角和时间延迟线,就能获得宽带调谐的 DFG 输出,进而将其集成封装成仪器化的光梳,就可满足实际应用需求。为此,笔者在样机研制过程中采用了光电分离的封装方案,双色基频脉冲在光学机箱中生成,封装过程中光纤链路均无须断开,不会对已产生的双色基频脉冲特性产生影响,即使集成封装过程中造成了空间光路的微小变化,亦可通过 2.1 节所述调整方法完美复现。图 6 是集成封装后的工程样机。光学模块主要包括泵浦单元、光纤链路、空间光路三部分,统一集成在尺寸为 85 cm \times 75 cm \times 20 cm 的光学机箱内。泵浦单元分为上下两层,用于放置系统所需 LD 及其安装底座,整体位于机箱后面板上,以便于统一开孔走线与电学机柜连接。光纤链路采用卡扣盘绕在尺寸为 20 cm \times 20 cm \times 4 cm 的铝盒内,光纤器件均用硅胶固定在铝盒底面上,光纤链路中的所有熔接点均进行涂覆热塑处理,以增加光

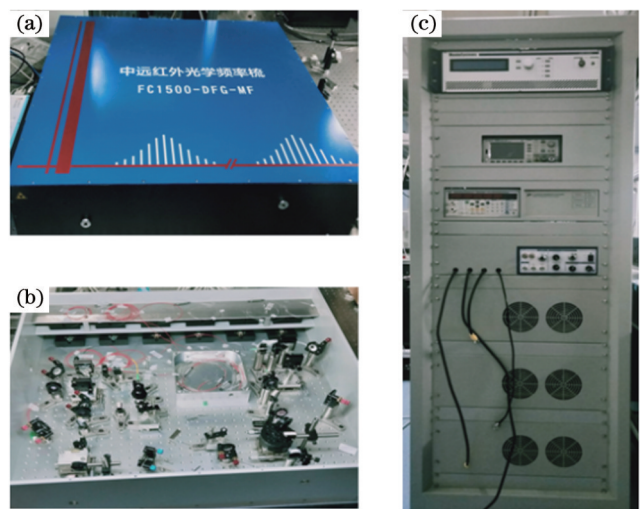


图 6 DFG 中红外光梳样机。(a) 光学模块机箱;(b) 光学机箱内部结构;(c) 电学模块机柜

Fig. 6 DFG mid-infrared comb prototype. (a) Optical module chassis; (b) internal structure of the optical chassis; (c) electrical module cabinet

纤熔接点的机械强度。采用带锁紧的光学调整架安装光学镜片,以保证空间光路长期稳定。电学模块主要包括泵浦控制器、重复频率锁定电学器件及测试仪器,这些器件均放置在定制的电学机柜中,机柜尺寸为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 160\text{ cm}$ 。

通过调节安装 GaSe 晶体的多维调整架,可以方便地改变晶体的方位角和相位匹配外角。当方位角和相位匹配外角分别调整到 30° 和 35° 时,精细调节可调延迟线,利用 LPF 滤除剩余的基频光后,就可以在机箱外对经 L2 准直输出的光梳特性进行测试。图 7(a) 为微调晶体相位匹配角及可调延迟线过程中,采用傅里叶变换光谱仪 (FTIR, Nicolet iS50) 和热释电探测器 (SPI-D-50) 分别测得的 DFG 光梳光谱和平均功率 (实测时所用采样频率为 10 Hz)。可见,差频光中心波长可在 $8.0\sim 10.5\ \mu\text{m}$ 范围内连续调谐,光谱覆盖范围为 $7\sim 13\ \mu\text{m}$,每个调谐波段的带宽都大于 $1\ \mu\text{m}$, $9.5\ \mu\text{m}$ 波段带宽达到了 $2.43\ \mu\text{m}$,优于本课题组的前期实验结果^[20,22]。这表明更宽的基频信号脉冲拓展了 DFG 光梳的光谱调谐范围和带宽。每个调谐波段的平均功率

