

## 小型化高光束质量 MgO:PPLN 中红外光参量振荡器

白翔<sup>1</sup>, 何洋<sup>2\*</sup>, 于德洋<sup>2</sup>, 张阔<sup>2</sup>, 陈飞<sup>2</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为满足中红外激光的工程应用需求, 研制了基于 MgO:PPLN 晶体的小型化高光束质量中红外光参量振荡器 (MgO:PPLN-OPO)。泵浦源采用声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器, 通过泵浦 MgO:PPLN 晶体, 获得了高效率、高峰值功率中红外激光输出, 在 MgO:PPLN-OPO 谐振腔中加入光阑, 有效提高了中红外激光光束质量, 整个激光器采用热电制冷与风冷相结合的散热方式, 实现了激光器的小型化。实验结果表明: 采用无水冷的声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器能够实现最高 9.3 W 的 1.064 μm 脉冲激光输出, 光光转换效率为 27.2%, 峰值功率可达~27.5 kW; 在 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦下, MgO:PPLN-OPO 实现了 3.765 μm 脉冲激光输出, 在谐振腔中加入光阑后, MgO:PPLN-OPO 的最高输出功率由 1.20 W 略降至 1.08 W, 但光束质量有明显提高,  $M_x^2$  和  $M_y^2$  因子分别从 1.89 和 1.98 优化至 1.20 和 1.29, 中红外激光脉冲宽度为 8.4 ns, 峰值功率达到~4.3 kW。

**关键词:** 光参量振荡器; MgO:PPLN 晶体; 中红外激光; 光束质量; 小型化

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190512

## Miniaturized mid-infrared MgO:PPLN optical parametric oscillator with high beam quality

Bai Xiang<sup>1</sup>, He Yang<sup>2\*</sup>, Yu Deyang<sup>2</sup>, Zhang Kuo<sup>2</sup>, Chen Fei<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to meet the engineering application of mid-infrared laser, a miniaturized mid-infrared MgO:PPLN optical parametric oscillator (MgO:PPLN-OPO) with high beam quality was presented. The pump source was an acousto-optical Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser. By pumping the MgO:PPLN crystal, the mid-infrared laser with high efficiency and high peak power was obtained. And the mid-infrared beam quality was improved by adding an aperture in the cavity. The whole laser was cooled by thermoelectric cooling and air cooling. Therefore, the size of the laser was miniaturized. Experimental results indicate that the acousto-optical Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser can realize the pulse laser with the highest power of 9.3 W at 1.064 μm. The corresponding optical to optical conversion efficiency is 27.2% and the peak power is ~27.5 kW. With the Nd:YVO<sub>4</sub> laser pump, the MgO:PPLN-OPO can output the pulse laser at 3.765 μm. When adding the aperture in the cavity, the maximum output power of the MgO:PPLN-OPO decreases from 1.20 W to 1.08 W. However, the beam quality improves obviously. The  $M_x^2$  and  $M_y^2$  factors change from 1.89 and 1.98 to 1.20 and 1.29, respectively. The pulse width and

收稿日期:2020-04-02; 修订日期:2020-05-16

基金项目:国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2018YFE0203203);国家自然科学基金面上项目(61975203);中国科学院青年创新促进会(2017259);激光与物质相互作用国家重点实验室开放基础研究课题(SKLLIM1815)

作者简介:白翔(1978-),男,助理研究员,主要从事固体激光器和航天器跟踪测量设备方面的研究。Email: bxiang@sina.com

the peak power of mid-infrared laser are 8.4 ns and ~4.3 kW, respectively.

**Key words:** OPO; MgO:PPLN crystal; mid-infrared laser; beam quality; miniaturized

## 0 引言

中红外激光在大气中传输时衰减很小,处于大气红外窗口,而且该波段还位于许多分子的“指纹”区,对应多数分子的特征吸收谱,因此,中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<sup>[1-4]</sup>。其中,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) 可实现中红外激光输出,该 OPO 具有功率高、效率高、光束质量好和波长可调谐等优点,是实现连续和脉冲中红外激光输出的有效途径<sup>[5-7]</sup>。通常,基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO(MgO:PPLN-OPO) 采用光纤激光器或固体激光器作为泵浦源。

