



·激光器件·

光纤激光泵浦 MgO:PPLN 高功率 中波红外光参量振荡器*

何 洋¹, 陈 飞¹, 万浩华^{1,2}, 季艳慧^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为实现高效率、高功率中波红外激光输出, 研制基于 MgO:PPLN 晶体的中波红外光参量振荡器 (OPO), 泵浦源为基于主振荡功率放大 (MOPA) 结构的线偏振掺 Yb 光纤激光器 (YDFL)。实验结果表明: YDFL 可实现最高 79.1 W 的 1064.1 nm 脉冲线偏振激光输出; 在 YDFL 泵浦下, 通过优化输出镜曲率半径和泵浦光束腰直径, 该 OPO 实现最高 9.15 W 的 3.754 μm 脉冲激光输出, 光光转换效率为 11.57%, 重复频率为 300 kHz, 脉冲宽度约为 110 ns。

关键词: 光参量振荡器; MgO:PPLN 晶体; 掺 Yb 光纤激光器; 中波红外激光; 高功率

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210308

Fiber-laser-pumped high-power mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN crystal

He Yang¹, Chen Fei¹, Wan Haohua^{1,2}, Ji Yanhui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To achieve high-power mid-infrared laser output with high efficiency, the optical parametric oscillator (OPO) based on MgO:PPLN crystal is researched. The pump source is linearly polarized Yb-doped fiber laser (YDFL) with master oscillator power amplifier (MOPA) structure. Experimental results indicate that the YDFL can realize the pulse linearly polarized laser with the highest power of 79.1 W at 1064.1 nm. With the pump laser, the OPO obtains the maximum MIR power of 9.15 W at 3.754 μm by optimizing the curvature radius of output coupler and the pump waist diameter. The corresponding optical-to-optical conversion efficiency is 11.57%. The repetition rate and the pulse width of mid-infrared laser are 300 kHz and ~ 110 ns, respectively.

Key words: optical parametric oscillator, MgO:PPLN crystal, Yb-doped fiber laser, mid-infrared laser, high-power

中波红外激光处于大气红外窗口, 而且对应多数分子的特征吸收谱, 因此, 中波红外激光在大气环境监测、遥感测量、光电探测和光电对抗等领域有着重要应用^[1-4]。采用波段 1 μm 激光器泵浦基于 MgO:PPLN 晶体的光参量振荡器 (OPO) 是实现高功率中波红外激光输出的有效途径, 其中, 线偏振掺 Yb 光纤激光器 (YDFL) 具备功率高、效率高、光束质量好、热管理便捷和可靠性高等优点, 适合作为基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO (MgO:PPLN-OPO) 的泵浦源, 有利于 MgO:PPLN-OPO 的工程应用。YDFL 泵浦 MgO:PPLN-OPO 的技术方案已得到大量实验验证^[5-9], 在输出功率方面, 当激光波长超过 3.5 μm 时, YDFL 泵浦 MgO:PPLN-OPO 可实现超过 6 W 的中波红外激光输出^[7]。然而, 与固体激光器泵浦的 MgO:PPLN-OPO^[10-11] 相比, YDFL 泵浦 MgO:PPLN-OPO 的输出功率还较低, 主要限制因素是 YDFL 输出的 1 μm 波段脉冲线偏振泵浦光功率较低。

* 收稿日期: 2021-07-22; 修订日期: 2021-10-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFE0203203); 国家自然科学基金项目 (62005274)

联系方式: 何 洋, heyang_3g@126.com。

在此背景下, 本文将介绍一种高功率线偏振 YDFL 泵浦的中波红外 MgO:PPLN-OPO, YDFL 采用主振荡功率放大(MOPA)结构, 可输出最高 79.1 W 的脉冲线偏振 1064 nm 激光, 通过实验对泵浦光斑束腰直径和 OPO 输出镜曲率半径进行优化, 当泵浦光束腰直径约为 320 μm , 输出镜曲率半径为 200 mm 时, MgO:PPLN-OPO 实现最高 9.15 W 的 3.754 μm 脉冲激光输出, 这是目前公开报道的光纤激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO 所获得的最高中波红外激光(波长 $\geq 3.7 \mu\text{m}$)输出功率, 相应的光光转换效率为 11.57%。

