

基于被动全光同步的高效率中红外差频产生技术研究

徐明航¹, 武佳美¹, 李博文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 实验探究了基于被动全光同步的中红外差频产生技术, 采用主-从注入锁定实现了全保偏掺镱和掺铒锁模光纤激光器的同步脉冲输出, 并经过级联光纤放大在 PPLN 晶体中获得了中心波长为 3071 nm 的中红外皮秒脉冲, 最大泵浦光转换效率为 68.3%, 峰值平均功率达 1.36 W。研究发现, 所使用的同步脉冲诱导差频技术能够显著降低中红外产生的泵浦阈值。此外, 得益于脉冲产生、同步与放大全链路的保偏光纤架构, 中红外超快光源表现出良好的长期稳定性, 平均功率的相对抖动低至 0.2%。

关键词 光纤激光器; 差频产生; 同步激光; 中红外激光

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2036001

Efficient Mid-Infrared Difference-Frequency Generation Technology Based on Passive All-Optical Synchronization

Xu Minghang¹, Wu Jiamei¹, Li Bowen¹, 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 investigated mid-infrared (MIR) difference-frequency generation (DFG) based on passive all-optical synchronization. Synchronized pulses were obtained by master-slave injection locking between all-polarization-maintaining Yb- and Er-doped fiber lasers, which were amplified by cascaded fiber amplifiers to realize MIR picosecond pulses at 3071 nm within a PPLN crystal. The maximum pump conversion efficiency is 68.3%, and the peak average power reaches 1.36 W. The results show that the synchronous pulse induced DFG can substantially reduce the pump threshold. Additionally, benefiting from the all-polarization-maintaining fiber architecture for the pulse generation, synchronization and amplification, the MIR ultrafast light source exhibits excellent long-term stability with a relative fluctuation of average power as low as 0.2%.

Key words fiber lasers; difference-frequency generation; synchronization laser; mid-infrared lasers

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 190.7110

中红外波段不仅包含了许多重要分子的振-转能级跃迁的特征谱线, 它们均位于分子指纹光谱区, 还涵盖了地球周围大气的多个透射窗口, 比近红外光有更好的穿透雾霾能力^[1]。因此, 中红外光源的制备长期以来都是国际研究的热点, 不仅推动着精

密光谱学、红外光子学以及分子动力学等诸多基础研究的发展, 而且在空间通信、红外遥感、环境监测、材料处理、疾病检测等方面具有重要应用。特别地, 皮秒甚至飞秒量级的中红外超短脉冲得益于超短持续时间与极高峰值功率, 在非线性光谱^[2]、材料冷加

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)、国家自然科学基金(11434005, 11504235, 11704253)、上海市科技创新行动计划(18JC1412000)

* E-mail: khuang@usst.edu.cn

工^[3]、生物组织切割^[4]等领域颇受关注。当前,中红外超快脉冲产生技术涵盖了超连续谱产生^[5-6]、光参量振荡器^[7-8]和锁模光纤激光器^[9-10]等。其中,非线性差频变换技术具有单通实验结构、无需复杂腔型调整、输出调谐范围宽、转换效率较高等综合优点^[11],因而受到了研究者的青睐。通常,为了优化非线性差频转换效率,需要制备时域精密同步的近红外双色激光脉冲。尽管超连续谱产生^[12]或拉曼孤子自频移^[13]可方便地获取同步双色光源,但是仍然面临着调制不稳定和转换效率受限等难题。若要实现两台独立激光器的脉冲同步,需提供另一种可行方案。2012年,Xuan等^[14]采用基于高速锁相环的主动同步技术,获得了皮秒量级的中红外输出;2016年,Murray等^[15]利用连续激光强度调制的方法,实现了高效率的中红外亚纳秒脉冲产生;2020年,Yue等^[16]将上述主动调制技术用于纳秒光脉冲与皮秒脉冲簇同步,得到了瓦量级的中红外超快脉冲簇。近年来,被动同步技术也备受关注,用于实现超快光纤激光器之间的重复频率锁定。2020年,Kong等^[17]基于非线性偏振旋转锁模机制,搭建了同步光纤激光系统,通过在腔内加入可调滤波器获得了波长可调谐的超短脉冲输出。为了规避非保偏结构受环境干扰的影响,Zeng等^[18]基于非线性放大环形镜被动锁模技术,实现了全保偏的双色同步脉冲,获得了厘米级的腔长失配容忍度。本文利用非线性交叉相位调制效应来获得高精度同

