中国光学
Chinese Optics
核心期刊

窄线宽 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器

陈柄言 于永吉 吴春婷 金光勇

High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth nm fiber laser

CHEN Bing-yan, YU Yong-ji, WU Chun-ting, JIN Guang-yong

引用本文:
陈柄言, 于永吉, 吴春婷, 金光勇. 窄线宽 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 361-367. doi: 10.37188/CO.2020-0169
CHEN Bing-yan, YU Yong-ji, WU Chun-ting, JIN Guang-yong. High efficiency mid-infrared 3.8 m MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth nm fiber laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 361-367. doi: 10.37188/CO.2020-0169

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020-0169

文章编号　2095-1531(2021)02-0361-07

窄线宽 1 064 nm 光纤激光泵浦高效率中红外 3.8 μm MgO:PPLN 光参量振荡器

陈柄言，于永吉，吴春婷，金光勇*
（长春理工大学 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：采用放大 1 064 nm 掺镱光纤激光器作为泵浦源，实现了中红外 3.8 μm MgO:PPLN 光参量振荡（OPO）激光输出。在泵浦源中，采用分布式反馈激光器（DFB）作为种子源来实现光纤激光窄线宽的调制，实现线宽 2.5 nm 到 0.1 nm 的压缩，最大平均输出功率可达 40 W。进一步对不同泵浦线宽条件下中红外 3.8 μm MgO:PPLN OPO 激光进行研究，最终在泵浦功率为 18.1 W、线宽为 0.1 nm、重频为 1 MHz、脉宽为 2 ns 时，获得了最高平均输出功率为 2.06 W 的 3 822.5 nm 激光输出，光-光转换效率为 11.38%，光束质量为 M^2=2.34，提高了窄线宽泵浦对中红外 MgO:PPLN OPO 激光输出效率。

关　键　词：光纤激光器；MgO:PPLN；光参量振荡器
中图分类号：O43　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.37188/CO.2020-0169

High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1 064 nm fiber laser

CHEN Bing-yan, YU Yong-ji, WU Chun-ting, JIN Guang-yong*
(*Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application*, *School of Science*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *jgycust*@163.*com*

Abstract: In this paper, a 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser with Main Oscillation Power Amplification (MOPA) was used as the pump source to achieve mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN Optical Parametric Oscillation (OPO) laser output. In the pump source, the Distributed Feedback Laser (DFB) was used as the seed source to realize the modulation of the narrow linewidth of the fiber laser. The linewidth of 2.5 nm was compressed to 0.1 nm, and the maximum output power was 40 W. The mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN OPO laser was researched under different pump linewidths. Finally, when the pump power was 18.1 W, the line width was 0.1 nm, the repetition frequency was 1 MHz, and the pulse width was 2 ns, the output laser with the maximum power of 2.06 W and the wavelength of 3 822.5 nm was achieved. The corresponding optical-

收稿日期：2020-09-15；**修订日期：**2020-10-13
基金项目：国家自然科学基金面上项目(No. 11974060)；吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目(No. 20190101004JH)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11974060); the Science and Technology Department Project of Jilin Province (No. 20190101004JH)

optical conversion efficiency is 11.38%, and the beam quality is M^2 = 2.34. This research can efficiency improve the output efficiency of narrow linewidth pumped mid-infrared MgO:PPLN OPO.

Key words: fiber laser; MgO:PPLN; optical parametric oscillator

1 引 言

3~5 μm 光源作为大气窗口输出波段,在遥感技术、高分辨率光谱学、激光医疗及激光通信等领域具有深远的研究意义和广泛的应用前景[1-4]。基于非线性光学变频技术的准相位匹配光参量振荡器具有调谐范围宽、调谐方式灵活、结构简单紧凑、转换效率高等优点,是获得高效中红外激光输出的有效技术手段[5-9]。然而,传统的全固态光参量振荡器(OPO)存在较严重的热效应问题,并且整体结构复杂,难以同时兼顾高重复频率和高峰值功率。近年来,大功率光纤激光系统由于具有稳定度高、输出功率高、便于热管理等优点[10-12],越来越多地被用作泵浦光源应用于固体激光系统中。基于此种技术体制进行结构紧凑、易于调控的中红外 OPO 系统的优化设计成为了目前研究的热点之一。