1 实验装置

如图 1 所示为实验装置图, 该激光器主要由线偏振 YDFL 和 OPO 组成。其中, 线偏振 YDFL 作为 OPO 的泵浦源, 它采用 MOPA 结构, 包括 1 个种子源和 3 级功率放大器。种子源为分布反馈(DFB)激光器, 可输出线偏振 1064 nm 种子激光, DFB 的输出功率由方波信号进行调制, 从而实现脉冲激光输出, 输出功率约为 10 mW。功率放大器由 3 级线偏振掺 Yb 光纤放大器(YDFA)组成, 均采用 976 nm 半导体激光器(LD)前向泵浦方式, 通过保偏(PM)合束器将泵浦光和激光耦合至增益光纤, 增益光纤均为熊猫型 PM 掺 Yb 光纤(YDF), 其中第 1 级 YDFA 采用芯径 6 μm 的单包层 PM YDF, 可将种子光放大至约 100 mW, 第 2 级和第 3 级 YDFA 分别采用芯径 12 μm 和 30 μm 的双包层 PM YDF 以实现高功率脉冲激光放大, 第 2 级 YDFA 输出功率约为 2 W。在 YDFA 的输入端均装有 PM 隔离器(ISO), 以防止后向反射光和放大自发辐射(ASE)对前端器件造成损伤。经过 3 级功率放大后的 1064 nm 线偏振泵浦光通过 PM 光纤准直器输出。

