

基于全保偏光纤激光器的单通光参量中红外超短脉冲激光系统

董文乾¹, 郝强^{1*}, 黄坤², 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 实验验证了基于全保偏光纤的单通光参量中红外(MIR)超短脉冲产生方案。基于全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构, 获得了平均功率为 2.4 W、脉冲宽度为 48.85 ps、中心波长为 1029.75 nm 的可调重复频率近红外脉冲。当系统重复频率为 100 kHz 时, 近红外脉冲的峰值功率可达 491 kW。利用该近红外脉冲泵浦 MgO-PPLN 晶体, 当入射脉冲的平均功率为 608.9 mW 时, 获得了平均功率为 66.13 mW 的中红外皮秒脉冲, 相应的峰值功率为 13.5 kW。通过调控晶体的反转周期和温度, 可实现 3180~3976 nm 的可调波长输出。该方案具有结构简单、稳定度高的特点。

关键词 激光技术; 超短脉冲; 光纤激光器; 光参量产生; 中红外激光

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1236001

Single-Pass Optical Parameter Mid-Infrared Ultra-Short Pulse Laser System Based on All Polarization-Maintaining Fiber Laser

Dong Wenqian¹, Hao Qiang^{1*}, Huang Kun², 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, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

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

Abstract The single-pass optical parameter mid-infrared(MIR)ultra-short pulse generation scheme based on the all polarization-maintaining fiber is verified experimentally. Based on the all-fiber master-oscillator-power-amplifier (MOPA)structure, an adjustable repetition rate near-infrared pulse is achieved with average power of 2.4 W, pulse width of 48.85 ps, and center wavelength of 1029.75 nm. When the repetition rate of the system is set as 100 kHz, the peak power of the near-infrared pulse can reach 491 kW. When the average power of the incident pulse is 608.9 mW, a mid-infrared picosecond pulse with an average power of 66.13 mW and corresponding peak power of 13.5 kW is obtained by pumping the MgO-PPLN crystal using the near-infrared pulse. By adjusting the crystal reversal period and temperature, the tunable wavelength output of 3180–3976 nm can be achieved. The proposed scheme has the characteristics of simple structure and high stability.

Key words laser technique; ultra-short pulse; fiber laser; optical parametric generation; mid-infrared laser

OCIS codes 140.7090; 140.3510; 140.4050; 190.4410

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)

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

波长可调谐的中红外超短脉冲具有短持续时间、高功率等特性,已经成为生物医学、工业加工等领域的重要工具^[1-4]。高功率、宽调谐范围的中红外超短脉冲的产生方案已是国内外激光技术领域的研究热点。中红外超短脉冲的产生通常可采用非线性差频(DFG)、光参量振荡(OPO)、光参量产生(OPG)等方案^[5-6]。一般地,DFG方案需制备两束时域上精确同步的近红外超短脉冲,通过光学差频产生中红外激光。该方案具有阈值低、转换效率高的特点^[7-8],但是,同步脉冲延迟系统的光路结构较为复杂、稳定性较差。OPO方案是一种泵浦脉冲注入参量振荡器,参量振荡器的腔长需与泵浦脉冲的重复频率匹配的方案。该方案可获得宽调谐范围的中红外激光^[9-10],但参量振荡器的调节难度大、稳定性不足,且镜片镀膜要求较高。相比之下,OPG方案是一种基于单通的自发参量下转换过程的方案,系统结构简单,无需复杂的腔型设计和光路调试,且只需制备单色近红外脉冲,可有效降低系统成本。因此,OPG方案受到许多研究者的青睐。2011年,Wueppen等^[11]采用脉冲宽度为10 ps、重复频率为20 MHz、峰值功率为100 kW的1064 nm波长锁模Nd:YVO₄激光器作为泵浦源,基于PPLN晶体搭建了皮秒量级的OPG系统,获得了峰值功率为23 kW、调谐范围为2300~2800 nm的中红外激光。但基于固体激光器的OPG系统稳定性欠佳。采用光纤激光器作为泵浦源可进一步提高OPG系统的稳定性和轻量化。2015年,Xu等^[12]采用增益开关半导体激光器为种子源,通过四级掺镱光纤放大器产生了脉冲宽度为150 ps、重复频率为1 MHz、峰值功率为80 kW的1035 nm波长泵浦光;利用长度为40 mm的MgO-PPLN晶体搭建了OPG系统,获得了峰值功率为8 kW、调谐范围为

