

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳

马金栋 吴浩煜 路桥 马挺 时雷 孙青 毛庆和

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

Ma Jin-Dong Wu Hao-Yu Lu Qiao Ma Ting Shi Lei Sun Qing Mao Qing-He

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 094207 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[等离子体光栅靶的表面粗糙度对高次谐波产生的影响](#)

Effect of plasma grating roughness on high-order harmonic generation

物理学报.2017, 66(24): 244209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244209>

[基于半解析自洽理论研究相对论激光脉冲驱动下阿秒 X 射线源的产生](#)

Attosecond X-ray generation driven by the relativistic laser pulse based on the semi-analytical self-consistent theory

物理学报.2017, 66(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204205>

[基于固体薄片超连续飞秒光源驱动的高次谐波产生实验](#)

High harmonic generation experiments based on solid-state supercontinuum

物理学报.2017, 66(13): 134207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134207>

[吸收多个远紫外光子生成的高次谐波的多重截止结构](#)

Multiple cutoffs in high harmonic generation via multi-XUV-photon absorption

物理学报.2016, 65(22): 224206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224206>

[分子轨道高时空分辨成像](#)

Molecular orbital imaging with high spatial and temporal resolutions

物理学报.2016, 65(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224207>

# 基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的 差频产生红外光梳\*

马金栋<sup>1)2)</sup> 吴浩煜<sup>2)</sup> 路桥<sup>2)</sup> 马挺<sup>2)</sup> 时雷<sup>2)</sup> 孙青<sup>3)</sup> 毛庆和<sup>2)1)†</sup>

1) (中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)

2) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件重点实验室, 合肥 230031)

3) (中国计量科学研究院, 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029)

(2017年11月22日收到; 2018年1月1日收到修改稿)

报道了一种基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的光纤型差频产生 (DFG) 红外光梳及其研制技术. 基于自主研发的重频锁定 200 MHz 飞秒锁模掺铒光纤激光器, 经啁啾脉冲光纤放大与超连续谱产生技术, 优化近零色散 OFS 光纤 (型号: OFS-980-20) 长度, 结合可调延时线, 获得了精准同步的基频双色脉冲; 以 GaSe 为非线性晶体, 利用光整流技术, 产生了可在 6—10  $\mu\text{m}$  范围内宽带调谐的 DFG 红外光梳, 光梳最大光谱宽度可达 1.3  $\mu\text{m}$ . 这种光纤型远红外光梳可望在分子光谱精密测量等领域发挥重要作用.

**关键词:** 光梳, 差频产生, 光纤激光器, 中远红外

**PACS:** 42.62.Eh, 42.65.Ky, 42.55.Wd, 42.72.Ai

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172503

## 1 引言

光学频率梳 (optical frequency comb, OFC) 简称光梳, 是一种新型高品质激光源, 时域为等间隔超短脉冲序列, 频域为等间距梳齿线<sup>[1]</sup>. 基于飞秒锁模钛宝石激光器和掺铒或掺镱光纤激光器的光梳正趋于成熟, 其光谱范围处在可见和近红外波段, 并在光频计量、光原子钟、时频传递、精密激光光谱等领域开始发挥重要作用<sup>[2-4]</sup>. 众所周知, 中远红外波段集中了大量分子的基带吸收线<sup>[5,6]</sup>, 为满足物质结构与成分分析的需要, 近年来, 人们正在大力发展中远红外波段光梳, 并提出了多种直接产生中远红外光梳的技术方案<sup>[7-9]</sup>, 期望通过包括傅里叶光谱<sup>[10]</sup>、腔衰荡光谱<sup>[11]</sup>和双光梳光谱<sup>[12]</sup>等新型光谱技术来实现比近红外波段更高灵敏度的光谱分析. 例如, 2010年, Hänsch 研究组<sup>[13]</sup>构

建出了基于锁模  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器的 2.5  $\mu\text{m}$  波段光梳; 2012年, Hugi 等<sup>[14]</sup>设计出基于量子级联激光器的 7  $\mu\text{m}$  波段光梳; 2013年, Wang 等<sup>[15]</sup>则采用连续光抽运氟化镁微腔获得了 2.5  $\mu\text{m}$  波段光梳. 这些产生红外光梳的方案简单直接, 但是, 受增益介质等因素的限制, 光梳光谱范围相对较窄, 难以满足精密激光光谱探测等应用需求. 因此, 人们仍然在致力于采用传统光参量振荡 (OPO) 和差频产生 (DFG) 技术来获取中远红外光梳.

采用近红外光梳抽运, 基于周期极化铌酸锂晶体的 OPO 技术, 已可获取 2.8—4.8  $\mu\text{m}$  的中红外光梳<sup>[16]</sup>. 但是, 在 OPO 红外光梳方案中, 以近红外光梳为抽运光时, 须严格调控 OPO 腔来锁定红外光梳重复频率和载波包络偏移频率<sup>[16,17]</sup>, 导致结构与锁定均极为复杂. 另一方面, 由于光整流技术可自动消除来自同一激光源的基频双色脉冲所产生的差频光载波包络偏移频率, 使得由 DFG 技术产

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61377044, 61250017)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB934304) 和中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (批准号: XDB21010300) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

