

窄线宽 1064 nm 掺镱光纤激光器泵浦 MgO:PPLN 中 红外光学参量振荡器研究

李炳阳, 于永吉, 王子健, 王宇恒, 姚晓岱, 赵 锐, 金光勇

(长春理工大学物理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 提出了一种基于 1064 nm 掺镱光纤激光器泵浦 MgO:PPLN 的 3.83 μm 中红外光学参量振荡器。基于单谐振光学参量振荡器的阈值理论和线宽压窄前后的光束能量集中性理论, 分析了不同泵浦光束聚焦深度下, 谐振腔内光束分布情况以及线宽调制前后能量的不同集中程度对阈值和光-光转换效率所产生的影响。通过采用单个光纤布拉格光栅的方式压窄了泵浦光线宽, 对比分析了在不同占空比下, 泵浦光线宽压窄前后对中红外光学参量振荡器输出特性的影响。当泵浦功率为 18 W, 脉冲激光占空比为 0.2%, 脉宽为 100 ns, 泵浦光线宽为 2.5 nm 时, MgO:PPLN 中红外光学参量振荡器获得功率为 1.42 W 的 3.83 μm 激光输出, 光-光转换效率为 7.9%。将线宽压窄到 0.1 nm 后, 脉宽为 2 ns, MgO:PPLN 中红外光学参量振荡器获得最大功率为 1.98 W 的 3.83 μm 激光输出, 光-光转换效率为 11%, 光束质量 $M^2=1.89$; 同时相比于线宽压窄前激光输出效率提高了 39.2%。

关键词: 光学参量振荡器; 窄线宽; 光纤激光器; 中红外; 占空比

中图分类号: O437.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210898

Study on mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser

Li Bingyang, Yu Yongji, Wang Zijian, Wang Yuheng, Yao Xiaodai, Zhao Rui, Jin Guangyong

(Jilin Key Laboratory of Solid State Laser Technology and Application, School of Physics,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A 3.83 μm mid-infrared optical parametric oscillator based on 1064 nm Yb-doped fiber laser pumped MgO:PPLN is proposed. Based on the threshold theory of single resonant optical parametric oscillator and the beam energy concentration theory before and after linewidth narrowing, the effects of the beam distribution in the resonant cavity and the different energy concentration levels before and after linewidth modulation on the threshold and optical-optical conversion efficiency under different pump beam focusing depths are analyzed. By using a single fiber Bragg grating to narrow the pump light width, the influence of the pump light width on the output characteristics of the mid-infrared optical parametric oscillator is analyzed under different duty ratios. When the pump power is 18 W, the pulse laser duty cycle is 0.2%, the pulse width is 100 ns, and the pump light width is 2.5 nm, the MgO:PPLN mid-infrared optical parametric oscillator obtains 3.83 μm laser output with a power of 1.42 W, and the optical-optical conversion efficiency is 7.9%. When the linewidth is narrowed to 0.1 nm

收稿日期:2021-11-25; 修订日期:2022-01-25

基金项目:国家自然科学基金联合基金 (U20A20214)

作者简介:李炳阳, 男, 硕士生, 主要从事非线性频率变换方面的研究。

导师简介:于永吉, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事中红外激光技术应用基础研究与工程研制。

and the pulse width is 2 ns, the infrared optical parametric oscillator in MgO:PPLN achieves 3.83 μm laser output with the highest power of 1.98 W. The optical-optical conversion efficiency is 11% and the beam quality $M^2=1.89$. At the same time, the laser output efficiency is increased by 39.2% compared with that before linewidth narrowing.

