

基于被动同步的宽调谐中红外差频技术研究

李博文¹, 武佳美¹, 徐明航¹, 江云峰¹, 郝强¹, 杨康文¹, 黄坤^{1*}, 曾和平^{1,2,3}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²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;

³济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

摘要 实验搭建了基于同步脉冲泵浦的非线性差频中红外光源, 利用主-从注入式全光调制技术实现了保偏掺铒和掺镱锁模光纤激光器的被动同步输出, 结合高非线性光纤光谱展宽和宽带可调谐滤波器, 获得了 2940~3260 nm 宽波段可调谐的中红外皮秒激光, 平均功率为 580~926 mW, 最大泵浦光转换效率为 41%。实验发现, 小功率的同步诱导脉冲注入可以大幅降低中红外参量产生的泵浦阈值, 从而放宽了高效率中红外产生对高功率泵浦光场的要求。

关键词 激光光学; 可调谐激光; 差频产生; 红外激光; 同步激光

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1115001

Study on Widely Tunable Mid-Infrared Difference-Frequency Generation Based on Passive Synchronization

Li Bowen¹, Wu Jiamei¹, Xu Minghang¹, Jiang Yunfeng¹, Hao Qiang¹,
Yang Kangwen¹, Huang Kun^{1*}, Zeng Heping^{1,2,3}

¹School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

³Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

Abstract We have experimentally implemented a difference-frequency-generated mid-infrared (MIR) source based on synchronously pulsed pumping. The passive synchronization between polarization-maintaining Er- and Yb-doped mode-locked fiber lasers was realized by using all-optical modulation technique via master-slave injection. By combining spectral broadening of highly nonlinear fiber and wide-band tunable filter, we could obtain broadly tunable MIR picosecond laser from 2940 nm to 3260 nm. The average power was 580 mW to 926 mW, and the maximum pump conversion efficiency was 41%. In the experiment, the injection of low-power synchronous induced pulses could substantially reduce the pumping threshold for the MIR parametric generation, which would relax the requirement of strong pump field to realize efficient MIR generation.

Key words lasers optics; tunable lasers; difference frequency generation; infrared laser; synchronous laser

OCIS codes 140.3460; 140.3600; 190.7110; 140.3070

中红外(MIR)光谱覆盖了地球大气的吸收窗口,并处于分子旋转-振动跃迁的“指纹区”。这些特性使得中红外激光在科研、工业和军事等领域备受

关注^[1]。特别地,波长可调的中红外超快光源在光谱测量^[2]、材料处理^[3]以及生物成像^[4]等方面有着重要的应用前景。迄今,已经发展出各种直接产生

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)、国家自然科学基金(11974248, 11434005, 11504235, 11704253)、上海市科技创新行动计划(18JC1412000)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划

* E-mail: k Huang@usst.edu.cn

中红外的方法,如量子级联半导体激光器^[5]和稀土掺杂光纤激光器^[6-7]等。为了突破现存增益介质的带宽限制,通常可采用非线性手段如超连续谱产生^[8-9]和光参量振荡器^[10]等来获得更宽的输出光谱或调谐范围。通常,量子级联激光器的输出虽然可以覆盖较宽光谱,但其功率调谐范围小、成本高;光参量振荡器可产生高功率的可调谐中红外,但对光学器件镀膜和谐振腔调节有着较高要求;超连续谱可同时获取宽波段中红外输出,但面临着相干性受限、光谱密度和转换效率较低的难题;氟化物光纤激光器一般选用 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 作为稀土掺杂离子,仅能产生特定激光波段。近年来,基于单通非线性差频过程的中红外产生技术由于结构简单紧凑、调谐范围宽、转换效率高优点已成为国内外研究的热点^[11-14]。具体来说,首先,中红外差频产生技术免除了光学谐振腔所需的宽带镀膜光学器件以及精确模式匹配的要求^[15];其次,得益于丰富的高性能非线性晶体,所能获得的相位匹配波长已能覆盖 $2\sim 20\ \mu m$ 的中远红外波段^[16];最后,近红外光纤激光产生、放大与控制技术的不断发展极大地推动了中红外差频技术的进步。在此背景下,本文工作在实验基础上探究了基于被动同步的宽调谐中红外差频技术,借助全光被动同步技术获得了近红外掺铒和