生中远红外光梳所需的相位锁定大为简化<sup>[18]</sup>, 从而更受人们重视. 最初, 人们利用重复频率锁定的飞秒锁模钛宝石激光器, 通过双波长<sup>[19]</sup>或宽带<sup>[20]</sup>运转来获取同步的基频双色脉冲, 进而由光整流产生出DFG红外光梳. 基于钛宝石激光器的DFG红外光梳噪声性能优越, 但系统复杂、价格昂贵. 随着飞秒锁模光纤激光器的发展, 人们已可构建基于飞秒锁模光纤激光器的紧凑型DFG红外光梳. 例如, 2008年, Gambetta等<sup>[21]</sup>基于商用飞秒锁模掺铒光纤激光器, 利用GaSe晶体的DFG过程, 产生了5—12 μm内可调谐的红外光梳; 2012年, Keilmann研究组<sup>[22]</sup>将DFG红外光梳的可调范围扩展至4—17 μm. 在国内, 天津大学和浙江大学科研人员在基于固体和光纤激光基频光的DFG中远红外脉冲激光方面也做了许多工作<sup>[23,24]</sup>, 也有多家科研机构研制出了基于飞秒锁模光纤激光器的近红外光梳<sup>[25—27]</sup>, 但是, 迄今还未见有关利用飞秒锁模光纤激光器产生光整流所需同步双色脉冲, 进而获得可调谐的宽带DFG红外光梳的研究报道, 而

中远红外光梳在高灵敏度光谱分析领域具有极其重要的应用价值, 亟待研究解决.

本文针对中远红外分子光谱精密分析、大气环境检测等领域的应用需求, 采用自主研发的重频锁定飞秒锁模掺铒光纤激光器, 经啁啾脉冲光纤放大与超连续(SC)谱产生链路, 获取了DFG所需的重复频率相同的基频双色脉冲; 通过采用光纤链路补偿和可调光延时线, 实现了基频双色脉冲之间的精确同步, 基于GaSe晶体的DFG技术, 获得了可在6—10 μm光谱内任意调谐的远红外DFG光梳, 光梳最大光谱宽度达到1.3 μm.

## 2 DFG 光梳结构

图1为我们设计的基于锁模掺铒光纤激光器产生基频双色脉冲的DFG红外光梳结构示意图. 飞秒脉冲振荡器为自主研发的基于非线性偏振旋转(NPR)锁模的色散管理孤子光纤激光器, 其输出脉冲中心波长约1550 nm, 3 dB谱宽70 nm, 重复

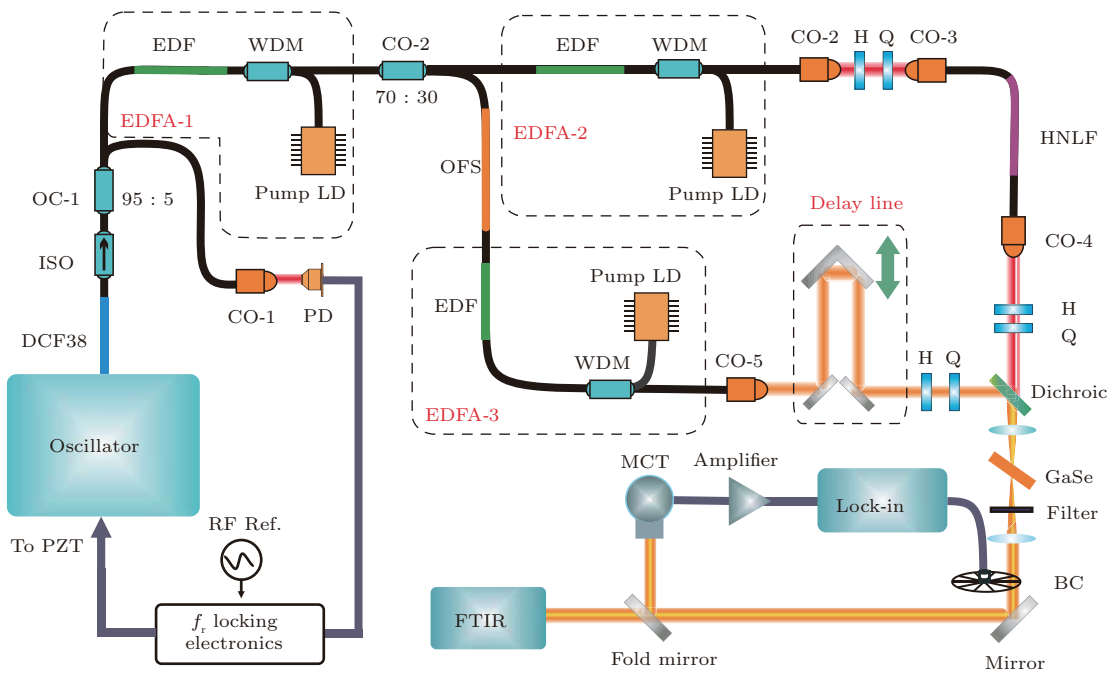


图1 光纤型DFG红外光梳结构图(PZT, 压电陶瓷; PD, 光电探测器; ISO, 光隔离器; WDM, 波分复用器; LD, 激光二极管; OC, 光纤耦合器; EDF, 掺铒光纤; HNLF, 高非线性光纤; CO, 准直器; H, 半波片; Q, 四分之一波片; DM, 双色镜; LPF, 长通滤波片; BC, 光学斩波器; M, 反射镜; FM, 折叠镜; MCT, 碲镉汞探测器; BC, 制动斩波器; Lock-in, 锁相放大器; FTIR, 傅里叶红外光谱仪)

Fig. 1. Schematic diagram of the fiber-type far-infrared optical frequency comb with DFG technique (PZT, piezoelectric transducer; PD, photo-detector; ISO, fiber-optic isolator; WDM, wavelength-division-multiplexer; LD, laser diode; OC, optical fiber coupler; EDF, Er-doped fiber; HNLF, high nonlinear fiber; CO, collimator; H, half-wave plate; Q, quarter-wave plate; DM, dichroic mirror; M, mirror; FM, fold mirror; BC, beam-chopper; MCT, mercury cadmium telluride; BC, brake chopper; Lock-in, lock-in amplifiers; FTIR, Fourier transform infrared spectrometer).