Key words: optical parametric oscillatoin; narrow linewidth; fiber laser; mid-infrared; duty cycle

0 引言

3~5 μm 中红外激光处在大气可透过的窗口,在遥感技术、高分辨率光谱学、激光医疗、大气监测及激光通信等应用和基础研究领域均具有重要的应用价值和前景^[1-3]。传统的 3~5 μm 中红外激光主要是采用全固态 1064 nm 激光器作为泵浦源,并结合非线性频率变换技术获得^[4-5]。2012 年,中国科学院大学研究了一种由全固态激光器泵浦 MgO:PPLN 光学参量振荡器(OPO),从而获得了中红外波段的闲频光^[6]。

随着高功率半导体泵浦源的发展以及低损耗光纤的发明,使光纤激光器得到了长足的发展。与传统的全固态激光器相比,光纤激光器具有稳定性好、输出功率高、线宽较窄、便于热管理等优点^[7-9]。基于准相位匹配技术的 OPO 具有高增益、无走离、结构简单紧凑等优点,所以利用相干性较强的光纤激光器作为泵浦源泵浦非线性晶体,成为新研究热点。2015 年,浙江大学秦薪镇在理论方面对 OPO 技术加以分析,在实验方面采用 1064 nm 光纤激光泵浦 MgO:PPLN 晶体,最后实现了 2.9 μm 中红外激光输出^[10]。

近年来,很多课题组针对光纤泵浦 OPO 产生波长在 3 μm 左右的激光做了大量研究^[11-12]。2016 年,国防科技大学研究了一种由光纤激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO,实现了 3148 nm 的闲频光输出^[13]。2019 年,华中科技大学^[14]研究了一种基于掺镱光纤激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO,当泵浦功率为 11.6 W 时,获得 671 mW 的 3704 nm 闲频光输出,线宽为 1.5 nm。2021 年,上海理工大学董文乾等人采用波长为 1029.75 nm、线宽为 2.34 nm 的全保偏光纤激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO,当泵浦功率为 608.9 mW 时,获得 66.13 mW 的 3180 nm 闲频光输出^[15]。当波长在 4 μm 左右(中远红外波段)时,MgO:PPLN 晶体存在光子吸收;同时,若通过采用提高泵浦光功率来增大中红外激光输出功率,将引起泵浦源产生非线性效应,导致激光光束质量降低、输出激光线宽展宽,从而影响闲频光光谱

精度和转换效率,因此闲频光输出功率往往限制在 1 W 左右,以上均是限制 4 μm 左右波长中红外激光发展的主要因素。

针对以上研究中存在的由于泵浦源线宽过宽导致泵浦光能量集中性差,致使转换效率降低等问题,文中采用 1064 nm 掺镱光纤 MOPA 作为泵浦源,其线宽为 2.5 nm,经引入光纤布拉格光栅调制后线宽可压窄至 0.1 nm。运用该泵浦源泵浦 MgO:PPLN-OPO,可在实现紧凑结构的同时,有效提高转换效率,在泵浦功率为 18 W 时,获得最大功率为 1.98 W 的 3.83 μm 激光输出,光-光转换效率为 11%。

1 理论分析

根据 Byer 等人针对泵浦光、参量光在空域以及时域上呈现高斯型的泵浦单谐振光学参量振荡器(SRO)提出的理论模型,可计算单谐振 OPO 的阈值^[16]:

$$J_{th} = \frac{2.25\tau}{kg_{sj}l_{eff}^2} \left[\frac{L}{2\tau c} \ln\left(\frac{P_n}{P_0}\right) + 2\alpha l + \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R}}\right) + \ln 2 \right]^2 \quad (1)$$

式中:耦合常数 $k = \frac{2\omega_{sj}\omega_{ij}d_{Qj}^2}{n_p n_{sj} n_{ij} c^3 \epsilon_0}$; 耦合系数 $g_{sj} = \frac{w_p^2}{w_{sj}^2 + w_p^2}$;

w_p 、 w_{sj} 表示泵浦光、信号光的所对应光斑的半径; τ 表示入射光脉宽;准相位匹配时相互作用长度 l_{eff} 近似等于 MgO:PPLN 具体总长; L 为谐振腔总长; P_n 、 P_0 是信号光及其要发生噪声的极值,同时彼此具有 $P_n/P_0 \leq 10^{14}$; α 为晶体吸收信号光时所对应的系数; R 表示输出镜在谐振信号光波段的反射率。

从公式(1)可知,泵浦光斑和参量光斑的差距越小模式匹配越好,以此来优化 OPO 阈值,图 1 为聚焦镜 F 到泵浦源距离分别为 125、145、160 mm 时,总腔长为 80 mm 情况下,模拟出聚焦镜在四个不同位置时,参量光的光束变化情况。由于聚焦镜 F 位置距离输入镜的长度逐渐变小,OPO 腔中光斑的匹配效果也随之变差,将导致效率极大的下降,所以通过模拟分析可知,当聚焦透镜 F 与光纤激光器距离为 125 mm 时,OPO 腔内光斑模式匹配效果最好。