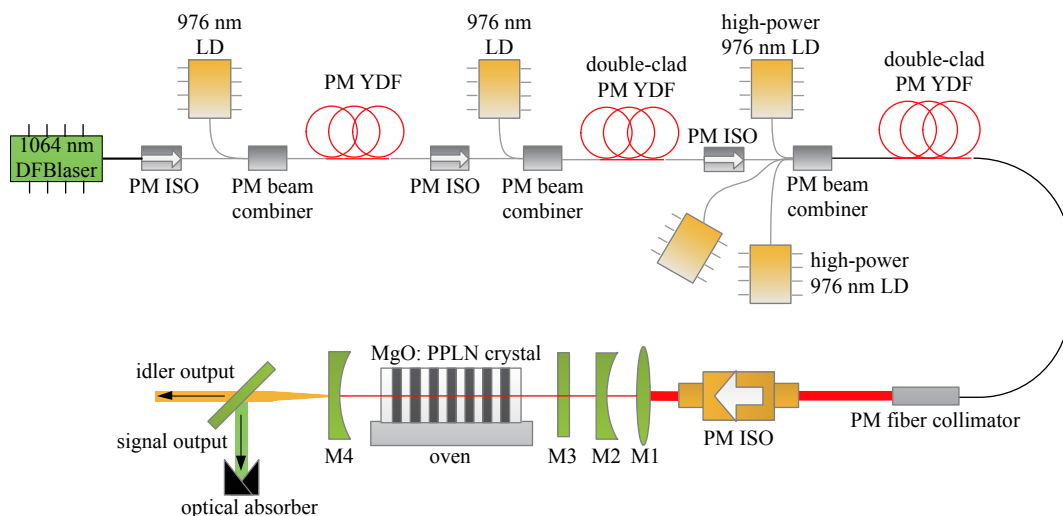


Fig. 1 Experimental setup of MgO:PPLN-OPO pumped by YDFL

图 1 YDFL 泵浦 MgO:PPLN-OPO 实验装置图

OPO 主要包括 ISO、缩束镜组、谐振腔镜、MgO:PPLN 晶体、加热炉和分束镜等。YDFL 输出的泵浦光首先通过 ISO 以防止后向反射光对光纤器件造成损伤, 同时, ISO 中的半波片将泵浦激光调整为竖直偏振以满足相位匹配条件。随后泵浦光经过缩束镜组 M1 和 M2 压缩光斑直径, 以提高泵浦光功率密度, 进而提高 OPO 的光光转换效率, 通过调节 M1 和 M2 的间距可改变泵浦光束腰直径。MgO:PPLN 晶体尺寸为 50 mm \times 3 mm \times 2 mm, MgO 掺杂摩尔质量分数为 5%, 极化周期为 29.5 μm , 晶体端面镀 1.06、1.48 和 3.80 μm 增透膜。MgO:PPLN 晶体固定在加热炉中, 工作温度设定在 70 $^{\circ}\text{C}$, 温控精度为 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。谐振腔采用平凹腔, 由平平镜 M3 和平凹镜 M4 组成, 采用信号光单谐振和泵浦光双通的方案, M3 镀 1.06 μm 高透、1.48 μm 和 3.80 μm 高反膜, M4 镀 1.06 μm 高反、3.80 μm 高透和 1.48 μm 部分反射膜(反射率 $\sim 70\%$), 谐振腔腔长为 80 mm, MgO:PPLN 晶体放置在谐振腔的中心位置。泵浦光入射 MgO:PPLN 晶体后, 在谐振腔的反馈下, 通过光学参量振荡过程, 获得近红外波段的信号光和中波红外波段的闲频光输出, 利用分光镜 M5 将信号光滤除, 最终获得高功率中波红外激光输出。

2 实验结果与分析

2.1 YDFL 输出特性

首先对 YDFL 的输出特性进行了实验研究。采用方波信号对 YDFL 的种子源进行调制, 为了在高功率泵浦情况下抑制 ASE 的产生, 实验中方波信号的重复频率较高, 设置为 300 kHz, 脉冲宽度为 200 ns。采用激光功率计对

通过 ISO 后的线偏振泵浦激光功率进行测试, 结果如图 2 所示。可见, 激光功率随第 3 级放大器 LD 功率线性增长, 在 LD 最高功率为 103.2 W 情况下, YDFL 的最高输出功率为 79.1 W, 光光转换效率为 76.6%。在最高输出功率情况下, YDFL 的光谱和光斑如图 2 所示, YDFL 的峰值波长为 1064.1 nm, 水平方向 M_x^2 因子与垂直方向 M_y^2 因子分别为 1.26 和 1.22。

如图 3 所示为在最高输出功率情况下 YDFL 激光的脉冲波形, 可见, 激光波形不再是方波, 由于放大过程中, 激光脉冲前沿获得的增益要高于后沿, 因此脉冲前沿的强度更高, 脉冲宽度约为 160 ns, 但是 1064 nm 激光的重复频率与方波信号一致, 均为 300 kHz。

2.2 OPO 输出特性

采用上述 YDFL 泵浦 MgO:PPLN-OPO, 首先分析输出镜

M4 曲率半径对中波红外激光功率的影响。如图 4 所示为 M4 曲率半径为 200、300 和 500 mm 情况下中波红外激光功率随泵浦功率变化曲线及最高输出功率下的中波红外激光光谱, 此时泵浦光束腰直径为 320 μm 。可见, 当泵浦功率较低时, 中波红外激光功率均随泵浦功率的增加而线性增长, 但随着泵浦功率的增加, MgO:PPLN 晶体内部会产生严重的热透镜效应, 造成光光转换效率的下降, 且曲率半径越大, 受热透镜效应影响越严重。因为 MgO:PPLN 晶体的热透镜效应越强, 热透镜焦距越短, 泵浦光发散的越严重, 造成泵浦功率密度下降, 从而引起光光效率的下降, 当泵浦光经过输出镜 M4 凹面反射后, 会对泵浦光斑起到聚焦的作用, 曲率半径越小, 聚焦后的泵浦光斑尺寸越小, 功率密度越大, 中波红外激光的光光效率较高, 反之, M4 曲率半径越大, 聚焦后的泵浦光斑尺寸较大, 无法补偿热透镜效应, 造成中波红外激光光光效率的降低。可见, 当 M4 曲率半径为 500 mm 时, 在泵浦功率高