频率 200 MHz, 经光纤压缩后脉宽约 67 fs, 平均功率为 107 mW. 该激光器用来产生 DFG 的基频双色脉冲. 当该双色脉冲同步时, 光整流效应可自动消除差频脉冲的载波包络相移, 因此, 我们只将光纤激光器的重复频率锁定. 为此, 将激光器输出脉冲经隔离器 (ISO) 和功率耦合比 95 : 5 的光纤耦合器 (OC-1) 分为两路, 在 5% 端口处探测出重复频率, 将其 4 次谐波锁定到商用铷钟 (SRS MODEL FS725), 锁定后实测的重复频率标准偏差约 0.7 mHz<sup>[28]</sup>.

OC-1 的 95% 输出端口的飞秒脉冲经掺铒光纤放大器 (EDFA-1) 后, 用于产生基频双色脉冲. EDFA-1 增益光纤为 46 cm 长的掺铒光纤 (EDF80, OFS), 由 500 mW, 980 nm 的 LD 反向抽运, 将脉冲序列平均功率提升至 160 mW, 再经 70 : 30 的 OC-2 分为两路, 分别由 EDFA-2 和 EDFA-3 来提升功率. 为抑制光纤放大器中非线性积累, 在 ISO 前接入了一段 1.8 m 的色散补偿光纤 (DCF38, Thorlabs), 该 DCF 光纤色散为 0.046 ps<sup>2</sup>/m @1550 nm, 以将脉宽展宽至 1.7 ps. EDFA-1 中掺铒光纤也为正色散 ( $\beta_2 = 0.058$  ps<sup>2</sup>/m @1550 nm), 使得脉冲可在该光纤放大器中进一步展宽脉宽, 抑制光纤中的非线性.

OC-2 的 70% 输出端脉冲平均功率约 106 mW, 由 EDFA-2 放大后为 340 mW, EDFA-2 的掺铒光纤 (Er80-8/125, Liekki) 长 70 cm, 由 1 W, 980 nm 的 LD 反向抽运, 放大后的脉冲经 92 cm 单模光纤 (SMF-28) 压缩, 脉宽降至约 65 fs. 以该 65 fs 脉冲抽运 30 cm 长保偏高非线性光纤 (HNLFP-PM, OFS), 产生 SC 谱, 用来提取 DFG 所需基频信号脉冲. 为提高 SC 的相干性, 在该 HNLFP 之前安插了四分之一波片和半波片以调控 SC 抽运脉冲的偏振态; 为补偿掉 HNLFP 可能引起的退偏, 在其后端再安插了另一组四分之一波片和半波片, 以调节 DFG 基频信号脉冲的偏振态<sup>[28]</sup>.

OC-2 的 30% 输出端平均功率约 46 mW, 由 EDFA-3 放大后为 150 mW, EDFA-3 使用的器件与 EDFA-2 相同, 仅增益光纤长度改为 45 cm, 反向抽运所用 980 nm LD 的功率为 500 mW, 经单模光纤压缩后的脉宽约 73 fs. 该脉冲序列由安插在延迟线和双色镜之间的四分之一波片和半波片调节偏振态, 用作 DFG 的基频抽运脉冲.

产生的基频信号和抽运脉冲经双色镜合束,

该双色镜的直通截止波长为 1800 nm, 再由焦距 40 mm 的消色差透镜聚焦后, 入射至 GaSe 非线性晶体. 该晶体沿 (001) 平面 ( $z$  向) 切割, 尺寸为  $\Phi 7 \times 1$  mm<sup>3</sup>, 胶合在铝环内, 铝环整体安装在多维调整装置上, 以便于对晶体相位匹配角和方位角的调节, 实现相位匹配. 为实现基频抽运和信号脉冲之间的同步, 在 EDFA-3 前接入了一段色散位移光纤 (OFS-980-20, 简称 OFS 光纤), 以实现双色脉冲相对时间延迟的粗调, 在 EDFA-3 之前接入 OFS 是基于该光纤在 1550 nm 附近具有近零色散 ( $\beta_2 = -0.0013$  ps<sup>2</sup>/m @1550 nm), 且 EDFA-3 输入端处功率低因而引入的光纤非线性弱的考虑. 在此基础上, 再由可调光延时线精细调控双色脉冲之间的同步.

经非线性晶体 DFG 后的输出由长通滤光片 (Edmund Optics) 滤除剩余基频光, 再由 Ge 透镜准直耦合至傅里叶红外光谱仪 (FTIR, Nicolet iS50) 检测. 为便于 DFG 的相位匹配状态调节与优化, 实验中还采用了液氮冷却的碲镉汞 (MCT) 探测器 (Infrared Associates Inc.) 结合锁相放大器 (Stanford SR830) 来捕捉初始微弱 DFG 光, 以降低 DFG 相位匹配调节的难度. 两种探测机构由折叠镜切换.