2435~3615 nm的中红外激光。2020年,Nandy等^[13]采用脉冲宽度为21 ps、重复频率为80 MHz、最大峰值功率为8 kW的商用掺镱光纤激光器,结合50 mm长度的MgO-PPLN晶体,搭建了级联单通OPG-OPA系统,获得了峰值功率为1.25 kW、调谐范围为1902~2415 nm的中红外激光。面向中红外器件测试、光谱测量等应用,本文搭建了基于全保偏光纤皮秒激光器的单通OPG系统。通过管理全光纤放大器的非线性效应,有效抑制了光谱展宽和脉冲畸变;利用MgO-PPLN晶体实现了光参量频率下转换,获得了最大峰值功率为13.5 kW的可调谐中红外皮秒脉冲输出。

实验装置如图1所示,包括掺镱光纤激光器(YDFL)和OPG装置两部分结构。如图1(a)所示,YDFL采用主振荡功率放大(MOPA)方式搭建。振荡器(OSC)基于非线性放大环形镜(NALM)锁模机制^[14],中心波长为1029.75 nm,重复频率为11 MHz。OSC输出的平均功率为1.16 mW的种子脉冲由两级掺镱光纤预放大器将平均功率提升至百毫瓦量级,放大器均由最大输出功率为480 mW的976 nm激光二极管提供抽运光。在两级放大器间加入声光调制器(AOM)实现YDFL的重复频率可调。主放大器采用掺镱光子晶体光纤(Yb-PCF)作为增益介质,由最大输出功率为9 W的976 nm激光二极管提供抽运光。在主放大器前插入高功率隔离器(HP-ISO),减小回返光对激光器的影响。OPG过程如图1(b)所示,YDFL输出的1029.75 nm泵浦光通过两个高反射率平面镜(HR)调整方向后,由透镜L1聚焦至MgO-PPLN晶体中心位置附近。MgO-PPLN晶体的周期为28.3~30.5 μm,尺寸为25 mm×10.5 mm×1 mm,晶体放置在调节精度为±0.1 °C的温控炉内,温控炉置于三维调整平台上,便于调节晶体位置。

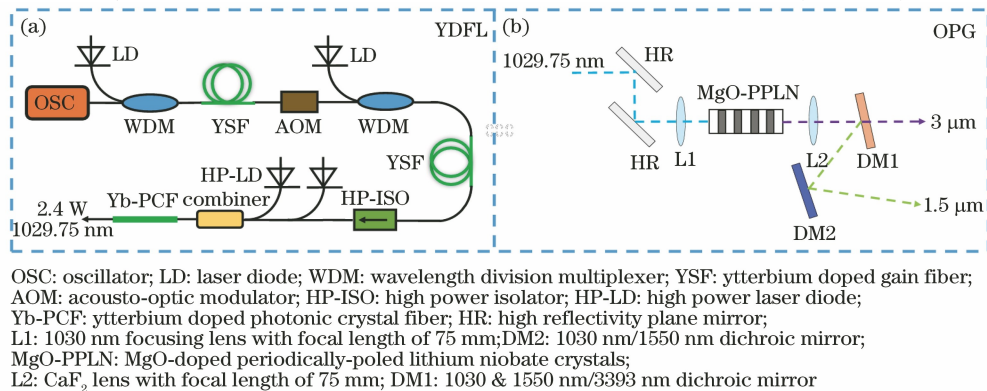


图 1 实验装置。(a)掺镱光纤激光器;(b)OPG装置

Fig. 1 Experimental setup. (a) Yb-doped fiber laser; (b) OPG device

1029.75 nm 脉冲泵浦 MgO-PPLN 晶体后,参量下转换产生两束低频的激光脉冲,分别为 1.5 μm 波段的信号光和 3 μm 波段的闲频光。透镜 L2 用于准直 3 μm 波段的中红外脉冲。二向色镜 DM1 对 1030 nm 和 1550 nm 波段脉冲的反射率大于 99.7%,对 3393 nm 波段脉冲的透射率大于 97%,可滤出 3 μm 波段的闲频光。二向色镜 DM2 对 1030 nm 波段脉冲的透射率大于 95%,对 1550 nm 波段脉冲的反射率大于 95%,可滤出 1.5 μm 波段的信号光。