步所需的宽带反馈,所形成的全光被动同步技术无需复杂的高速反馈电路控制,结合时频域脉冲控制技术和高功率光纤放大技术,实现了同步脉冲诱导的高效率中红外非线性差频产生(DFG),最大泵浦光转换效率为68.3%。相较于自发参量下转换中红外脉冲制备,同步脉冲诱导差频过程具有更低的泵浦阈值,在较低诱导光功率条件下获得了1.36 W的中红外输出,规避了高功率泵浦引致的晶体损伤风险。此外,整个中红外光源系统基于全保偏光纤架构,具有结构紧凑、稳定性好的优点,这为其在室外环境下更广泛的应用提供了参考。

图1展示了被动同步脉冲泵浦中红外差频产生系统的实验装置图,包含了同步双色锁模激光器、全保偏光纤放大器以及非线性差频装置三个部分。掺镱光纤激光器(YDFL)和掺铒光纤激光器(EDFL)通过主-从注入锁定技术实现了双色同步脉冲的输出。该被动全光同步技术基于非线性放大环形镜锁模机制,通过在Sagnac干涉环内注入主脉冲获得周期性调制的非线性相位差,实现从脉冲激光器的同步锁模^[19]。输出的同步脉冲经过高功率光纤放大器后,由二向色镜(DM2)实现空间合束,最后利用消色差透镜(L3)使双色脉冲在周期极化铌酸锂(PPLN)晶体中实现空间模式匹配,差频产生的中红外激光经过CaF₂透镜(L4)准直后,使用长通滤波器(LPF)滤除剩余的基频光。

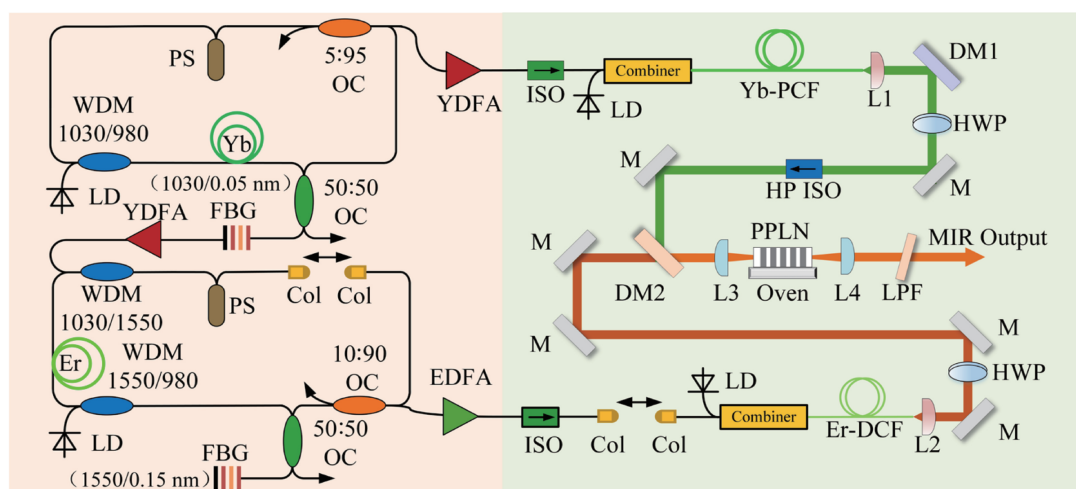


图1 基于被动同步的中红外差频产生实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of mid-infrared DFG based on passive synchronization

如图2(a)所示,同步脉冲的重复频率为20.3 MHz。为了降低激光器锁模阈值,主从激光器中都采用了相移器(PS)以提供非对易的线性相位差。激光腔中的光纤布拉格光栅(FBG)能够精确控

制输出脉冲的中心波长与光谱宽度,为后续中红外时频域调控提供了一定的自由度。然后,YDFL和EDFL的输出脉冲分别经过掺镱和掺铒光纤放大器(YDFL和EDFA),为后续频率变换提供了泵浦光

和信号光。其中, Yb-PCF 是掺镱光子晶体光纤, Er-DCF 是掺铒双包层光纤, 作为主放大的增益介质, 可将泵浦和信号功率分别提升至 7 W 和 0.9 W。实验中, 泵浦光中心波长位于 1030.1 nm, 半峰全宽为 0.28 nm, 测量脉宽为 86 ps; 而信号光中心波长位于 1550.1 nm, 半峰全宽为 0.34 nm, 测量脉宽为 38 ps。最后, 泵浦和信号双色脉冲在时间和空间上都精确重合于长为 10 mm 的 PPLN 晶体