### 3 结果与讨论

在图 1 所示的 DFG 系统中, 基频脉冲重复频率已锁定, 但是, 只有当参与 DFG 过程的基频双色脉冲同步时, 经光整流才可使差频光自动消除基频脉冲的载波包络偏移频率的影响, 获得 DFG 中远红外光梳. 因此, 必须严格确保双色基频脉冲之间的同步, 并且为实现高效 DFG 过程, 还必须确保抽运和信号脉冲在非线性晶体处横向光斑小、重叠度高.

实验中, 首先对基频双色脉冲之间的同步特性进行测试与调整, 通过在 EDFA-3 之前加入适当长度的 OFS 光纤, 实现 OC-2 与双色镜之间抽运和信号脉冲光程近似相等, 这可通过 PD 并结合宽带示波器探测进行判断. 以此为基础, 进一步借助于强度自相关装置精确测量, 并采用可调光延时器精细调控, 实现双色脉冲之间的同步. 由于双色镜直通截止波长为 1800 nm, 故经该双色镜后的抽运和信号脉冲的光谱并不重叠. 为此, 实验中先暂以宽



带半透半反镜替代双色镜,再以强度自相关装置(光谱响应上限为1800 nm)进行测试与光路调整.通过测量分析基频抽运脉冲与SC(基频信号脉冲)之间的强度自相关特性,调整与优化OFS光纤长度.该测试调整方案可由图2解释<sup>[29]</sup>,事实上,强度自相关装置的主要部件是迈克耳孙干涉仪,假设双色脉冲对经参考臂和扫描臂产生的时延为 $\tau$ ,

而双色脉冲对之间的时间间隔为 $\tau_0$ ,当 $\tau \gg \tau_0$ 时,探测到的强度自相关信号低,即所谓背景;当 $|\tau| = \tau_0$ 时,来自不同臂之间的具有时延的双色脉冲交叉重叠,将探测到强度自相关“副峰”;只有当 $\tau = 0$ 时,来自不同臂之间的具有时延的双色脉冲才能完全重合,这时将只探测到自相关“主峰”信号.

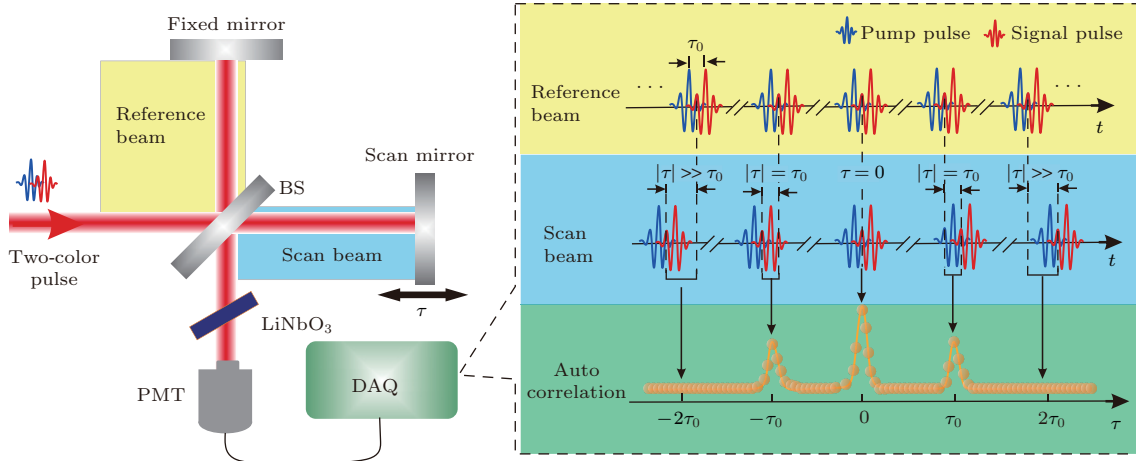


图2 由强度自相关装置测试双色脉冲同步性的原理示意图 (BS, 分束镜; PMT, 光电倍增管; DAQ, 数据采集装置)  
 Fig. 2. Schematic diagram for describing the measuring principle to evaluate the synchronization of the two-color fundamental pulses with an autocorrelator (BS, beam splitter; PMT, photomultiplier tubes; DAQ, data acquisition module).

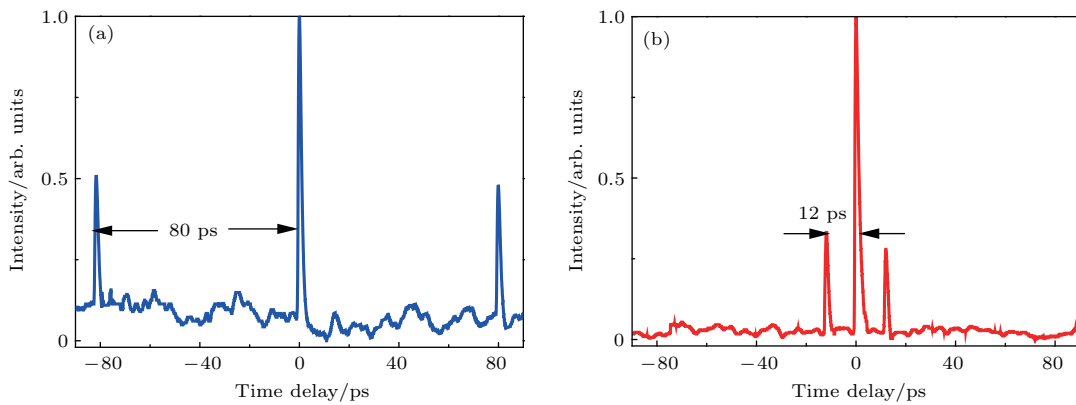


图3 实测的基频双色脉冲强度自相关曲线 (a)和(b)分别为可调光延迟线调节1 cm前后的结果  
 Fig. 3. Measured intensity autocorrelation curves for the fundamental two-color pulses: (a) and (b) correspond to the results measured before and after the tunable delay line has been adjusted by 1 cm.