近年来,采用光纤泵浦 OPO 实现 3~4 μm 中红外激光输出的相关报道很多[13-14]。但针对波长大于 3.8 μm 的光纤泵浦中红外 OPO 的研究,由于泵浦与闲频光间有存在较大的波长差会导致量子亏损,致使变频效率偏低,而通过提高泵浦功率间接增大中红外激光输出功率,又会导致光纤泵浦源出现非线性效应,致使光束质量恶化、输出线宽展宽,这些因素使得该方面的研究相对较少。同时 PPLN 晶体在中远红外波段(大于 4 μm)存在的光子吸收,最终导致目前的长波闲频光输出大多限制在 1 W 左右[15]。2013 年,清华大学柳强等人报道了由高功率掺镱光纤 MOPA 结构泵浦 MgO:PPLN OPO 产生 4 μm 中红外激光输出[16],在泵浦功率为 18.5 W 时,获得了 2.03 W、4 μm 的激光输出,线宽为 0.16 nm,斜率效率为 11%。但是该研究中部分泵浦被反射回最后一级光纤放大器中,当泵浦功率超过 18.5 W 时,由于高功率的回波反射激光中未能充分隔离,会导致光纤泵浦源乃至耦合系统的器件损坏。在该研究的基础上,本文中采用 1 064 nm 高重频掺镱光纤 MOPA 作为泵浦源(其最高平均输出功率为 40 W,线宽为 2.5 nm,调制后线宽可达 0.1 nm)进一步泵浦 MgO:PPLN OPO,研究不同泵浦线宽对中红外 OPO 激光输出的影响,证明了窄线宽泵浦条件下能够有效提高中红外激光的输出转换效率,最终在 0.1 nm 的窄线宽泵浦光源下,获得最高平均输出功率为 2.06 W 的 3.8 μm 激光输出,光-光转换效率为 11.38%。

2 理论分析

一般情况下,激光输出光谱总会存在一定的线宽而非单一波长,而在非线性频率变换过程中不同泵浦波长所对应的满足相位匹配条件的参量光波长不同,因此泵浦光的线宽将影响输出参量光的变化。对于某一固定波长闲频光来说,相位失配主要来源于泵浦光和信号光的失配,因此可得泵浦光线宽引起的闲频光线宽展宽为[17]:

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{\mathrm{d}\tilde{\nu}}{\mathrm{d}k} = \left(\frac{n_{\mathrm{eff,p}} - n_{\mathrm{eff,i}}}{n_{\mathrm{eff,s}} - n_{\mathrm{eff,i}}}\right)\Delta\tilde{\nu}_{\mathrm{p}} \quad , \tag{1}$$

其中$n_{\mathrm{eff,p}}$、$n_{\mathrm{eff,i}}$和$n_{\mathrm{eff,s}}$为泵浦光、闲频光和信号光的有效折射率,$\Delta\tilde{\nu}_{\mathrm{p}}$为泵浦光线宽展宽量。对于频谱线型为高斯型的泵浦激光,泵浦光强度下降 5%,信号光强度将下降 1/2,低于最大值 5% 处的频率宽度$\Delta\tilde{\nu}$近似等于 0.3 倍的高斯半峰全宽,则式(1)变为:

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{\mathrm{d}\tilde{\nu}}{\mathrm{d}k} = 0.3\times\left(\frac{n_{\mathrm{eff,p}} - n_{\mathrm{eff,i}}}{n_{\mathrm{eff,s}} - n_{\mathrm{eff,i}}}\right)\Delta\tilde{\nu}_{\mathrm{p}} \quad . \tag{2}$$

由此给出泵浦光线宽引起的参量光线宽展宽曲线图,如图 1 所示。从图中可以看出,随着泵浦光线宽的增加,闲频光线宽展宽迅速增加,因此,通过相对较窄谱线宽度的光纤激光泵浦 MgO:PPLN,能够提高准相位匹配变频耦合精度,进而间接提升变频效率,实现高效率窄线宽