中。PPLN 的反转周期为 29.8 μm , 在 110.6 $^{\circ}\text{C}$ 的工作温度下可获得准相位匹配的中红外差频信号。图 2(b)展示了不同泵浦功率下的中红外输出光谱, 中心波长为 3070.7 nm, 半峰全宽为 0.67 nm。得益于稳定的被动锁模与同步机制以及全保偏的光纤结构, 所获得的中红外超快脉冲光源表现出良好的功率稳定性, 如图 2(c)所示, 在 1 h 测量时间内平均功率的相对抖动 σ 低至 0.2%。

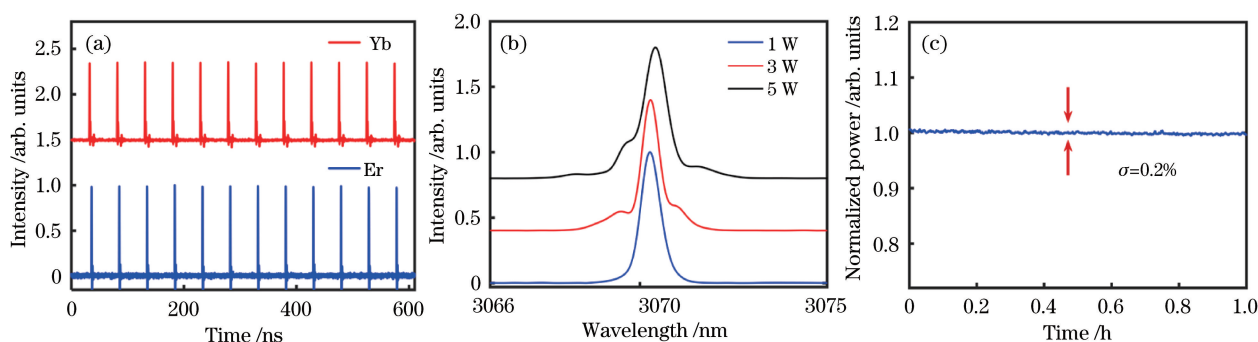


图 2 实验结果。(a)同步脉冲序列;(b)中红外输出光谱;(c)中红外功率稳定性

Fig. 2 Experimental results. (a) Synchronized pulses; (b) MIR spectrum; (c) MIR power stability

随后, 实验探究了中红外差频信号功率与转换效率随泵浦光和信号光强度的影响。图 3(a)给出了信号光功率固定在 900 mW 的条件下, 中红外输出性能随泵浦光功率的变化。尽管中红外输出功率随泵浦增强不断增加, 然而泵浦光的转换效率已表现出到明显的饱和效应。当泵浦光功率为 2.8 W 时, 对应的峰值转换效率为 68.3%, 随后的转换效率下降归咎于中红外闲频光在强泵浦场下的周期回流^[15]。进一步研究发现, 适当降低信号光的注入功率可以缓解回流效应, 从而提高中红外输

输出功率。如图 3(b)所示, 当信号光功率减小到 100 mW 时, 中红外输出功率可达 1.36 W。需指出的是, 当信号光功率为零(即无注入)时, 7 W 泵浦功率依然未达到中红外自发参量下转换的阈值。虽然自发参量下中红外脉冲制备无需同步信号光的注入, 但是对泵浦功率的要求很高, 增加了高功率泵浦引致的晶体损伤风险^[20]。因此, 同步信号光脉冲的注入诱导可以显著降低中红外参量产生的泵浦阈值, 进而放宽对高功率强泵浦场的苛刻要求。