掺 Yb 光纤激光器具备功率高、效率高和散热性能好等优点,可作为 MgO:PPLN-OPO 的泵浦源。其中,为了提高泵浦光的峰值功率,进而提高 OPO 的光光转换效率,需采用脉冲掺 Yb 光纤激光器作为泵浦源。主振荡功率放大 (MOPA) 结构的掺 Yb 光纤激光器是获得高功率 1 μm 波段激光输出的主要技术途径,即通过一级或多级掺 Yb 光纤放大器对窄脉宽种子光进行功率放大, MOPA 光纤激光器作为泵浦源得到了大量实验验证<sup>[6, 8-11]</sup>。但在工程应用中, MOPA 光纤激光器在出光时,若种子源或预放大级出现故障,很容易造成下一级放大器的损坏;而较高的峰值功率易引发光纤内的受激布里渊散射等非线性效应;同时,后向反射光易对光纤激光器造成损伤;此外,为实现线偏振光纤激光输出,需全部采用保偏光纤器件,成本较高。上述因素不利于 MOPA 光纤激光器在 MgO:PPLN-OPO 中的工程应用。

固体激光器也可用于泵浦 MgO:PPLN-OPO,其中,基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的固体激光器易于实现高功率脉冲激光输出,且相比于 MOPA 光纤激光器, Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器结构简单,可直接输出线偏振激光,对后向反射光不敏感,且成本较低,在 MgO:PPLN-OPO 中得到了应用<sup>[12-14]</sup>。但 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器通常需要水冷散热,水冷机不仅增加了 MgO:PPLN-OPO 的体积和重量,而且需要定期维护,不利于 MgO:PPLN-OPO 的工程应用,同时,在高峰值功率泵浦情况下,

MgO:PPLN-OPO 中的高阶模会产生振荡,降低中红外激光光束质量。因此,文中介绍了一种无水冷却 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦的高光束质量 MgO:PPLN-OPO,采用声光调 Q 方法使 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出高峰值功率脉冲泵浦激光,进而获得高效率、高峰值功率中红外激光输出。在 MgO:PPLN-OPO 谐振腔中加入光阑,以提高中红外激光光束质量。整个激光器采用热电制冷和风冷相结合的散热方式,极大地缩减了激光器的体积和重量,为 MgO:PPLN-OPO 的工程应用提供了可行的技术方案。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示, OPO 的泵浦源为声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,采用 0.879 μm LD 端面泵浦, LD 泵浦光经光纤耦合输出,由耦合镜组 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 准直聚焦后进入 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体端面。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm,固定于冷却热沉中,通过调整 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体摆放位置,可实现竖直线偏振 1.064 μm 激光输出,从而满足 MgO:PPLN 晶体的相位匹配条件。激光谐振腔由平面二色镜 M<sub>3</sub> 和平面输出耦合镜 M<sub>4</sub> 组成, M<sub>3</sub> 镀 0.879 μm 高透、1.064 μm 高反膜, M<sub>4</sub> 在 1.064 μm 处的反射率为 70%。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 M<sub>2</sub> 之间为声光调制器 (AOM), AOM 由射频信号驱动,使用方波调制信号控制 AOM 状态:在方波信号处于低电平状态时,驱动器输出射频信号,声光晶体中产生超声波使光束发生衍射,谐振腔处于高损耗低 Q 值状态;当方波信号变为高电平状态时,驱动器停止输出射频信号,谐振腔处于低损耗高 Q 值状

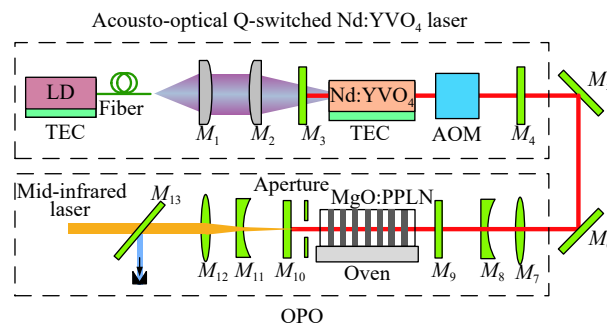


图 1 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦 OPO 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of OPO pumped by Nd:YVO<sub>4</sub> laser