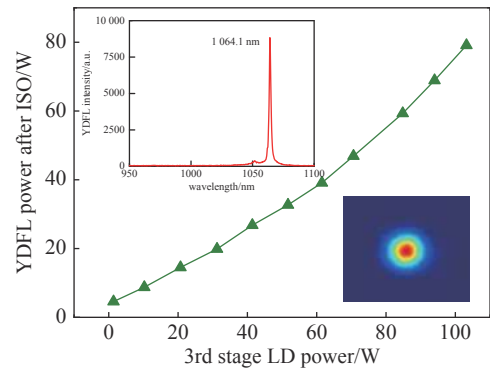


Fig. 2 YDFL power after ISO versus third stage LD power with insets show spectrum and beam profile

图 2 经过 ISO 后 YDFL 功率随第 3 级 LD 功率变化曲线及其光谱和光斑

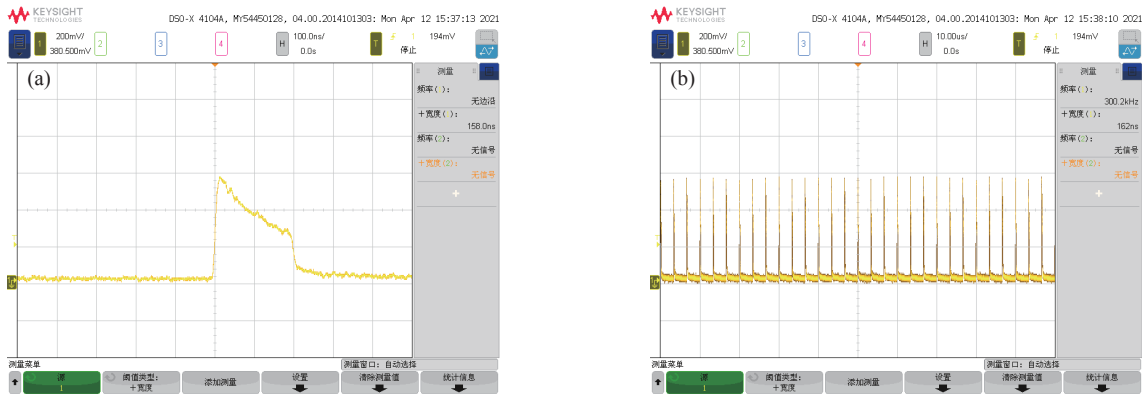


Fig. 3 Waveforms of YDFL with maximum output power

图 3 最高输出功率下 YDFL 波形

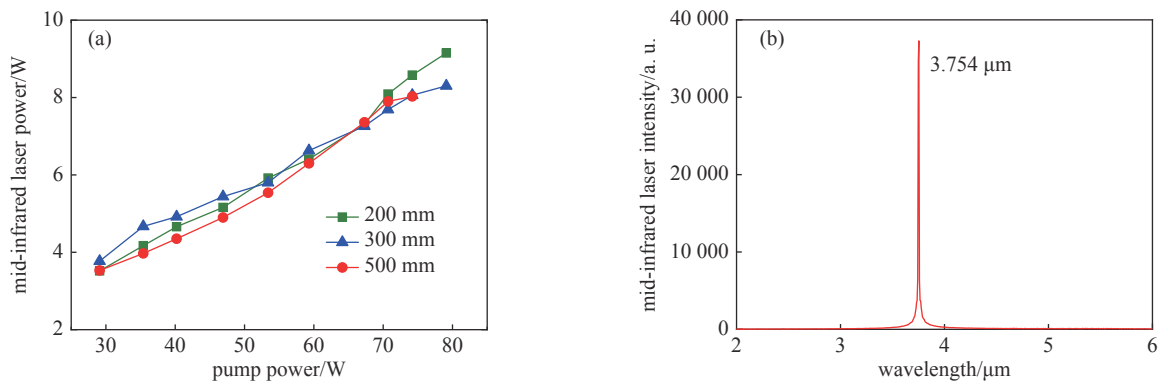


Fig. 4 (a) Mid-infrared laser power as functions of pump power for different curvature radii of M4 and (b) mid-infrared laser spectrum with power of 9.15 W