根据上述方法,实验发现当OFS光纤长度为35 cm时,由强度自相关装置测得的如图3(a)自相关曲线出现了对称的三个强度自相关信号峰,主峰和副峰之间相差80 ps,表明双色脉冲不同步,且时间间隔为80 ps,图中基线背景不平坦主要由测量光路的微小偏差造成,对测量结果无影响.然后,

通过将可调光延迟线缩短1 cm(对应于减小67 ps的时间延时),测得如图3(b)自相关曲线,这时,基频抽运脉冲落后于信号脉冲约12 ps(理论值应为13 ps,该误差可能是延迟线调整精度所致).利用SC谱产生理论,可以评估自相关测量所用1550 nm波段与实际DFG所用1900 nm波段脉冲的传输光

纤链路长度<sup>[30]</sup>, 结合光纤色散参量, 最终可计算出两者存在约 1.5 ps 的延迟<sup>[31]</sup>, 因此, 在本实验中, 通过精细调节可调光延时线, 最终将抽运脉冲调节到比信号脉冲超前约 1.5 ps.

在基频抽运与信号脉冲之间的同步性调整完毕后, 安装消色差聚焦透镜, 并在其束腰处测量抽运和信号脉冲的横向重叠度, 进而微调光路. 实验中, 将光束质量分析仪 (Beam Master BM-7) 固

定在光束束腰处, 经反复微调聚焦光路, 最后在透镜束腰处分别测得的抽运和信号脉冲光斑与位置, 结果如图 4 所示, 其中图 4(a) 为实测的抽运光束 (上) 和信号光束 (下) 光斑, 图 4(b) 则为双色脉冲在图 4(a) 中  $W$  和  $V$  正交方向上的高斯曲线拟合情况. 由图 4 可见, 抽运和信号脉冲光斑之间的重叠度高,  $1/e^2$  处的光斑直径分别为  $65\ \mu\text{m}$  和  $63\ \mu\text{m}$ .

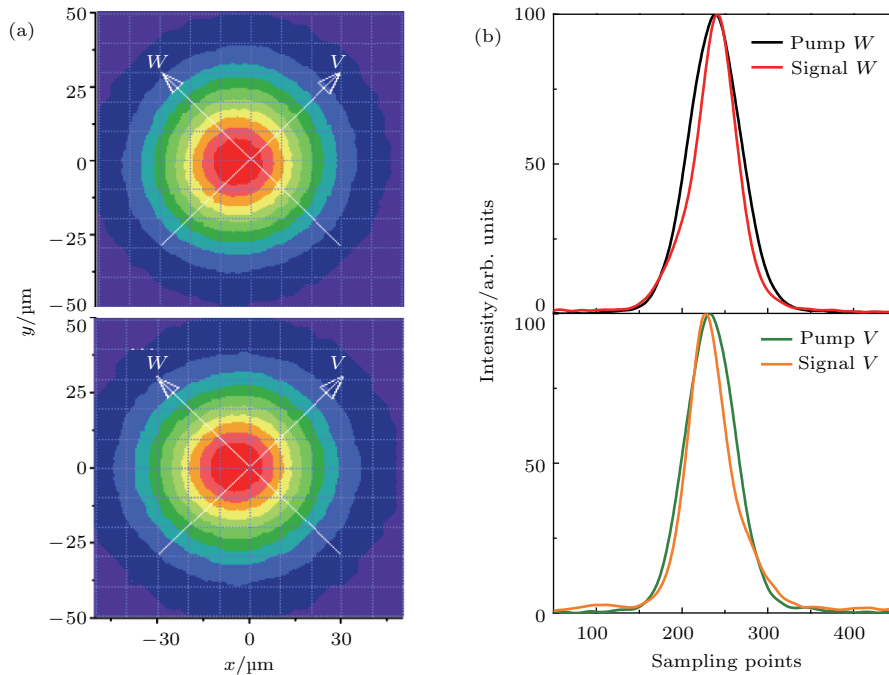


图 4 (a) 实测的基频抽运 (上) 和信号 (下) 脉冲在消色差聚焦透镜束腰处的光斑; (b) 基频双色脉冲在 (a) 图  $W$  和  $V$  方向上的高斯拟合结果

Fig. 4. (a) Measured beam spots for the fundamental pump (up) and signal (down) pulses at the position of the beam waist of the achromatic aberration lens; (b) the Gaussian fitting results in the directions of  $W$  and  $V$  shown in figure (a) for the fundamental two-color pulses, respectively.