中红外激光输出。同时, 随着闲频光波长的增加, 由泵浦光线宽引起的线宽展宽是逐渐减弱的, 这对于实现窄线宽长波中红外激光是有利的。

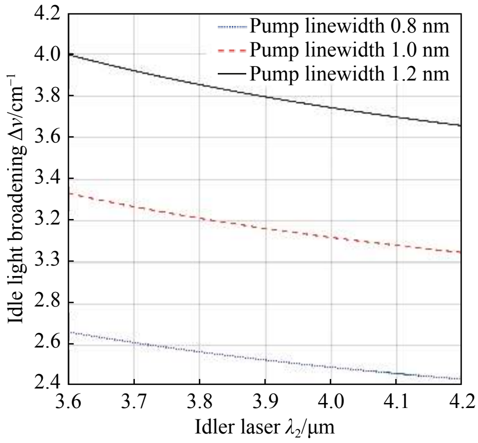


图 1　不同泵浦光线宽下闲频光线宽展宽与闲频光波长的关系曲线

Fig. 1　Relationship between idle light broadening and idle wavelength under different pump light linewidthes

3　实验装置

本实验采用的泵浦源为三级放大的 MOPA 1 064 nm 掺镱光纤激光器, 如图 2 所示。采用 1 064 nm DFB 半导体激光作为种子源, 通过调制电路控制种子源激光的占空比和脉冲波形。第一级放大中采用长度为 3 m、纤芯数值孔径为 0.12 的单模保偏光纤(Nufern PM-YDF-5/130), 在 976 nm 抽运波长下测量的光纤包层吸收系数 α=1.80 dB/m, 可获得 30 mW 的平均输出功率; 第二级放大中采用长度为 3 m 的双包层有源大模场 PM 光纤(Nufern PLMA-YDF-10/125), 纤芯数值孔径为 0.075, 内包层的数值孔径小于 0.46, 在 976 nm 抽运波长下测量的 α=4.95 dB/m, 可产生 200 mW 的平均输出功率; 第三级放大中的光纤是长度为 1.5 m 的双包层大模场 PM 光纤(Nufern PLMA-YDF-30/250), 其数值孔径及吸收系数与第二级放大中的 PM 光纤相同, 最终得到最高平均输出功率为 40 W 的 1 064 nm 激光输出。

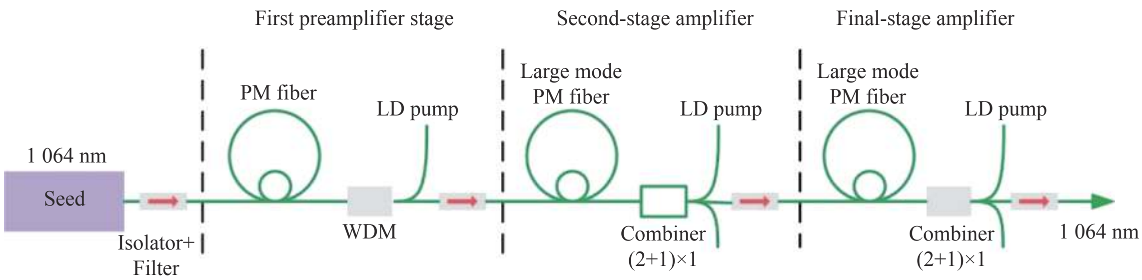


图 2　1 064 nm 掺镱光纤激光器装置图

Fig. 2　Schematic diagram of 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser

1 064 nm 光纤激光器泵浦 MgO:PPLN OPO 激光实验装置图如图 3 所示, 光纤激光通过半波片旋转, 对准 MgO:PPLN 晶体的主轴, 以获得最大的 OPO 转换效率。经过焦距为 150 mm 的聚焦透镜 F 耦合到掺杂浓度为 5% 的 MgO:PPLN 晶体中心, 晶体尺寸为 30 mm×2 mm×5 mm, 极化周期为 29.5 μm, 晶体两端镀有 1 064 nm 和 3.8 μm 增透膜。实验采用双凹线型腔, 其曲率半径均为 150 mm, 其中输入镜 M_1 表面镀有 1 064 nm 高透、3.7~4.2 μm 高反膜, 输出镜 M_2 表面镀有 1 064 nm 高反、1.4~1.5 μm 高反、1 064 nm 高透、3.75~3.85 μm 高透膜, 谐振腔物理长度为 80 mm。