掺镱锁模光纤激光器输出脉冲的精确时域同步,结合基于高非线性光纤的光谱展宽技术,最终获得了 $2940\sim 3260\ nm$ 宽波段可调谐的中红外皮秒激光,平均功率为 $580\sim 926\ mW$,最大泵浦光转换效率为 41% 。一方面,采用双色脉冲同步技术规避了大波长跨度光谱展宽导致的非线性调制不稳定问题,可以获得更稳定的同步种子脉冲;另一方面,诱导脉冲的注入可以大幅降低中红外参量产生的泵浦阈值,从而放宽了高效率中红外产生对高功率泵浦光场的要求。

被动同步的可调谐中红外差频产生实验装置如图 1 所示,包括了同步光纤激光器、信号和泵浦源制备,以及非线性差频过程。首先,同步激光系统包括了全保偏结构的掺铒和掺镱锁模光纤激光器 (EDFL 和 YDFL),它们分别采用了可饱和吸收镜 (SESAM) 和非线性放大环形镜 (NALM) 作为被动锁模机制,输出脉冲的重复频率为 $15.7\ MHz$ 。为了实现两台激光器的相对重复频率锁定,EDFL 的部分输出被注入到 YDFL 的激光腔内,通过单模光纤中的交叉相位调制效应,获得 Sagnac 干涉环内周期调制的非线性相位差,进而实现从激光器的被动同步锁模^[17]。然后,主-从激光器输出分别经过掺铒和掺镱光纤放大器 (EDFA 和 YDFA),为后续频率变换提供信号光和泵浦光。

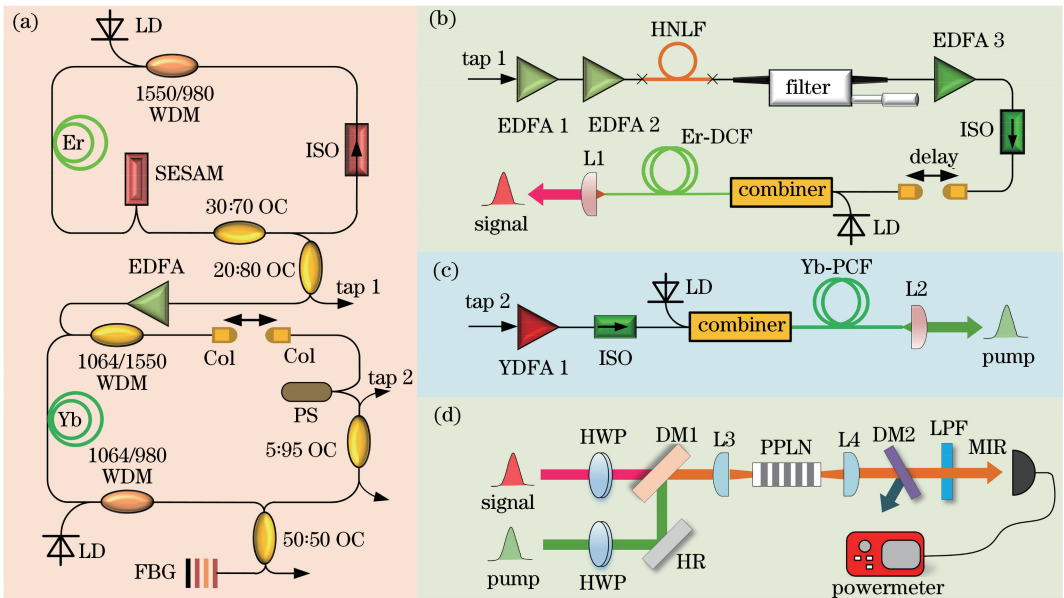


图 1 实验装置图。(a)被动同步的掺铒和掺镱锁模光纤激光器;(b)波长可调谐的信号光制备;
(c)高功率泵浦光制备;(d)同步脉冲泵浦的非线性差频

Fig. 1 Experimental setup. (a) Passively synchronized Er- and Yb-doped mode-locked fiber lasers; (b) wavelength-tunable signal source preparation; (c) high-power pump source preparation; (d) synchronously pumped nonlinear frequency-difference generation

实验中,泵浦光经过基于掺镱光子晶体光纤(Yb-PCF)的主放大之后,功率可以提升至 6.2 W。如图 2(a)所示,输出光谱的中心波长为 1032.5 nm,带宽约为 0.3 nm,并展现出自相位调制引致的振荡,相应的脉冲宽度为 $18/\sqrt{2} = 12.7$ ps(假定为高斯脉冲)。对于信号光制备,EDFL 输出经过两级单模光纤放大器之后,注入一段 0.25 m 的高非线性光纤(HNLF)中,其零色散波长为 1550 nm,芯径为 $1\ \mu\text{m}$ 。研究表明,通过改变注入脉冲的泵浦功率和脉冲宽度可以控制展宽光谱的覆盖范围^[12]。当注