经上述光路调整后, 再将半透半反镜替换回实际所用的双色镜, 在光束质量分析仪对抽运脉冲测量结果不变的情况下, 调整并固定该双色镜. 必须指出, 以宽带半透半反镜替代了双色镜进行上述时域同步与横向重叠实验, 尽管未对实际参与 DFG 过程的 1900 nm 附近信号脉冲进行测量, 但考虑到所用聚焦透镜为消色差透镜, 且双色镜引入的色散量极为有限, 因而可认为, 上述光路调整方法能保证抽运脉冲与 1900 nm 附近信号脉冲在透镜束腰处的时域同步与横向重叠. 图 5 为经双色镜合束、消色差透镜聚焦后由光谱分析仪 (AQ6375, Yokogawa) 测得的抽运和信号双色脉冲光谱. 由图 5 可见, 抽运脉冲光谱覆盖范围为  $1.5\text{--}1.6\ \mu\text{m}$ ,

而由 HNLFF 产生的 SC 经双色镜后滤出的长波长成分处于  $1.9\text{--}2.1\ \mu\text{m}$  波段, 该信号脉冲与抽运脉冲经 DFG 过程, 理论上能够产生  $6\text{--}10\ \mu\text{m}$  波段的 DFG 脉冲.

在此基础上, 将 GaSe 晶体安装在聚焦透镜的束腰位置处, 调整入射光方位角和相位匹配角, 并辅以可调光延时线的精细调节, 当方位角和相位匹配角分别为  $30^\circ$  和  $36^\circ$  时, 由 FTIR 测得了如图 6 所示的红外 DFG 光谱, 可见带宽约 500 nm, 中心波长为  $7.8\ \mu\text{m}$ . 由于该差频光的基频双色脉冲来自于重复频率已锁定的同一飞秒脉冲振荡器, 且基频双色脉冲严格同步, 因此, 该中远红外差频光中的载波包络相移已由光整流效应自动消除<sup>[32]</sup>, 即

已产生了DFG中远红外光梳。利用热释电探测器(SPI-D-50)测得该红外光梳的平均功率约80 μW,对应的转换效率约0.8%。该转换效率与理论转化效率1.5%之间存在一定偏差,主要原因是产生同步双色脉冲的光纤链路因环境波动造成的偏振态稳定度不足,导致经波片组后依然难以获取稳定的高度线偏振态(实测线偏振度约70%)。未来拟采用保偏光纤链路产生同步双色脉冲,可望大幅提高转换效率;此外,尽管已对基频双色脉冲之间同步性进行了严格控制,但任何fs级同步偏差都会导致转换效率的滚降,因此,对于未来实用化光源研制,必须同时提高基频双色脉冲线偏振度和基频脉冲间的同步性。

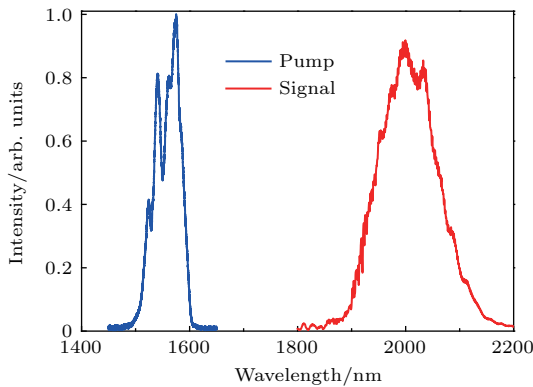


图5 实测的基频抽运和信号脉冲的光谱

Fig. 5. Measured spectra of pump and signal pulses.

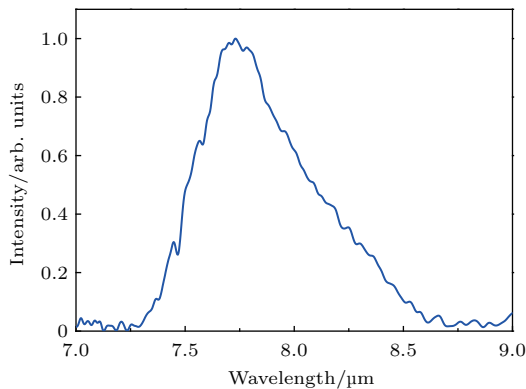


图6 由FTIR实测的DFG红外光梳光谱

Fig. 6. Measured spectrum of the DFG infrared optical comb with an FTIR.

图7(a)为其他实验条件不变时不同相位匹配角下由FTIR测得的光梳光谱,可见,当相位匹配角由36°减小到35.7°和35.4°时,红外光梳的中心波长由7.8 μm变化到7.87 μm和8.25 μm,而相应的带宽则由500 nm逐渐增大至750 nm和1.3 μm

(该带宽已接近于晶体的理论接受带宽),平均功率则由80 μW逐渐下降为40 μW和25 μW。其原因是:不同相位匹配角下,参与DFG过程的基频脉冲有效光谱成分及其对应的相位匹配接受带宽有所不同所致。