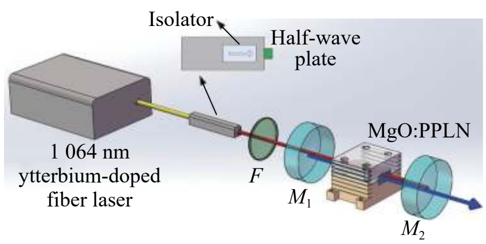
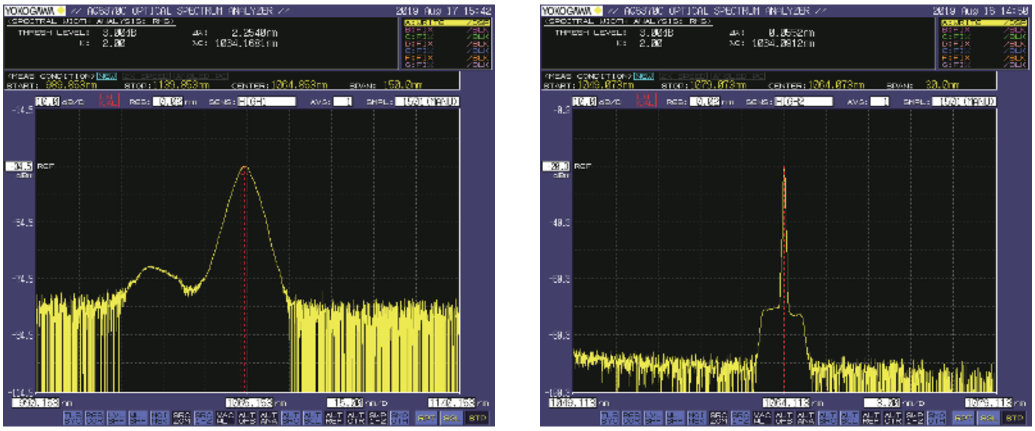


图 3　1 064 nm 掺镱光纤激光器泵浦的 MgO:PPLN OPO 实验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of MgO:PPLN OPO laser pumped by 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser



(a) 线宽调制前
(a) Before linewidth modulation

(b) 线宽调制后
(b) After linewidth modulation

图 4　1 064 nm 掺镱光纤激光器输出光谱对比图

Fig. 4　Comparison of output spectrum of the 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser

4　结果与分析

首先对泵浦源 MOPA 1 064 nm 掺镱光纤激光器进行了实验测量。图 4 为 1 064 nm 掺镱光纤激光器种子源线宽调制前后的输出光谱图。从图 4 中可以看出，通过引入 DFB 半导体激光作为种子源，其输出线宽可由原来的 2.5 nm 压缩到 0.1 nm，信噪比大于 50 dB，实现了窄线宽泵浦光源输出。在此基础上，对两种线宽下最大平均输出功率进行测量，如图 5 所示。从图中可以看出线宽调制前后其平均输出功率并没有明显变化，最大平均输出功率可达 40 W。同时，对其输出光束质量进行测量，如图 6 所示。由图 6 可见，其光束质量为 1.38，接近衍射极限，可以作为 MgO:PPLN OPO 优质的泵浦光源。

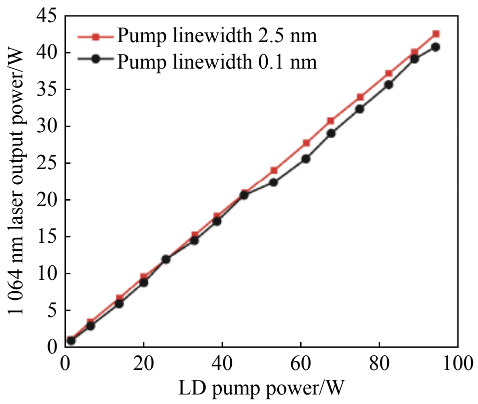


图 5　不同线宽下 1 064 nm 掺镱光纤激光器的平均输出功率对比图

Fig. 5　Comparison of output power of the 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser with different linewidths