都大于 $240\ \mu\text{W}$ (已扣除功率测量中的本底噪声),其中, $8\ \mu\text{m}$ 调谐波段的平均功率达到了 $470\ \mu\text{W}$ 。若将 L1、L2 替换为离轴抛物面镜,使聚焦后的光斑更小,则有望进一步提升 DFG 中红外光梳的输出功率。尽管如此,所得 DFG 光梳的功率依然相对较低^[21],这主要是因为 GaSe 晶体表面未镀增透膜导致了较大的基频光反射损耗,本课题组正在针对这一不足进行研究。此外,对光梳样机输出功率的稳定性也进行了测试,图 7(b) 是在 1 h 内记录的 DFG 光梳样机输出在 $10\ \mu\text{m}$ 中心波长附近的功率波动,平均功率波动小于 1.5% (造成功率波动的原因之一可能是外界环境振动等引起的双色基频脉冲之间的时延波动),这表明光梳功率稳定性较好。本课题组对光梳样机的开关机复现性和长期稳定性进行了跟踪测试,车载运输至外地后仍能正常开机,且输出性能未发生变化,一年内性能仍保持稳定。由此可见,仅通过调整相位匹配角和时间同步,无须改变双色基频脉冲的光谱特性,DFG 中红外光梳样机就可以实现宽光谱带宽和宽光谱调谐范围输出。

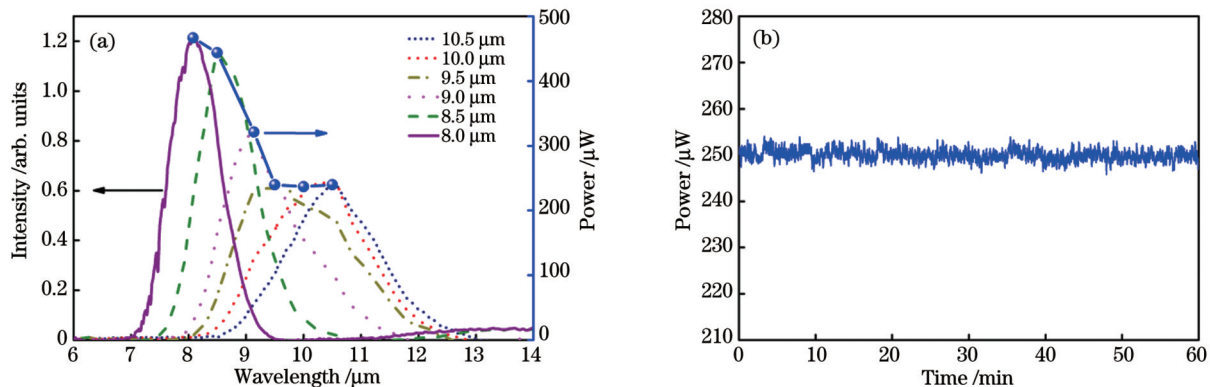


图 7 DFG 中红外光梳样机的测试结果。(a) 实测调谐光谱与平均功率;(b) 实测 1 h 内的差频光功率

Fig. 7 Test results of DFG mid-infrared comb prototype. (a) Measured tuning spectra and average power; (b) measured difference frequency optical power within 1 h

4 结 论

本课题组自主设计研制了一种性能稳定的具有宽带、宽调谐范围的 DFG 中红外光梳。光纤链路采用全保偏光纤设计,通过锁定脉冲源的重复频率,利用自相似光纤放大、孤子压缩以及超连续谱产生等技术,获得了中心波长分别位于 $1.57\ \mu\text{m}$ 和 $1.85\ \mu\text{m}$ 附近的双色基频脉冲。采用可调延迟线精确控制双色基频脉冲的时间同步,并严格调控双色基频脉冲的空间重叠,利用 GaSe 非线性变频晶体,经 DFG 过程,获得了 DFG 中红外光梳输出。集成封装仪器化后的中红外光梳的光谱覆盖范围可达 $7\sim 13\ \mu\text{m}$,最大光谱带宽为 $2.43\ \mu\text{m}$ 。该 DFG 中红外光梳设计和研制技术对于发展满足波长校准、多组分气体检测等实际应用的光梳具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Malara P, Maddaloni P, Gagliardi G, et al. Absolute frequency measurement of molecular transitions by a direct link to a comb generated around $3\text{-}\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2008, 16(11): 8242-8249.
- [2] Galli I, Bartalini S, Borri S, et al. Molecular gas sensing below parts per trillion: radiocarbon-dioxide optical detection[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(27): 270802.
- [3] Muraviev A, 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(7): 209-214.
- [4] 冯玺, 张兆伟. 基于差频技术的宽谱中红外飞秒激光的产生[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101018.
Feng X, Zhang Z W. Broadband mid-infrared light based on difference frequency generators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101018.
- [5] Adler F, Cossel K C, Thorpe M J, et al. Phase-stabilized, 1.5 W frequency comb at $2.8\text{-}4.8\ \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1330-1332.