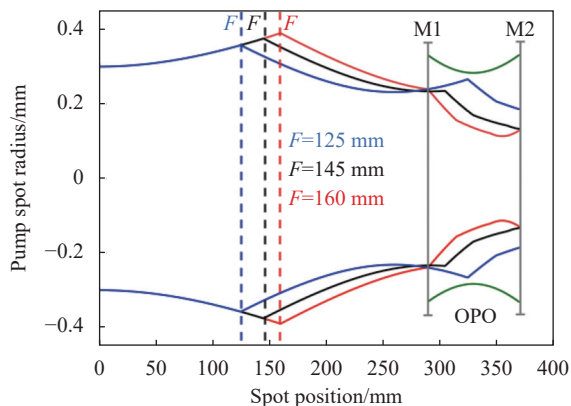


图 1 聚焦镜位置对参量光光斑影响

Fig.1 Effect of focusing mirror position on parametric light spot

图 2 为宽线宽光纤激光器和窄线宽光纤激光器输出高斯光束示意图, 输出高斯光束中心波长为 1064 nm, 阴影部分为靠近中心波长的其他波长, 谱线较宽的情况下其他波长占用了 1064 nm 贡献了较大一部分功率, 也就是 1064 nm 的总功率, 致使 1064 nm 泵浦光泵浦 OPO 达到阈值时功率提高, 所以使用具有窄线宽的光纤激光器泵浦 MgO:PPLN, 可以有效增强相位

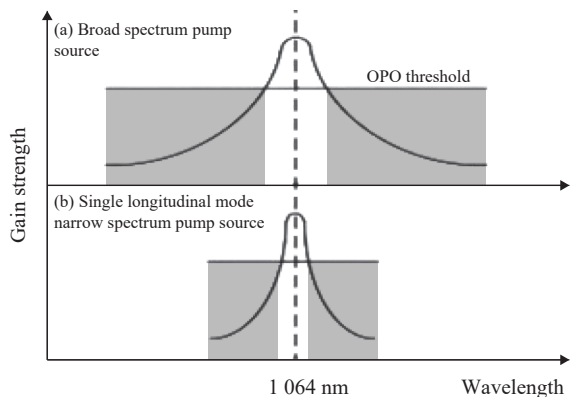


图 2 光纤激光器输出波长与增益强度示意图

Fig.2 Schematic diagram of output wavelength and gain intensity of fiber laser

匹配的效果, 从而提升参量光的转换效率。而且当闲频光的实际波长变大时, 泵浦光的线宽展宽对参量光线宽影响呈正比, 所以采用窄线宽光纤激光器泵浦光学参量振荡器有实质性意义。

2 实验装置

实验中, OPO 泵浦源采用最高输出功率为 40.3 W 的 1064 nm 全光纤 MOPA 模块, 消光比优于 15 dB, 装置如图 3 所示。使用电控方法对 1064 nm 激光器有源波导区界面附近制作周期光栅来提供反馈; 半导体管作为种子源, DFB 种子源线宽为 3 MHz。以调节电路的方式, 对激光器的通电时间和总时间比值及脉冲的波形状加以控制, 再根据对电路的控制程度来决定脉宽等各项参数。进行一级放大时, 使用长度为 3 m、纤芯数值孔径 $NA=0.12$ 的偏振光传输光纤, 当给定泵浦波长为 976 nm 时, 测得其包层所对应的吸收率 $\alpha=1.80$ dB/m, 能够达到 30 mW 输出; 进行二级放大时, 使用长度为 3 m、具有两个包层的光纤, 光纤纤芯和所对应的最内层孔径分别为 $NA=0.075$ 、 $NA<0.46$, 同样泵浦 976 nm 时, 测得吸收率 $\alpha=4.95$ dB/m, 能够达到 200 mW 输出; 进行第三级放大时, 与上一级使用同一光纤, 同样泵浦波长为 976 nm 时, 测得吸收率 $\alpha=4.95$ dB/m, 最后输出 40 W 脉冲光, 脉宽为 2 ns, 重复频率 0~5 MHz 可调。1064 nm 激光泵浦 MgO:PPLN-OPO 实验装置如图 4 所示, 1064 nm 光纤激光器输出的偏转基频光通过半波片后, 使其对准 MgO:PPLN 晶体的主轴, 以获得最大的 OPO 转换效率。泵浦光经过焦距为 150 mm 的聚焦透镜 F 聚焦到掺杂浓度为 5%MgO 的 PPLN 晶体中心, 晶体尺寸为 30 mm×2 mm×5 mm, 周期为 29.5 μm , 晶体两端镀有 1064 nm /3.8 μm 增透膜, 将其放置在相应尺寸的晶体