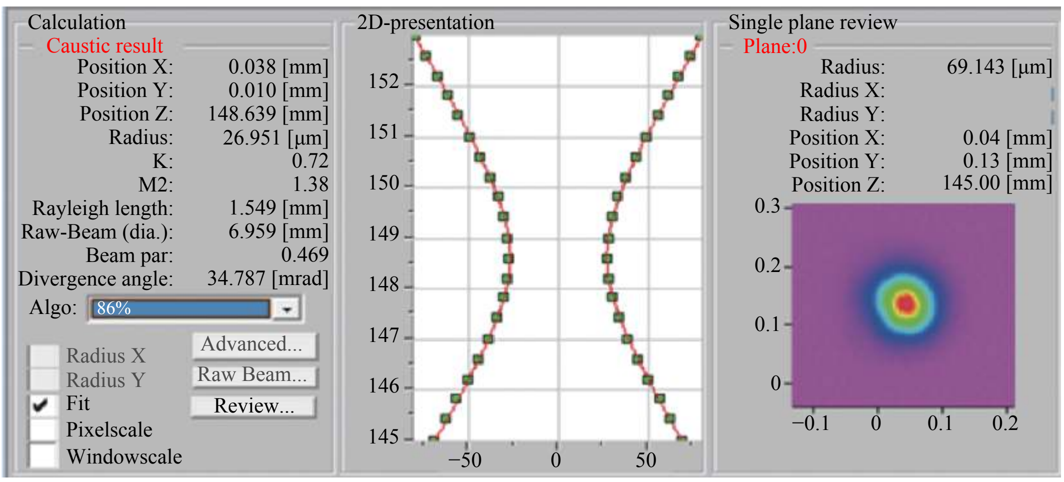


图 6　窄线宽 1 064 nm 掺镱光纤激光光束质量

Fig. 6　Beam quality of the narrow linewidth 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser

在此基础上, 对 1 064 nm 光纤激光泵浦中红外 3.8 μm MgO:PPLN OPO 进行实验测量。同样对比了泵浦源线宽调制前后 MgO:PPLN OPO 中红外激光输出的情况。图 7 为在光纤激光重频为 1 MHz, 脉宽为 2 ns 时, 不同线宽下的输出功率。从图中可以看出, 相对于 0.1 nm 泵浦线宽, 2.5 nm 泵浦线宽的平均输出功率和转换效率明显小很多。正如之前理论分析的一样: 谱线加宽会引起一部分光出现相位失配, 从而使宽光谱泵浦情况下的一部分光无法产生参量转换, 最终导致非线性频率变换转换效率下降, 导致宽光谱泵浦时输出功率明显降低。在泵浦功率为 18.1 W、线宽为 0.1 nm 时, 获得 3.8 μm 闲频光最大平均输出功率为 2.06 W, 转换效率为 11.38%。图 8 为所测量的闲频光输出光谱图, 同时, 测量了在最高输出功率下的脉冲序列图和脉冲宽度图, 如图 9 所示, 最终获得的 3.8 μm 中红外激光输出脉宽为 1.63 ns。

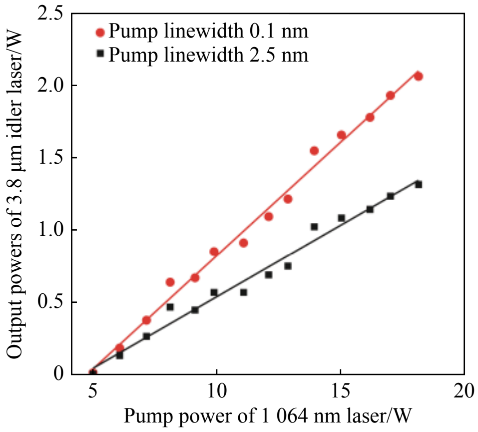


图 7　不同线宽 1 064 nm 掺镱光纤激光泵浦 MgO:PPLN OPO 平均输出功率

Fig. 7　The output powers of MgO:PPLN OPO pumped by 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser with different linewidths

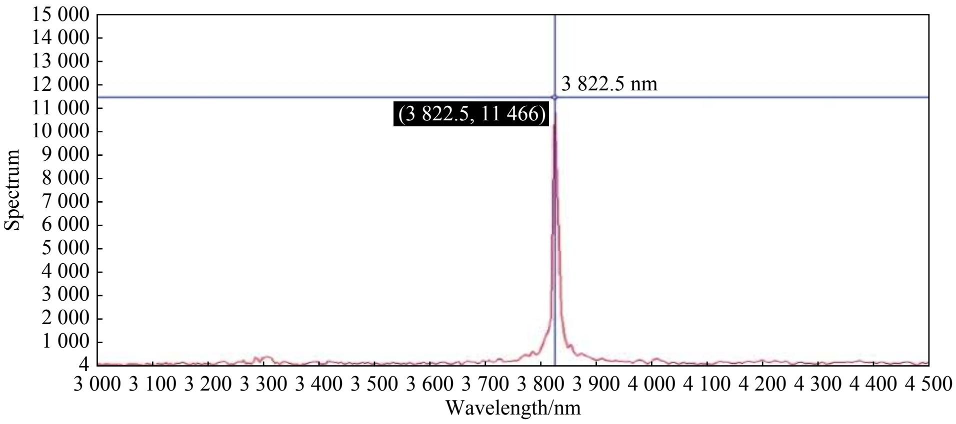


图 8　窄线宽 1 064 nm 掺镱光纤激光泵浦 MgO:PPLN OPO 输出光谱图

Fig. 8　The output spectrum of MgO:PPLN OPO pumped by the narrow linewidth 1 064 nm ytterbium-doped fiber laser