- [6] Hugi A, Villares G, Blaser S, et al. Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser[J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 229-233.
- [7] Wang C Y, Herr T, Del'Haye P, et al. Mid-infrared optical frequency combs at 2.5 μm based on crystalline microresonators[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1345.
- [8] Guo H R, Herkommer C, Billat A, et al. Mid-infrared frequency comb via coherent dispersive wave generation in silicon nitride nanophotonic waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(6): 330-335.
- [9] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [10] 周佳琦, 潘伟巍, 张磊, 等. 非线性环路反射镜锁模光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508013.
Zhou J Q, Pan W W, Zhang L, et al. Research advances in mode-locked fiber lasers based on nonlinear loop mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508013.
- [11] Ruehl A, Gambetta A, Hartl I, et al. Widely-tunable mid-infrared frequency comb source based on difference frequency generation[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2232-2234.
- [12] Churin D, Kieu K, Norwood R A, et al. Efficient frequency comb generation in the 9 μm region using compact fiber sources[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2271-2274.
- [13] Novák O, Krogen P R, Kroh T, et al. Femtosecond 8.5 μm source based on intrapulse difference-frequency generation of 2.1 μm pulses[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1335-1338.
- [14] Gambetta A, Ramponi R, Marangoni M. Mid-infrared optical combs from a compact amplified Er-doped fiber oscillator[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2671-2673.
- [15] Keilmann F, Amarie S. Mid-infrared frequency comb spanning an octave based on an Er fiber laser and difference-frequency generation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(5): 479-484.
- [16] Zhou L, Liu Y, Lou H P, et al. Octave mid-infrared optical frequency comb from Er: fiber-laser-pumped aperiodically poled Mg:LiNbO₃[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6458-6461.
- [17] Zhang Z W, Feng X, Shi J Q, et al. Broadband mid-infrared coherent light source from fiber-laser-pumped difference frequency generators based on cascaded crystals[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14310-14318.
- [18] Lee K F, Hensley C J, Schunemann P G, et al. Midinfrared frequency comb by difference frequency of erbium and thulium fiber lasers in orientation-patterned gallium phosphide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17411-17416.
- [19] Su X Y, Zhu R X, Wang B L, et al. Generation of 8–20 μm mid-infrared ultrashort femtosecond laser pulses via difference frequency generation[J]. *Photonics*, 2022, 9(6): 372.
- [20] 马金栋, 吴浩煜, 路桥, 等. 基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳[J]. *物理学报*, 2018, 67(9): 094207.
Ma J D, Wu H Y, Lu Q, et al. Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(9): 094207.
- [21] Sotor J, Martynkien T, Schunemann P G, et al. All-fiber mid-infrared source tunable from 6 to 9 μm based on difference frequency generation in OP-GaP crystal[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11756-11763.
- [22] Ma J D, Lu Q, Duan D, et al. A broadband infrared DFG optical comb using all-PM nonlinear pulse fiber amplification technique[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(6): 439-442.
- [23] 吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601008.
Wu H Y, Shi L, Ma T, et al. Design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601008.
- [24] Fermann M E, Kruglov V I, Thomsen B C, et al. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6010-6013.
- [25] Luo H, Zhan L, Zhang L, et al. Generation of 22.7-fs 2.8-nJ pulses from an erbium-doped all-fiber laser via single-stage soliton compression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(17): 3780-3784.
- [26] Zhao J, Li W X, Wang C, et al. Pre-chirping management of a self-similar Yb-fiber amplifier towards 80 W average power with sub-40 fs pulse generation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32214-32219.

Mid-Infrared DFG Comb with Broadband and Wide Tunable Range Based on All Polarization-Maintaining Fibers