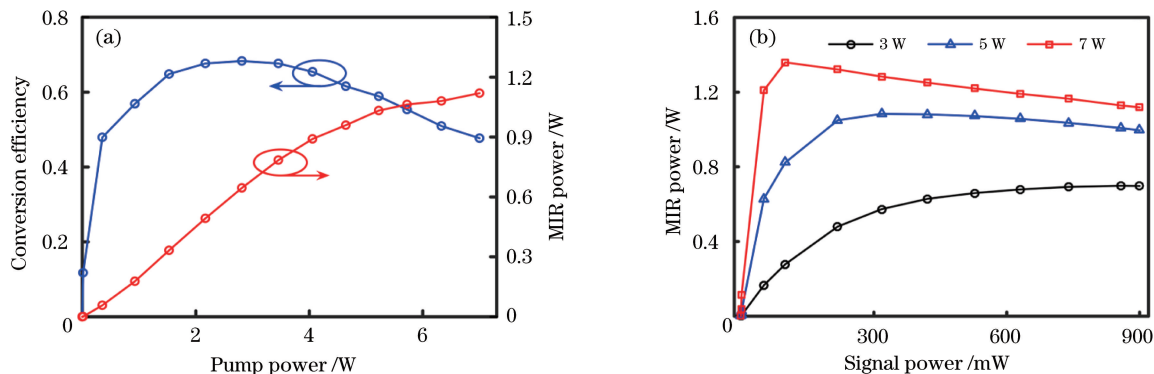


图 3 实验结果。(a)中红外功率和相应的转换效率随泵浦功率的变化关系;

(b)不同泵浦功率下中红外功率随信号光功率的变化关系

Fig. 3 Experimental results. (a) MIR power and corresponding conversion efficiency versus pump power;

(b) MIR power varies as the signal power for different pump powers

综上所述, 实验探究了基于被动全光同步的高效率中红外差频技术, 获得了瓦量级的中红外超快

脉冲输出, 最高转换效率达到 68.3%, 采用的同步脉冲诱导注入技术可有效降低非线性参量过程的泵

浦阈值,为高功率、高效率的超快中红外脉冲制备提供了有效途径。搭建的中红外光源无需主动控制反馈电路,加之采用全保偏光纤结构,兼具紧凑型、便捷性和稳定性的优点。此外,结合光纤激光器的腔内色散管理技术和腔外脉冲压缩技术,有望获得飞秒量级的双色同步脉冲输出,从而通过非线性差频技术实现中红外飞秒脉冲激光。因此,本系统所提供的中红外光源在环境监测、医疗和国防领域有望得到更为广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Timmers H, Kowligy A, Lind A, et al. Molecular fingerprinting with bright, broadband infrared frequency combs[J]. *Optica*, 2018, 5(6): 727-732.
- [2] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [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] Serebryakov V A, Boiko E V, Petrishchev N N, et al. Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects [J]. *Journal of Optical Technology*, 2010, 77(1): 6-17.
- [5] Liu K, Liu J, Shi H X, et al. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24384-24391.
- [6] Zhu L, Wang L L, Dong X Y, et al. Mid-infrared supercontinuum generation with highly germanium-doped silica fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0319001.
朱磊, 王鹿鹿, 董新永, 等. 基于高掺锗石英光纤的中红外超连续谱产生[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0319001.
- [7] Li Y, Ding Z W, Liu P, et al. Widely tunable, continuous-wave, intra-cavity optical parametric oscillator based on an Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5391-5394.
- [8] Li H N, Zhang D C, Zhu J F, et al. Nanosecond mid-infrared tunable parametric laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1114002.
李浩宁, 张大成, 朱江峰, 等. 纳秒中红外可调谐参量激光研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1114002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Dunn M H, Ebrahimzadeh M. Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses[J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1513-1518.
- [12] Erny C, Moutzouris K, Biegert J, et al. Mid-infrared difference-frequency generation of ultrashort pulses tunable between 3.2 and 4.8 μm from a compact fiber source[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1138-1140.
- [13] Soboń G, Martynkien T, Mergo P, et al. High-power frequency comb source tunable from 2.7 to 4.2 μm based on difference frequency generation pumped by an Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1748-1751.
- [14] 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.
- [15] Murray R T, Runcorn T H, Kelleher E J R, et al. Highly efficient mid-infrared difference-frequency generation using synchronously pulsed fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2446-2449.
- [16] Yue W J, Ding Y C, Wu B, et al. High-power mid-infrared picosecond pulse bunch generation through difference frequency generation [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 383-386.
- [17] Kong C, Pilger C, Hachmeister H, et al. High-contrast, fast chemical imaging by coherent Raman scattering using a self-synchronized two-colour fibre laser[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 25.
- [18] Zeng J, Li B W, Hao Q, et al. Passively synchronized dual-color mode-locked fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirrors [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5061-5064.
- [19] 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.
- [20] Ashik A S, Tidemand-Lichtenberg P, Rodenko O, et al. Pulse-to-pulse spectral noise in a spontaneous parametric down conversion light source [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2772-2775.