同时对 MgO:PPLN OPO 3.8 μm 闲频光输出波长和光束质量进行测量, 如图 10 所示。由于实验采用 ARC 傅立叶光谱仪进行测量, 其分辨率相对较低, 因此无法准确获得其输出线宽, 但是其输出中心波长为 3 822.5 nm, 并且有很高的信噪比。采用 Pyrocam Ⅲ热释电光束质量分析仪基于经典的 90/10 刀口法测量得到最高平均输出功率时的光束质量为 M^2=2.34。相对于泵浦光源的光束质量, 参量光的光束质量产生了一定的恶化, 这主要是由于参量转换过程中三波耦合出现的轻微走离效应, 以及晶体温度控制的轻微波动综合导致的。

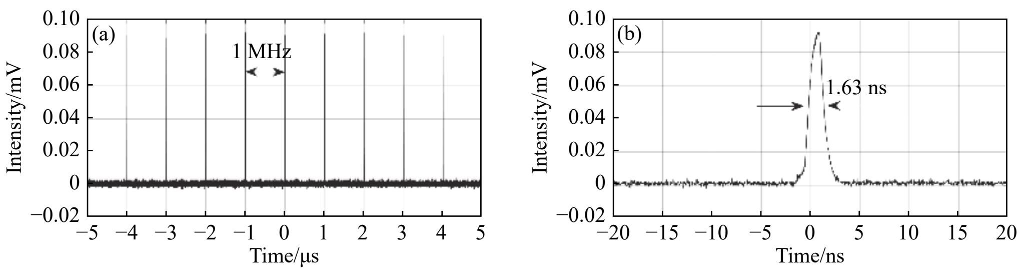


图 9　MgO:PPLN OPO 3.8 μm 激光输出脉冲序列和脉冲宽度图

Fig. 9　Pulse sequence and pulse width of the MgO:PPLN OPO 3.8 μm laser

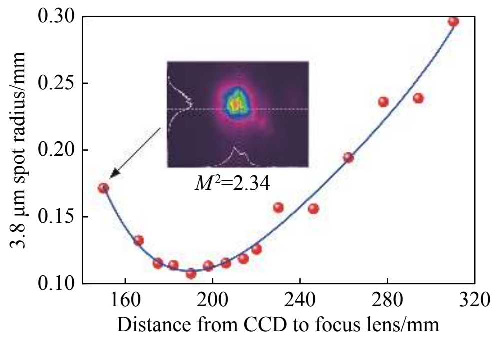


图 10 窄线宽 1064 nm 掺镱光纤激光泵浦 MgO:PPLN OPO 输出光束质量

Fig. 10 Beam quality of MgO:PPLN OPO pumped by the narrow linewidth 1064 nm ytterbium-doped fiber laser

5 结 论

本文基于 MgO:PPLN 晶体，采用性能优异的主振荡功率放大 1064 nm 掺镱光纤激光器作为泵浦源，实现了高转换效率且结构紧凑的中红外光参量振荡器。对泵浦源采用分布式反馈激光器（DFB）作为种子源，实现光纤激光泵浦源输出线宽从 2.5 nm 到 0.1 nm 的压缩，最大平均输出功率为 40 W。在此基础上，通过实验研究了不同泵浦线宽对中红外 3.8 μm MgO:PPLN OPO 激光输出的影响，发现泵浦线宽变窄可以明显提高 3.8 μm 闲频光的转换效率。最终在泵浦功率为 18.1 W，线宽为 0.1 nm，重频为 1 MHz，脉宽为 2 ns 条件下，实现了中心波长为 3822.5 nm，最高平均输出功率为 2.06 W 的激光输出，光-光转换效率为 11.38%，光束质量为 M^2=2.34。此项研究提高了窄线宽泵浦对中红外 MgO:PPLN OPO 激光输出效率，为高功率中红外激光的实现及应用深化打下基础。

参考文献：

[1] LIPPERT E, FONNUM H, ARISHOLM G, *et al*.. A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26475-16483.