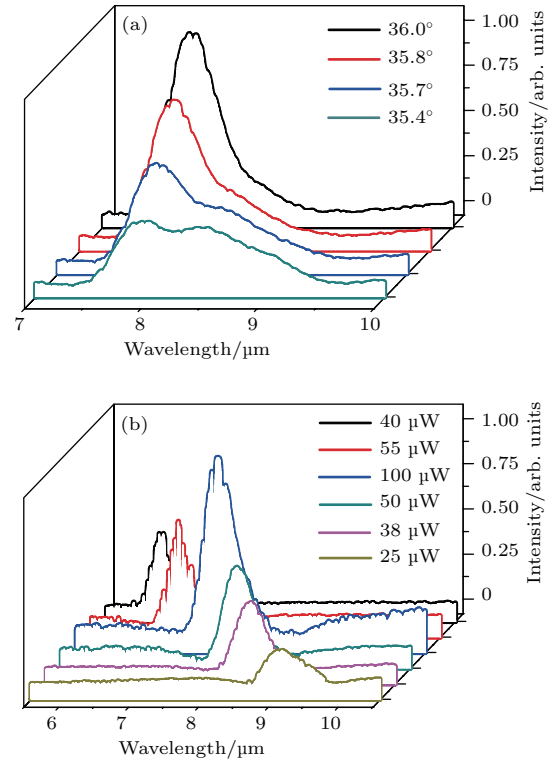


图7 (a)实验条件与图6相同但相位匹配角改变时实测的DFG红外光梳光谱;(b)当基频信号脉冲光谱变化时测得的DFG红外光梳光谱

Fig. 7. (a) Measured spectra of the DFG infrared optical comb when the phase-matching angle changes while other experimental conditions are the same as those for Fig. 6; (b) measured spectra of the DFG comb for different signal pulse spectra.

为此,实验中通过调节HNLf前的半波片来改变SC的光谱形状及其峰位<sup>[30]</sup>,以获取不同中心波长的基频信号脉冲,再辅以相位匹配角调节和可调光延时线精细调控,发现DFG光梳的光谱调谐范围可大幅增大。图7(b)为实测的实验结果,可见,通过上述调谐方案,DFG红外光梳可在6—10 μm范围内实现了宽带调谐,表明通过调控SC的光谱形状及其峰位,辅以相位匹配角调节,可以实现对DFG光梳光谱位置的调谐。此外,当将SC光谱中1.9 μm处谱峰的功率调节到相对较高时,产生的中心波长8.3 μm的差频光功率最大,约100 μW,带宽约0.5 μm,可见,获得高功率差频光的关键是获取高功率同步双色基频脉冲。值得指出的是,当

DFG 光梳中心波长调向短波长时, 在图 7(b) 所示的实测光谱中, 可清晰地呈现出因水汽分子吸收导致的毛刺, 这间接地表明这种 DFG 光梳在远红外分子光谱分析上的重要性; 同时, 因远红外波段分子吸收强度高, 导致在这类激光光谱分析应用时所需激光功率可大幅降低, 进而使得利用 DFG 技术产生红外光梳功率不高的缺陷并不影响这类应用 [20].

## 4 结 论

基于自主研发的重频锁定飞秒锁模掺铒光纤激光振荡器, 采用啁啾脉冲光纤放大技术和全光纤 SC 谱产生技术, 分别提取出中心波长处于 1.5 和 2.0  $\mu\text{m}$  附近的基频双色脉冲; 通过采用 OFS 光纤和可调光延时线补偿技术, 并设计出强度自相关时域同步检测方案, 成功获取了精确同步的基频双色脉冲; 通过合理设计光路, 由 GaSe 非线性晶体, 采用光整流技术成功产生出中远红外 DFG 光梳. 实验结果还表明, 通过调控产生的 SC 光谱形状及其峰位, 辅以相位匹配角调节, 可以实现 DFG 光梳光谱范围的调谐, 实测中远红外 DFG 光梳的调谐范围为 6—10  $\mu\text{m}$ , 光梳最大光谱宽度达到 1.3  $\mu\text{m}$ . 这种光纤型 DFG 光梳可望进一步发展成小型化分析检测仪器, 在中远红外分子光谱精密分析、大气环境检测等领域发挥着重要作用.