实验中,通过 AOM 将 YDFL 的重复频率由 11 MHz 降为 100 kHz。当高功率激光二极管(HP-LD)的抽运功率为 15.99 W 时,输出脉冲的平均功率为 2.4 W,脉冲宽度为 48.85 ps,相应的单脉冲能量和峰值功率分别为 24 μJ 和 491 kW。通过优化光纤链路中的光纤长度^[15],获得的 1029.75 nm 泵浦光的 10 dB 谱宽为 2.34 nm,光谱中展现出两侧陡峭、中间振荡的自相位调制(SPM)特征,如图 2 所示。为了降低晶体损伤的风险,实验中泵浦光的平均功率均保持在 1 W 以下。

实验过程中,选取了具有 4 个周期结构的 MgO-PPLN 晶体,分别为 28.3, 28.8, 29.3, 29.8 μm 。当泵浦光的平均功率为 138 mW 时,可探测到 3 μm 波段中红外激光。如图 3(a)所示,当 MgO-PPLN 晶体的反转周期为 29.3 μm 、入射泵浦

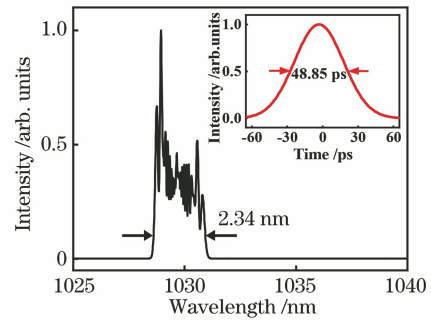


图 2 测试到的掺镱光纤激光器的光谱和脉宽
Fig. 2 Measured spectrum and pulse width of Yb-doped fiber laser

光的平均功率为 608.9 mW 时,获得了功率为 66.13 mW 的中红外脉冲输出,对应的单脉冲能量为 0.66 μJ ,量子转换效率达到最高为 36.6%。由于 OPG 过程中输出脉冲的脉宽窄于泵浦光^[16],因此实验得到的中红外脉冲宽度应小于 48.85 ps,对应的最大峰值功率应稍大于 13.5 kW。当泵浦光的平均功率高于 608.9 mW,转换效率则略有降低,原因是过高的泵浦强度引起闲频光和信号光向泵浦光逆转换^[17]。得益于近红外激光振荡级和放大系统的全保偏结构,实验所获得的中红外脉冲表现出良好的功率稳定性,如图 3(b)所示,在 1 h 的测试时间内平均功率的抖动量(σ)为 0.22%。图 3(c)为当 MgO-PPLN 晶体的反转周期为 29.3 μm 时,OPG

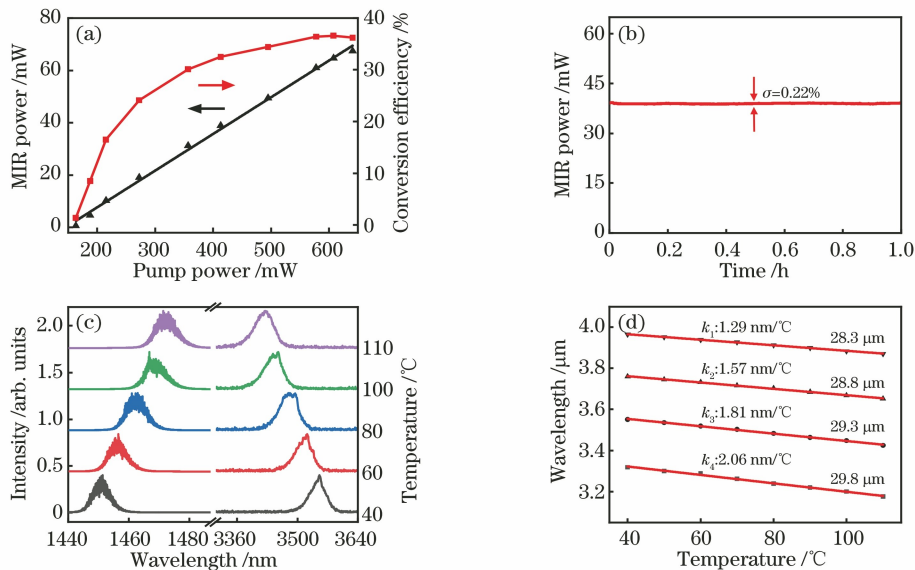


图 3 实验结果。(a)中红外功率和转换效率随泵浦光功率的变化;(b)中红外功率稳定性;
(c)同周期下信号光和闲频光光谱随温度的变化;(d)中红外波长随温度和周期的变化