图 4 (a) 不同 M4 曲率半径下中波红外激光功率随泵浦功率的变化关系及 (b) 功率 9.15 W 时中波红外激光光谱

于 74 W 时中波红外激光输出不再稳定, 最大功率仅为 8.03 W。对于曲率半径 200 mm 和 300 mm 的情况, 在最高泵浦功率下可实现稳定中波红外激光输出, 最大功率分别为 9.15 W 和 8.30 W, 相应的光光转换效率分别为 11.57% 和 10.49%。实验结果表明, M4 曲率半径为 200 mm 时, MgO: PPLN-OPO 的中波红外激光输出功率最高, 如图 4(b) 所示, 此时中波红外激光的峰值波长为 3.754 μm 。

接下来对不同泵浦光束腰直径下 MgO: PPLN-OPO 的中波红外激光功率进行了测试。如图 5 所示为泵浦光束腰直径为 320、390 和 480 μm 情况下中波红外激光功率随泵浦光功率变化曲线, 此时泵浦光束腰均位于 MgO: PPLN 晶体中心位置, M4 曲率半径为 200 mm。可见, 当泵浦功率较低时, 中波红外激光功率均随泵浦功率的增加而线性增长, 但随着泵浦功率的增加, 当泵浦光束腰直径为 390 μm 和 480 μm 时, 在泵浦功率为 70 W 时中波红外激光的功率出现了下降, 最大功率分别为 8.08 W 和 8.06 W, 低于束腰直径 320 μm 情况下 MgO: PPLN-OPO 的最高输出功率。可见, 实验结果表明泵浦光束腰直径为 320 μm 时, MgO: PPLN-OPO 的输出功率最佳, 此时中波红外激光的光斑如图 5 所示, 其水平方向和垂直方向的 M^2 因子分别为 3.2 和 2.4。

如图 6 所示为 M4 曲率半径 200 mm、泵浦光束腰半径 320 μm 情况下, 中波红外激光功率为最高 9.15 W 时的脉冲波形。可见, 中波红外激光的脉冲波形与泵浦光相似, 激光脉冲前沿的强度要高于后沿, 脉冲宽度较泵浦光更小, 约为 110 ns, 中波红外激光重复频率与泵浦光一致, 均为 300 kHz。

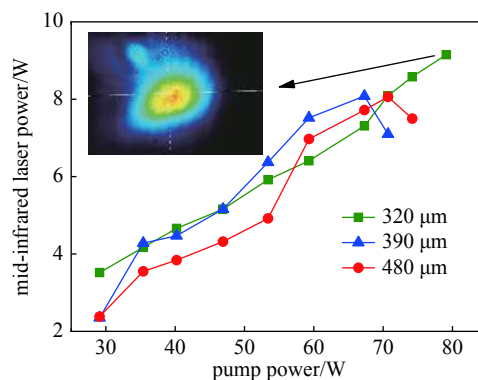


Fig. 5 Mid-infrared laser power as functions of pump power for different pump waist diameters