## 参考文献

- [1] Cundiff S T, Ye J 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 325
- [2] Jones D, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [3] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [4] Margolis H S 2012 *Chem. Soc. Rev.* **41** 5174
- [5] Ebrahim Z M, Sorokina I T 2008 *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications* (Netherlands: Springer Verlag) p26
- [6] Todd M W, Provencal R A, Owano T G, Paldus B A, Kachanov A, Vodopyanov K L, Hunter M, Coy S L, Steinfeld J I, Arnold J T 2002 *Appl. Phys. B* **75** 367
- [7] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W 2012 *Nat. Photon.* **6** 440
- [8] Gustavo V, Sabine R, Johanna W, Dmitry K, Martin J S, Pierre J, Mattias B, Jérôme F 2016 *Optica* **3** 252
- [9] Austin G G, Meng J Y, Yoshitomo O, Jaime C, Aseema M, Alexander L G, Michal L 2016 *Opt. Express* **24** 13044
- [10] Adler F, Maslowski P, Foltynowicz A, Cossel K C, Briles T C, Hartl I, Ye J 2010 *Opt. Express* **18** 21861
- [11] Galli I, Bartalini S, Borri S, Cancio P, Mazzotti D, Natale P D, Giusfredi G 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 270802
- [12] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1542
- [13] Bernhardt B, Sorokin E, Jacquet P, Thon R, Becker T, Sorokina I T, Picqué N, Hänsch T W 2010 *Appl. Phys. B* **100** 3
- [14] Hugi A, Villares G, Blaser S, Andreas, Liu H C, Faist J 2012 *Nature* **492** 229
- [15] Wang C Y, Herr T, Del'Haye P, Schliesser A, Hofer J, Holzwarth R, Hänsch T W, Picqué N, Kippenberg T J 2013 *Nat. Commun.* **4** 1345
- [16] Adler F, Cossel K C, Thorpe M J, Hartl I, Fermann M E, Ye J 2009 *Opt. Lett.* **34** 1330
- [17] Reid D T, Gale B J S, Sun J 2008 *Laser Phys.* **18** 87
- [18] Gambetta A, Coluccelli N, Cassinero M, Gatti D, Laporta P, Galzerano G, Marangoni M 2013 *Opt. Lett.* **38** 1155
- [19] Foreman S M, Marian A, Ye J, Petrukhin E A, Gubin M A, Mücke O D, Wong F N C, Ippen E P, Kärtner F X 2005 *Opt. Lett.* **30** 570
- [20] Schliesser A, Brehm M, Keilmann F 2005 *Opt. Express* **13** 9029
- [21] Gambetta A, Ramponi R, Marangoni M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2671
- [22] Keilmann F, Amarie S 2012 *J. Infrared Millim. Te.* **33** 479
- [23] Li J S, Yao J Q, Xu X Y, Zhong K, Xu D G, Wang P 2010 *Acta Phot. Sin.* **39** 1491 (in Chinese) [李建松, 姚建铨, 徐小燕, 钟凯, 徐德刚, 王鹏 2010 光子学报 **39** 1491]
- [24] Hu C, Yue W, Chen T, Jiang P, Wu B, Shen Y 2017 *Appl. Opt.* **56** 1574
- [25] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 (in Chinese) [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]
- [26] Zhang Y, Yan L, Zhao W, Meng S, Fan S, Zhang L, Guo G, Zhang S, Jiang H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064209
- [27] Yang X T, Chen X L, Zhao J, Yang K W, Ding L E, Zeng H P 2014 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **44** 698 (in Chinese) [杨行涛, 陈修亮, 赵健, 杨康文, 丁良恩, 曾和平 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **44** 698]
- [28] Wu H Y, Shi L, Ma T, Ma J D, Lu Q, Sun Q, Mao Q H 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0601008 (in Chinese) [吴浩煜, 时雷, 马挺, 马金栋, 路桥, 孙青, 毛庆和 2017 中国激光 **44** 0601008]
- [29] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [30] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [31] Agrawal G P 2006 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic Press) pp7–12
- [32] Puppe T, Sell A, Kliese R, Hoghooghi N, Zach A, Kaenders W 2016 *Opt. Lett.* **41** 1877



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

Ma Jin-Dong<sup>1)2)</sup> Wu Hao-Yu<sup>2)</sup> Lu Qiao<sup>2)</sup> Ma Ting<sup>2)</sup> Shi Lei<sup>2)</sup>  
Sun Qing<sup>3)</sup> Mao Qing-He<sup>2)1)†</sup>

1) (School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China )

2) (Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China )

3) (Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China )

( Received 22 November 2017; revised manuscript received 1 January 2018 )

## Abstract

Optical frequency comb (OFC) is a new type of high-quality laser source. The visible and near-infrared OFCs have become mature, and it has been widely used in optical frequency metrology, time/frequency transfer, precision laser spectroscopy and other fields. Since the mid and far-infrared spectral regions contain a large number of baseband absorption lines for molecules and the absorption intensities are several orders of magnitude higher than those in the visible and near-infrared spectral region, one has made great efforts to develop the mid and far-infrared OFCs in recent years. Although a variety of approaches to achieving infrared OFCs directly have been proposed, the method of difference frequency generation (DFG) infrared OFC based on the optical rectification technique is still more efficient. DFG infrared OFCs with widely tuning ability have been demonstrated based on fiber lasers so far. However, how to obtain the broadband spectrum for a DFG infrared OFC with widely tuning ability still needs to be solved. In this paper we report a fiber-type DFG infrared OFC by using the femtosecond pulses from a mode-locked erbium-doped fiber laser as the fundamental light. Based on the self-developed mode-locked fiber laser oscillator with repetition rate locked, the two-color fundamental pulse trains with the central wavelengths of 1.5 and 2.0  $\mu\text{m}$  are respectively achieved after the chirped pulse fiber amplification and all-fiber supercontinuum (SC) generation techniques have been utilized. With a time-domain synchronous detection system based on the intensity autocorrelation principle, the accurate synchronization with the fundamental two-color pulses is obtained by optimizing the OFS compensated fiber length and adjusting a tunable optical delay line. Finally, by using the optical rectification technique, a fiber-type DFG infrared OFC is successfully generated with the help of a suitable designed GaSe nonlinear crystal. Our experimental results also show that the spectral location of the DFG infrared OFC can be tuned by controlling the spectral shape of the SC combined with the adjustment of the phase-matching for the nonlinear crystal. The measured tuning range of the DFG infrared OFC is from 6 to 10  $\mu\text{m}$ , and the maximum spectral width is 1.3  $\mu\text{m}$ . This fiber-type DFG infrared OFC may play an important role in the molecular spectroscopy, the atmospheric environmental monitoring, and other fields.

**Keywords:** optical frequency comb, difference frequency generation, fiber lasers, mid and far-infrared

**PACS:** 42.62.Eh, 42.65.Ky, 42.55.Wd, 42.72.Ai

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172503

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377044, 61250017), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB934304), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (class B) (Grant No. XDB21010300).

† Corresponding author. E-mail: [mqinghe@aiofm.ac.cn](mailto:mqinghe@aiofm.ac.cn)