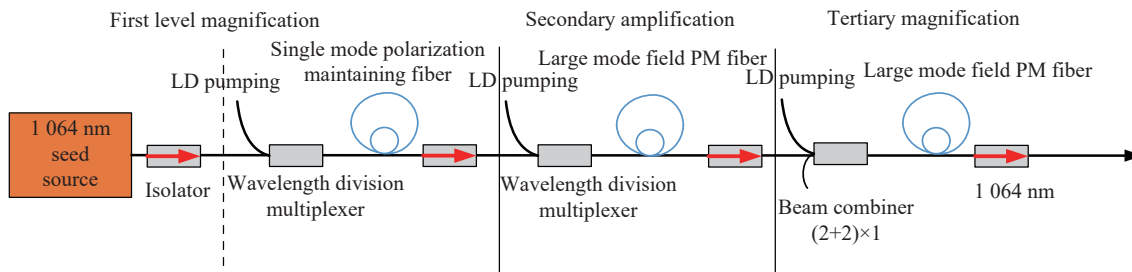


图 3 光纤激光器结构图

Fig.3 Structure diagram of fiber laser

夹中,正常室温下开展实验研究。实验中谐振腔是由曲率半径均为 150 mm 的 M1 和 M2 组成的双凹线型腔,腔长为 80 mm,其中输入镜 M1 表面镀有 1064 nm 高透、1.4~1.5 μm 和 3.7~4.2 μm 高反膜,输出镜 M2 表面镀有 1064 nm 高反、1.4~1.5 μm 高反、3 750~3 850 nm 高透膜。

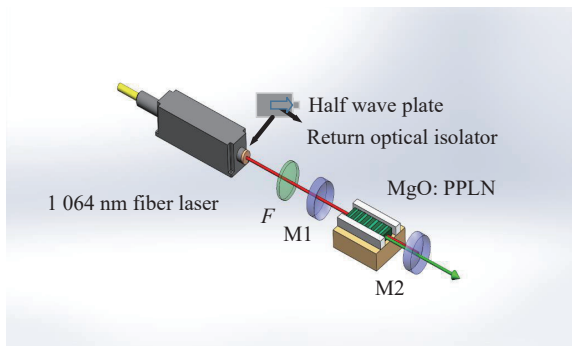


图 4 1064 nm 光纤泵浦 MgO:PPLN-OPO 实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of 1 064 nm fiber pumped MgO:PPLN-OPO experimental device

3 实验结果与分析

首先开展 1064 nm YDFL(Ytterbium-doped Fiber Laser) 输出特性实验。当设定电流 8 A 时,输出激光中心波长为 1064.17 nm,获得输出功率为 40.3 W,线宽为 2.5 nm。为了能获得 1064 nm 窄线宽激光输出,采用了一个电调制 1064 nm 的分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB) 半导体管作为种子源,可将线宽从原来 2.5 nm 压窄至 0.1 nm,同时在此结构下还能实现光反馈,不但使频率能够更加稳定,而且还可忽略光栅与掺镜光纤相熔接所存在的损耗问题。经调制后在相同的电流下,输出激光中心波长为 1064.1 nm,线宽压窄至 0.1 nm,输出功率为 39.6 W。对线宽压窄前后激光的输出光谱进行测量,光谱图如图 5 (a)(未经压窄时的泵浦源线宽)和图 5(b)(压窄后的泵浦源的线宽)所示。通过对比可以看出,线宽压窄前后中心波长变化极小,而且引入光纤布拉格光栅的方式可将 1064 nm 激光线宽极大程度的压窄,线宽可由 2.5 nm 压窄到 0.1 nm。线宽压窄前后 1064 nm YDFL 输出功率如图 6 所示。