入功率设定为 140 mW 时,获得了图 2(b)所示的展宽光谱,能够匹配实验中可调滤波器(Agiltron FOTF-025)具备的调节范围(1510~1590 nm),既可以提高信号光的能量利用率,又可以减小非线性展宽引致的脉冲强度抖动^[13]。滤波之后的典型光谱如图 2(c)所示,带宽约为 1 nm,对应的脉冲宽度为 7.8 ps。经过再次放大后,信号光功率约为 10 mW。最后,信号光与泵浦光通过双色向镜(DM1)合束后聚焦至周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体,实现中红外差频输出。

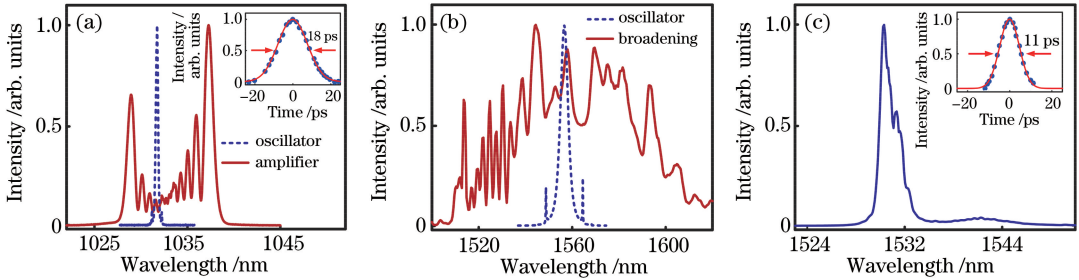


图 2 泵浦和信号脉冲表征。(a)泵浦源光谱与脉宽;(b)信号光展宽前后光谱;(c)滤波后光谱与脉宽

Fig. 2 Characterization of pump and signal pulses. (a) Spectrum and pulse width of pump source; (b) signal spectra before and after broadening; (c) spectrum and pulse width of filtered signal

实验中,对于不同的信号光波长,可以选择合适的 PPLN 反转周期与工作温度来达到准相位匹配条件。例如,当信号光波长为 1530 nm 时,可选取 $29.8\ \mu\text{m}$ 的反转周期,相应温度为 $125\ ^\circ\text{C}$ 。如图 3(a)所示,中红外功率随泵浦强度单调递增,而泵浦光转换效率则表现出饱和现象,表明过强的泵浦场会导致部分中红外回流^[13]。当泵浦光功率为 4 W 和 6.2 W 时,分别对应了 41% 的最大转换效率和 926 mW 的最大输出功率。作为比较,图 3(b)给出

了自发参量下转换中红外产生的对应结果,其泵浦阈值约为 2 W,峰值转换效率为 28%。研究表明,采用同步脉冲诱导技术,可将中红外参量产生的泵浦阈值降低 80%,转换效率提升 1.5 倍,从而放宽了高功率、高效率的中红外制备对强泵浦场的要求,降低了非线性晶体的损伤风险。进一步地,通过调谐信号光的波长,如图 3(c)所示,可以获得 2940~3260 nm 范围内可调谐中红外,输出功率为 580~926 mW。