[2] LIU J, LIU Q, YAN X, *et al*.. High repetition frequency PPMgOLN mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(9): 630-633.

[3] 曾怡帅，杨友良，马翠红. 有尘环境多组分气体成分检测系统的设计[J]. 发光学报，2016，37(7)：859-865.
ZENG Y SH, YANG Y L, MA C H. Design of the detection system of multi component gas composition in dust environment[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(7): 859-865. (in Chinese)

[4] 刘俊池，李洪文，王建立，等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学 精密工程，2015，23(6)：1547-1557.
LIU J CH, LI H W, WANG J L, *et al*.. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1547-1557. (in Chinese)

[5] 姚江宏，刘志伟，薛亮平，等. 低阈值温度调谐PPMgLN红外光参量振荡[J]. 发光学报，2007，28(1)：18-22.
YAO J H, LIU ZH W, XUE L P, *et al*.. Low-threshold and temperature tunable optical parametrical oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO$_3$ crystal[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, 28(1): 18-22. (in Chinese)

[6] 于永吉，陈薪羽，成丽波，等. 基于MgO:APLN的1.57 μm/3.84 μm连续波内腔多光参量振荡器研究[J]. 物理学报，2015，64(22)：224215.
YU Y J, CHEN X Y, CHENG L B, *et al*.. Continuous-wave 1.57 μm/3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224215. (in Chinese)

[7] SHENG Q, DING X, SHANG C, *et al*.. Continuous-wave intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator with resonant wave output coupling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27953-27958.

[8] 苏辉，李志平，段延敏，等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器[J]. 光学 精密工程，2013，21(6)：1404-1409.
SU H, LI ZH P, DUAN Y M, *et al*.. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1404-1409. (in Chinese)

[9] 尉鹏飞，张永昶，张静，等. 三镜直腔结构MgO:PPLN高效连续光参量振荡器[J]. 光学 精密工程，2019，27(1)：45-50.
WEI P F, ZHANG Y CH, ZHANG J, *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)

[10] 张雪霞，葛廷武，丁星，等. 分布式抽运连续光纤激光器研究[J]. 发光学报，2016，37(9)：1071-1075.

ZHANG X X, GE T W, DING X, *et al*.. Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(9): 1071-1075. (in Chinese)

[11] LI J F, LUO H Y, WANG L L, *et al*.. Tunable Fe^{2+}: ZnSe passively Q-switched Ho^{3+}-doped ZBLAN fiber laser around 3 μm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.

[12] WEI CH, LUO H Y, ZHANG H, *et al*.. Passively Q-switched mid-infrared fluoride fiber laser around 3 μm using a tungsten disulfide (WS_2) saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105108.

[13] JIANG P P, CHEN T, YANG D ZH, *et al*.. A fiber laser pumped dual-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator based on aperiodically poled magnesium oxide doped lithium niobate[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(11): 115405.

[14] MURRAY R T, RUNCORN T H, GUHA S, *et al*.. High average power parametric wavelength conversion at 3.31-3.48 μm in MgO:PPLN[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6421-6430.

[15] 尚亚萍. 高功率光纤激光泵浦中红外光学参量振荡器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
SHANG Y P. High-power fiber lasers pumped mid-infrared optical parametric oscillator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese).

[16] LIU Q, WANG L, CHEN H L, *et al*.. High repetition rate, 4 μm mid-infrared generation with periodically poled magnesium-oxide-doped lithium niobate based optical parametric oscillator pumped by fiber laser[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(5): 052704.

[17] 李港. 激光频率的变换与扩展: 实用非线性光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LI G. *Conversion and Expansion of Laser Frequency*: *Practical Nonlinear Optical Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese).

作者简介:

陈柄言(1988—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 2014 年于长春理工大学获得硕士学位, 现为长春理工大学理学院物理系博士生, 主要从事中红外激光器方面的研究。E-mail: chenbycust@163.com

金光勇(1971—), 男, 吉林长春人, 研究员, 2003 年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学理学院院长, 主要从事激光及其与物质相互作用研究。E-mail: jgycust@163.com