基于上述研究,采用 1064 nm 光纤激光作用于 MgO:PPLN 晶体的 OPO,在晶体温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,参量光输出光谱如图 7 所示,其中心波长为 3832.9 nm。

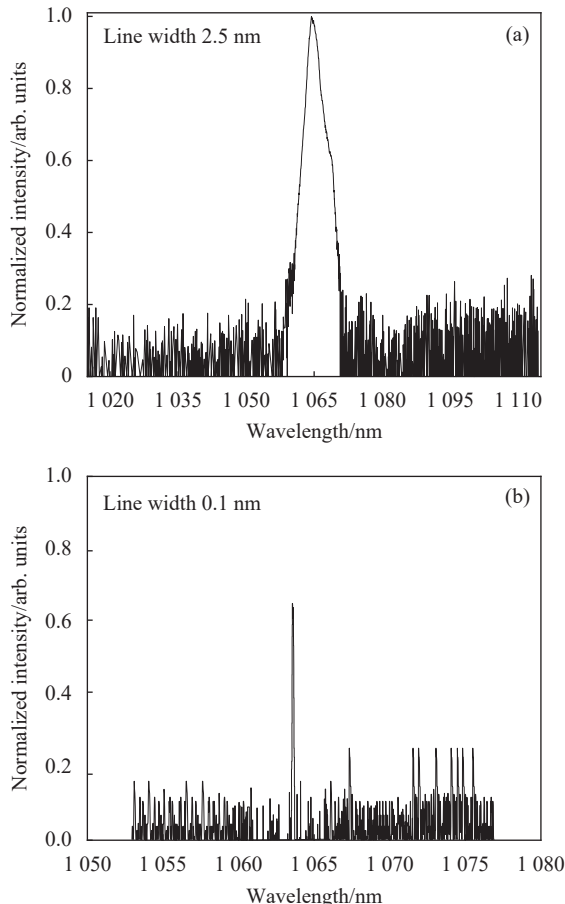


图 5 1064 nm YDFL 不同线宽光谱图

Fig.5 Spectra of 1064 nm YDFL with different linewidths

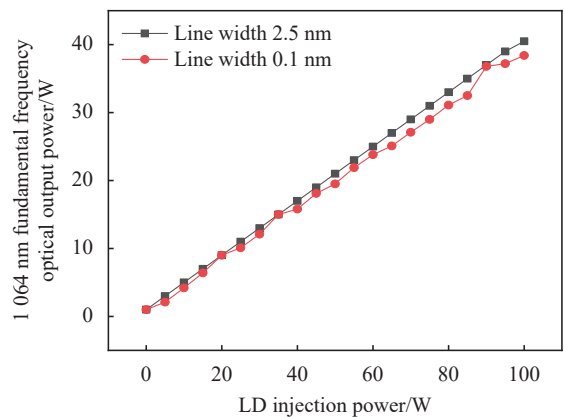


图 6 压窄线宽前后 1064 nm YDFL 功率对比

Fig.6 1 064 nm YDFL power comparison before and after linewidth narrowing

根据理论分析,开展了相同泵浦条件下,透镜位置与输出特性关系实验,不同透镜位置时输出 3.8 μm 参量光的功率曲线如图 8 所示。由于聚焦镜 F 距离输入镜的长度逐渐变小,OPO 腔内光斑的匹配效果也随之