图 5 不同泵浦光束腰直径下中波红外激光功率随泵浦功率的变化关系

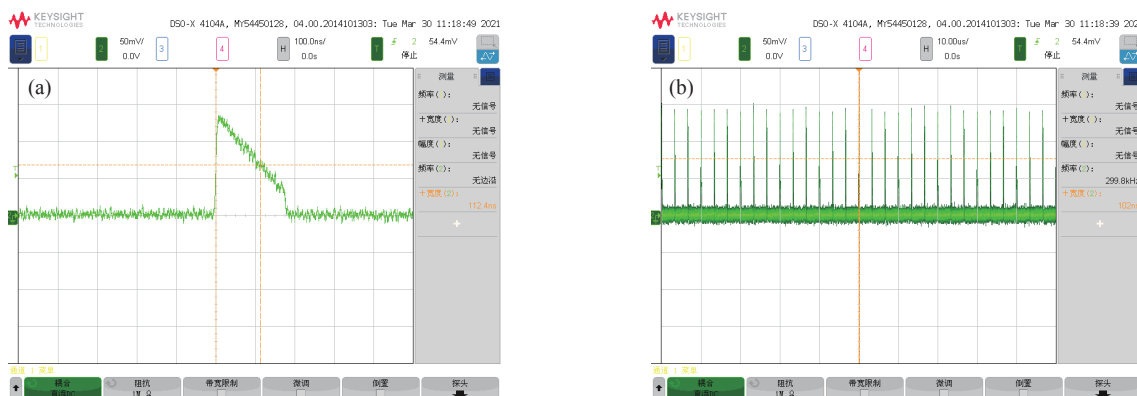


Fig. 6 Waveforms of mid-infrared laser with maximum output power

图 6 最高输出功率下中波红外激光波形

3 结论

本文中, 我们首先介绍了基于线偏振 YDFL 泵浦的高功率中波红外 MgO: PPLN-OPO 的结构和工作原理, 其次对线偏振 YDFL 的输出性能进行了测试, 最后分析了输出镜 M4 曲率半径和泵浦光束腰直径对 MgO: PPLN-OPO 中波红外激光功率的影响。实验结果表明: 在 M4 曲率半径为 200 mm, 泵浦光束腰半径为 320 μm , 泵浦光功率为 79.1 W 情况下, MgO: PPLN-OPO 可实现最高 9.15 W 的 3.754 μm 激光输出, 该光纤激光泵浦 MgO: PPLN-OPO 的中波红外激光功率较之前的实验结果得到了显著提升, 相应的光光转换效率达到 11.57%, 重复频率为 300 kHz, 脉冲宽度约为 110 ns。本文的研究结果表明 YDFL 泵浦 MgO: PPLN-OPO 可实现高功率中波红外激光输出, 上述实验方案将为研制适于工程应用的光纤激光泵浦高功率中波红外 MgO: PPLN-OPO 提供可行的技术途径。

参考文献:

- [1] 申成, 刘磊, 王红岩, 等. 1653 nm 光参量放大器及在甲烷遥测方面的应用[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 071004. (Shen Cheng, Liu Lei, Wang Hongyan, et al. 1653 nm optical parametric amplifier and its application in remote sensing of CH₄[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 071004)
- [2] Vlk M, Datta A, Alberti S, et al. Extraordinary evanescent field confinement waveguide sensor for mid-infrared trace gas spectroscopy[J]. Light: Science &

- Applications, 2021, 10(26): 1-7.
- [3] 杨爱粉, 张佳, 李刚, 等. 用于定向红外对抗的中波红外激光器技术[J]. *应用光学*, 2015, 36(1): 119-125. (Yang Aifen, Zhang Jia, Li Gang, et al. Technology of MWIR laser in directed infrared countermeasure systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 119-125)
- [4] 李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展[J]. *中国光学*, 2016, 9(6): 615-624. (Li Chong, Xie Jijiang, Pan Qiqun, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624)
- [5] Lin Dejiao, Alam S, Shen Yonghang, et al. Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15008-15014.
- [6] Liu L, Li X, Xiao H, et al. 12 W mid-infrared output, singly resonant, continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a Yb^{3+} -doped fiber amplifier[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 115-119.
- [7] 沈兆国, 董涛, 羊毅, 等. 光纤激光器泵浦光参量振荡器[J]. *激光与红外*, 2014, 44(5): 502-505. (Shen Zhaoguo, Dong Tao, Yang Yi, et al. Study on fiber laser pumped optical parametric oscillator[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 502-505)
- [8] Shukla M K, Das R. High-power single-frequency source in the mid-infrared using a singly resonant optical parametric oscillator pumped by Yb-fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 5100206.
- [9] He Yang, Chen Fei, Yu Deyang, et al. Improved conversion efficiency and beam quality of miniaturized mid-infrared idler-resonant MgO: PPLN optical parametric oscillator pumped by all-fiber laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 12-18.
- [10] Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Wang Weimin, et al. High-power 3.8 μm tunable optical parametric oscillator based on PPMgO: CLN[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(20): 4032-4035.
- [11] Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Luo Xingwang, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 46-51.