Fig. 3 Experimental results. (a) MIR power and conversion efficiency versus pump power; (b) MIR power stability; (c) idler and signal light spectra versus temperature in the same period; (d) MIR wavelength varies with temperature and period

输出的信号光与闲频光波长随晶体温度的变化趋势。当温度从 40 °C 上升至 110 °C 的过程中,信号光的中心波长可从 1450 nm 调谐至 1472 nm,对应闲频光的中心波长从 3550 nm 调谐至 3424 nm。图 3 (d)展示了 4 种周期结构下获得的中红外波长调谐特性,可以看出,中红外波长随温度的变化情况(4 条直线的斜率)分别为 1.29 nm/°C、1.57 nm/°C、1.81 nm/°C、2.06 nm/°C。系统获得的中红外激光在 3180~3976 nm 范围内可调谐。

综上所述,本文搭建了基于全光纤脉冲激光器的单通光参量产生中红外超短脉冲的实验装置。光参量阈值低至 138 mW,获得了调谐范围为 3180~3976 nm 的中红外皮秒脉冲,对应的最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为 0.66 μ J 和 13.5 kW,最大量子转换效率为 36.6%。系统采用全保偏光纤结构,装置简单紧凑,具备较强的抗干扰能力。下一步,采用光纤超短脉冲色散补偿结合光参量转换,有望获得飞秒量级的中红外脉冲输出。此外,采用飞秒脉冲泵浦、选择扇形周期晶体、通过调谐泵浦波长,还有望将中红外超短脉冲拓展到更长波段。

参 考 文 献

- [1] Ma J, Qin Z P, Xie G Q, et al. Review of mid-infrared mode-locked laser sources in the 2.0 μ m–3.5 μ m spectral region [J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(2): 021317.
- [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] Seidel M, Xiao X, Hussain S A, et al. Multi-watt, multi-octave, mid-infrared femtosecond source [J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaaq1526.
- [4] 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.
- [5] Chen L Z, Wen S C. Recent advances and methods of optical parametric generation and amplification for tunable ultra-short mid-infrared pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081902. 陈列尊,文双春. 可调谐超短中红外激光脉冲的参变产生与放大及其最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081902.
- [6] Zhao J, Hu M L, Fan J T, et al. Research progress of nonlinear frequency conversion technology based on fiber femtosecond lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040001. 赵君,胡明列,范锦涛,等. 光纤飞秒激光抽运的非线性光学频率变换研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040001.
- [7] Xu M H, Wu J M, Li B W, et al. Efficient mid-infrared difference-frequency generation technology based on passive all-optical synchronization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2036001. 徐明航,武佳美,李博文,等. 基于被动全光同步的高效率中红外差频产生技术研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2036001.
- [8] Li B W, Wu J M, Xu M H, et al. Study on widely tunable mid-infrared difference-frequency generation based on passive synchronization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1115001. 李博文,武佳美,徐明航,等. 基于被动同步的宽调谐中红外差频技术研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1115001.
- [9] Nägele M, Steinle T, Mörz F, et al. Compact harmonic cavity optical parametric oscillator for optical parametric amplifier seeding [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25000-25006.
- [10] Wang F F, Nie H K, Liu J T, et al. Miniaturized widely tunable MgO:PPLN nanosecond optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501015. 王菲菲,聂鸿坤,刘俊亭,等. 小型化宽调谐 MgO:PPLN 中红外纳秒光参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501015.
- [11] Wueppen J, Jungbluth B, Taubner T, et al. Ultrafast tunable mid IR source [C] // 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, October 2-7, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [12] Xu L, Chan H Y, Alam S U, et al. High-energy, near- and mid-IR picosecond pulses generated by a fiber-MOPA-pumped optical parametric generator and amplifier [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12613-12618.
- [13] Nandy B, Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. Fiber-laser-pumped high-repetition-rate picosecond optical parametric generation and amplification in MgO:PPLN [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6126-6129.
- [14] Guo Z R, Hao Q, Yang S, et al. Octave-spanning supercontinuum generation from an NALM mode-locked Yb-fiber laser system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-7.
- [15] 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.

[16] Traub T, Ruebel F, L'huillier J A. Efficient injection-seeded kHz picosecond LBO optical

parametric generator[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 25-29.

[17] 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.