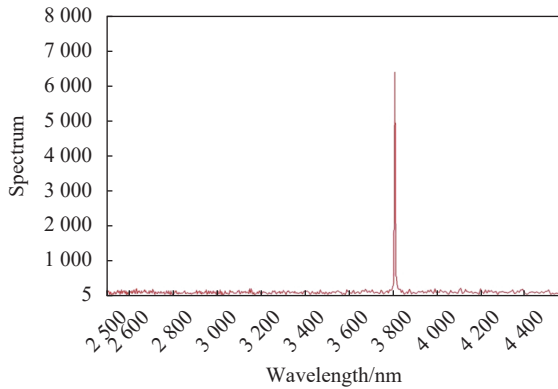


图 7 输出光谱

Fig.7 Output spectrum

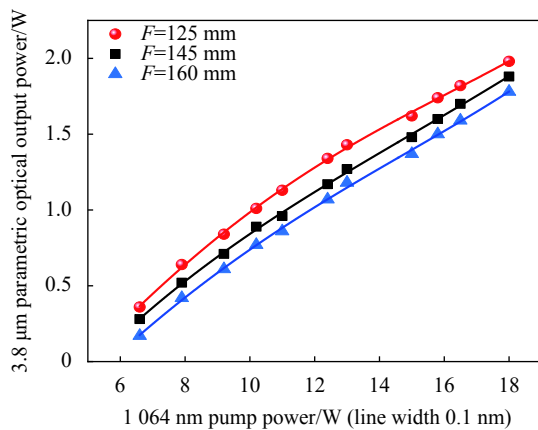
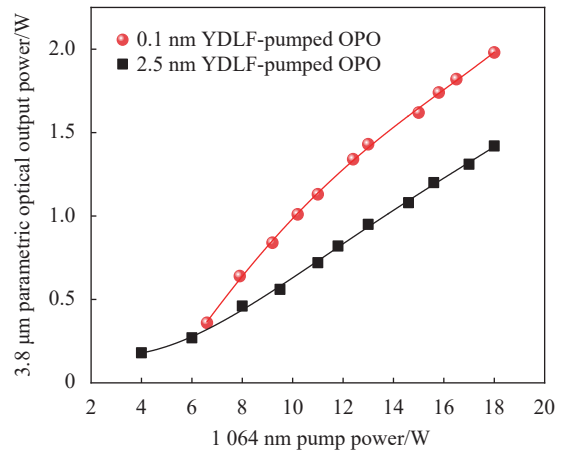


图 8 泵浦一致透镜位置变化时对应的输出情况

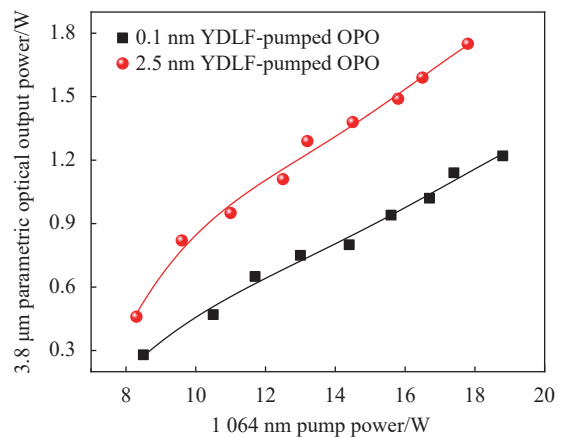
Fig.8 The corresponding output condition when the position of the pump uniform lens changes

变差,参量光转换效率受到不同程度影响。当透镜 F 距离泵浦源长度为 125 mm,此时转换效率最佳,把其同上文模拟部分加以对比分析,模拟与实验结果一致。在不同占空比情况下开展 1064 nm 激光线宽压窄前后分别作用于 OPO 的实验,并对测得功率加以对比,实验结果如图 9 所示。通过对图 9(a)和 9(b)中的实验数据对比分析可知,泵浦源占空比为 0.2% 时,起振阈值、输出功率均优于占空比为 0.3% 时。由于 1064 nm YDFL 注入功率过高,晶体会出现不同程度损坏,因此泵浦功率应不超过 20 W。在给定功率 18 W 时,采用线宽压窄前 1064 nm 掺镱光纤激光器泵浦 MgO:PPLN 晶体,测得最大输出功率达 1.42 W,光-光效率为 7.9%;对泵浦光线宽进行压窄,其他实验参数不变的情况下,获得最大输出达到 1.98 W 的 3.83 μm 激光输出,光-光转换效率为 11%,输出效率提高了 39.2%,光束质量 $M^2=1.89$ 。通过实验可知,相同泵浦