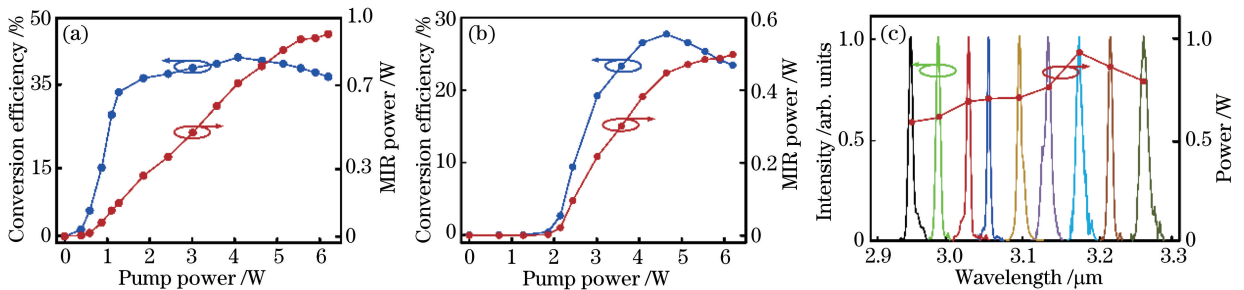


图 3 中红外产生实验结果。(a)有和(b)无信号光注入时,中红外输出功率与泵浦光转换效率随泵浦功率的变化;(c)可调谐中红外光谱与相应的最大输出功率

Fig. 3 Experimental results on MIR generation. (a) With and (b) without signal light injection, MIR output power and pump conversion efficiency change with the pump power; (c) tunable MIR spectra and the corresponding maximum output power

综上,实验探究了基于被动全光同步的高效率、宽调谐中红外差频技术,获得了 2940~3260 nm 的中红外皮秒激光脉冲,最大平均功率为 926 mW,峰

值转换效率为 41%。整个系统采用全保偏光纤结构,有望为后续应用提供紧凑、便捷、稳定的中红外超快光源。接下来,将继续优化信号光和泵浦光的

空间模式匹配,同时尝试不同的脉冲宽度,以此进一步降低中红外参量产生的泵浦阈值,为高功率、高效率的超快中红外脉冲制备提供有效途径。

参 考 文 献

- [1] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500009.
胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500009.
- [2] Vainio M, Halonen L. Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(6): 4266-4294.
- [3] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [4] Hermes M, Brandstrup M R, Huot L, et al. Mid-IR hyperspectral imaging for label-free histopathology and cytology [J]. Journal of Optics, 2018, 20(2): 023002.
- [5] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 432-439.
- [6] Ma J, Qin Z P, Xie G Q, et al. Review of mid-infrared mode-locked laser sources in the 2.0 μm -3.5 μm spectral region [J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2): 021317.
- [7] Li W W, Zhang X J, Wang H, et al. Research progress of mid-infrared rare earth ion-doped fiber lasers at 3 μm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170605.
李维伟, 张小金, 王航, 等. 3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170605.
- [8] Shi H X, Feng X, Tan F Z, et al. Multi-watt mid-infrared supercontinuum generated from a dehydrated large-core tellurite glass fiber [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(12): 3967-3976.
- [9] Jia Z X, Yao C F, Li Z R, et al. Progress on novel high power mid-infrared fiber laser materials and supercontinuum laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508006.
贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 等. 新型高功率中红外光纤激光材料与超连续谱激光研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508006.
- [10] Liu P, Zhang Z W. Generation of mid-infrared emission with a 3.1-4.5 μm instantaneous bandwidth from a chirped-pulse optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2019, 44(16): 3988-3991.
- [11] Seidel M, Xiao X, Hussain S A, et al. Multi-watt, multi-octave, mid-infrared femtosecond source [J]. Science Advances, 2018, 4(4): eaaq1526.
- [12] Xuan H, Zou Y, Wang S, et al. Generation of ultrafast mid-infrared laser by DFG between two actively synchronized picosecond lasers in a MgO:PPLN crystal [J]. Applied Physics B, 2012, 108(3): 571-575.
- [13] Steinle T, Steinmann A, Hegenbarth R, et al. Watt-level optical parametric amplifier at 42 MHz tunable from 1.35 to 4.5 μm coherently seeded with solitons [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9567-9573.
- [14] Hu X L, Gan J W, Yang Z J, et al. Difference-frequency generation of mid-infrared picosecond laser by pulse synchronization technology based on all polarization-maintaining fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0736001.
胡晓蕾, 甘继伟, 杨占军, 等. 基于全保偏光纤利用脉冲同步技术差频产生中红外皮秒激光 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0736001.
- [15] He Y X, Guo Y W, Xu D G, et al. High energy and tunable mid-infrared source based on BaGa₄Se₇ crystal by single-pass difference-frequency generation [J]. Optics Express, 2019, 27(6): 9241-9249.
- [16] Zhang J W, Fai M K, Nagl N, et al. Multi-mW, few-cycle mid-infrared continuum spanning from 500 to 2250 cm^{-1} [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(2): 17180.
- [17] Jiang Y F, Wu J M, Hao Q, et al. Experimental study on all-polarization-maintaining passive synchronization for dual-color mode-locked fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0936001.
江云峰, 武佳美, 郝强, 等. 全保偏被动同步的双色锁模光纤激光器的实验研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0936001.