Ma Ting^{1,2}, Lu Qiao¹, Zhao Chenliang^{1,2}, Ma Jindong¹, Mao Qinghe^{1,2,3*}

¹Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract

Objective Mid-infrared optical frequency combs are widely used in precision spectroscopy, optical frequency metrology, instrument calibration, and other fields. Fiber-type dual-arm structure difference frequency generation (DFG) mid-infrared combs based on mode-locked fiber lasers are currently the primary technology for generating mid-infrared combs. The spectral tuning range and spectral bandwidth are two key indicators of DFG mid-infrared combs. The spectral tuning range is ensured by the wide tuning range of the fundamental frequency pulse, and the spectral bandwidth is associated with the crystal phase-matching acceptance bandwidth and the spectral width of the fundamental frequency pulse. Generally, the fundamental frequency pump pulse is generated by directly amplifying the oscillator output pulse, whereas the fundamental frequency signal pulse is obtained by amplifying and compressing the output pulse of the oscillator and then pumping a highly nonlinear fiber (HNLF) to generate long-wave frequency shift solitons. Although many reports on wide-tunable DFG mid-infrared combs exist, the bandwidth of two-color fundamental frequency pulses is narrow, owing to the limitation of the gain bandwidth of fiber amplifiers, and thus limits the bandwidth of the generated DFG

mid-infrared combs. Therefore, the generation of a fundamental frequency pulse with a wider spectrum to obtain DFG mid-infrared combs with larger bandwidths and tuning ranges as well as the design and development of a practical light source device requires further research.

Methods A fully polarization-maintaining 9-cavity fiber laser was used as the pulse source, and the repetition frequency was locked to the rubidium atomic clock through a servo feedback loop. The output of the oscillator was filtered and shaped and further divided into two paths using an optical coupler (OC) after erbium-doped fiber amplification (EDFA-1). It was then amplified by self-similarity fiber amplifiers EDFA-2 and EDFA-3. The EDFA-3 output pulse after being compressed serves as fundamental frequency pump pulse, the EDFA-2 output pulse after being compressed was used to pump HNLF to generate a supercontinuum (SC), and the frequency-shifted solitons were extracted as the fundamental frequency signal pulse. The two-color fundamental frequency pulses were output through the collimator (Co) collimation space, and the polarization state was adjusted by half-wave plates. The mirrors (M) of M1 and M2 were added to the collimator-2 output port to form a time delay line for adjusting the time synchronization of the two-color fundamental frequency pulses. After the two-color fundamental frequency pulses were combined by a dichroic mirror (DM), they were focused on a GaSe crystal by a lens (L1) with a 40 mm focal length to generate a DFG mid-infrared comb. The comb output by L2 collimation after the fundamental frequency light was filtered by a long pass filter (LPF) (Fig. 1). The integration and packaging of the optical combs were performed using a photoelectric separation method.

Results and Discussions The average power of the fundamental frequency pump pulse is 485 mW, the center wavelength is 1.57 μm [Fig. 4(b)], and the pulse width is 45 fs [Fig. 4(a)]. The central wavelength of the fundamental frequency signal pulse is 1.85 μm , and the bandwidth is 250 nm [Fig. 5(a)]. The optical comb system was integrated and packaged by photoelectric separation packaging, and a prototype was prepared (Fig. 6). The measured center wavelength of the difference frequency light was continuously tuned in the 8.0–10.5 μm range. The bandwidth of each tuning band obtained is greater than 1 μm , and the bandwidth of the 9.5 μm band reaches 2.43 μm , indicating that the wider fundamental frequency signal pulse expands the spectral tuning range and bandwidth of the DFG comb. The average power of each tuning band is greater than 240 μW , and the average power of the band with an 8 μm central wavelength reaches 470 μW [Fig. 7(a)]. The average power fluctuation is less than 1.5%, indicating that the power stability of the optical comb is excellent [Fig. 7(b)].

Conclusions We independently designed and developed a stable broadband and wide tuning range DFG infrared comb. The fiber link was designed with full polarization-maintaining fiber. By locking the repetition frequency of the pulse source and using technologies such as self-similar fiber amplification, soliton compression, and SC generation, the two-color fundamental frequency pulses with center wavelengths of approximately 1.57 μm and 1.85 μm were obtained. An adjustable time delay line was used to precisely control the time synchronization of the two-color fundamental frequency pulses, and the spatial overlap of the two-color fundamental frequency pulses was strictly regulated. Using a GaSe nonlinear variable frequency crystal, the DFG mid-infrared comb output was obtained through the DFG process. The integrated and packaged instrumented mid-infrared comb has a spectral coverage of 7–13 μm and a maximum spectral bandwidth of 2.43 μm . The design and development of the DFG mid-infrared optical comb offers a base for the development of optical combs for practical applications such as wavelength calibration and multi-component gas detection.

Key words lasers; optical frequency comb; difference frequency generation; femtosecond pulse; mid-infrared optical comb