功率时,采用窄线宽 1064 nm 光纤激光器作为泵浦源作用于 MgO:PPLN-OPO 获得的激光功率更高。光束质量分析图如图 10 所示。



(a) 占空比为 0.2%
(a) Duty cycle is 0.2%



(b) 占空比为 0.3%
(b) Duty cycle is 0.3%

图 9 不同泵浦占空比下输出对比

Fig.9 Output comparison before and after different pump duty cycles

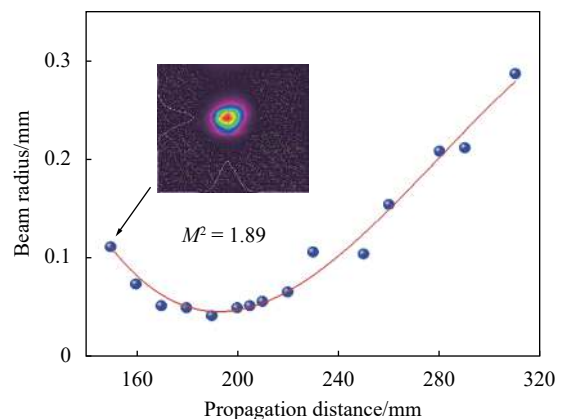


图 10 3.8 μm 光束质量因子

Fig.10 3.8 μm beam quality factor

4 结 论

综上所述,采用性能优异的 1064 nm 全光纤 MOPA 结构作为泵浦源,实现了高转换效率、结构紧凑的中红外光学参量振荡器。当 1064 nm 光纤激光器输出功率为 18 W 时,线宽为 2.5 nm,获得输出功率为 1.42 W 的 3.8 μm 激光输出,光-光转换效率为 7.9%;当泵浦源线宽调制为 0.1 nm,相同泵浦功率时,获得最大平均功率为 1.98 W 的 3.83 μm 激光输出,光-光转换效率为 11%,MgO:PPLN 光学参量振荡器的输出效率提高了 39.2%,光束质量 $M^2=1.89$ 。

参考文献:

- [1] Lippert E, Fonnum H, Arisholm G, et al. A 22-Watt mid-infrared optical para-metric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26475-26483.
- [2] Liu Qiangqiang, Zhu Hongli, Guo Guqing, et al. Simultaneous detection of SO₂ and SO₃ based on mid-ir quantum cascade laser system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(5): 424-431. (in Chinese)
- [3] He Qixin, Li Jiakun, Feng Qibo, et al. Development of a mid-infrared cavity enhanced formaldehyde detection system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2077-2081. (in Chinese)
- [4] Wei Pengfei, Zhang Yongchang, Zhang Jing, et al. Efficient continuous-wave MgO: PPLN optical parametric oscillator with three-mirror linear cavity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 45-50. (in Chinese)
- [5] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512. (in Chinese)
- [6] Yao Wenming, Tan Huiming, Wang Fan, et al. Extra-cavity, all-solid-state continuous wave optical parametric oscillator and stimulated Raman scattering in PPMgLN [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1202008. (in Chinese)
- [7] Zhai B, Li H, Luo H, et al. Tunable Fe²⁺: ZnSe passively Q-switched Ho³⁺-doped ZBLAN fiber laser around 3 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.
- [8] Wei C, Luo H, Zhang H, et al. Passively Q-switched mid-infrared fluoride fiber laser around 3 μm using a tungsten disulfide (WS₂) saturable absorber [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105108.
- [9] Li Chong, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624. (in Chinese)
- [10] Qin Xinzhen. Studies on the mid-infrared Optical Parametric Oscillator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [11] Shang Yaping. High-power fiber lasers pumped mid-infrared optical parametric oscillator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] Bai Xiang, He Yang, Yu Deyang, et al. Miniaturized mid-infrared MgO: PPLN optical parametric oscillator with high beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190512. (in Chinese)
- [13] Shen Limei. Research on mid-infrared optical parametric oscillator pumped by dual-wavelength fiber laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Li Ye. Research on intracavity optical parametric oscillator based on ytterbium-doped fiber laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] Dong Wenqian, Hao Qiang, Huang Kun, et al. A single-pass optical parametric mid-infrared ultra-short pulse laser system based on all polarization-maintaining fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1236001. (in Chinese)
- [16] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(6): 415-431.