态,形成激光振荡,引发激光脉冲输出。

Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出的竖直线偏振 1.064 μm 激光经过 45°反射镜 M<sub>5</sub> 和 M<sub>6</sub> 反射后入射 OPO。OPO 主要包括缩束镜组、谐振腔镜、MgO:PPLN 晶体、加热炉、扩束镜组和分束镜等。泵浦光首先经过缩束镜组 M<sub>7</sub> 和 M<sub>8</sub> 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。MgO:PPLN 晶体(HCP 公司)尺寸为 50 mm×3 mm×2 mm, MgO 掺杂浓度为 5 mol%, 极化周期为 29.5 μm, 晶体端面镀 1.064 μm、1.480 μm 和 3.800 μm 增透膜。MgO:PPLN 晶体固定在加热炉中,工作温度设定在 65 °C,温控精度为±0.1 °C,对应的信号光和闲频光波长分别为 1.480 μm 和 3.800 μm。谐振腔由平镜 M<sub>7</sub> 和 M<sub>8</sub> 组成,采用信号光单谐振方案, M<sub>7</sub> 镀 1.064 μm 高透、1.480 μm 或 3.800 μm 高反膜, M<sub>8</sub> 镀 1.064 μm 高反、3.800 μm 高透和 1.480 μm 部分反射膜(反射率 70%),谐振腔腔长为 100 mm, MgO:PPLN 晶体放置在谐振腔的中心位置,在 MgO:PPLN 晶体和 M<sub>8</sub> 之间放置孔径 1 mm

光阑,以抑制高阶模的振荡,从而优化输出激光的光束质量。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红外波段的闲频光输出,由于中红外激光发散角较大,需通过扩束镜组 M<sub>11</sub> 和 M<sub>12</sub> 进行扩束以压缩发散角,再利用分光镜 M<sub>13</sub> 将信号光滤除,最终获得中红外激光输出。

在热控方面,该中红外 OPO 采用半导体热电制冷器(TEC)和风冷相结合的散热方式,其主要热源器件包括 LD、Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 AOM。如图 2 所示,对于 LD 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,其温度需稳定在 20 °C,因此通过 TEC 对 LD 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体温度进行精确控制,温控精度可达±0.1 °C,TEC 将热量导入铝合金底板和散热翅片,通过风冷对底板和散热翅片进行散热。AOM 则采用热传导的方式,将热量导入铝合金底板和散热翅片,并通过风冷散热。对于 MgO:PPLN 晶体,为防止加热炉热量导入铝合金底板,采用聚四氟乙烯对其进行隔热。

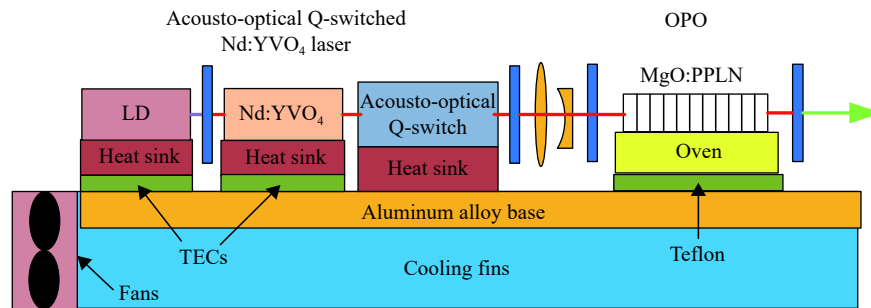


图 2 OPO 热控结构示意图

Fig.2 Schematic of thermal control system for OPO

## 2 实验结果与分析

### 2.1 声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

首先对声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性进行了实验研究。采用方波信号对 AOM 进行调制,方波信号重复频率为 30 kHz,幅值为 5 V,占空比为 1%,Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出 1.064 μm 脉冲激光,采用格兰棱镜将输出激光分为竖直偏振和水平偏振的线偏振激光,采用激光功率计(Ophir 公司 FL150A-BB-26 型)分别对激光功率进行测试,结果如图 3 所示。可见,激光功率随泵浦功率呈线性增长,且竖直激光偏振分量远远大于水平偏振分量,在 LD 最大功率为 34.2 W 情况下,竖直偏振和水平偏振激光最高分别

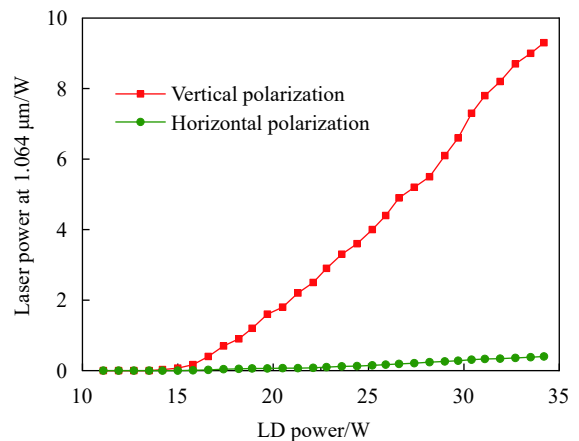


图 3 1.064 μm 竖直偏振和水平偏振激光输出功率随 LD 功率变化曲线  
Fig.3 Output power of the vertically and horizontally polarized laser at 1.064 μm as a function of LD power

为 9.3 W 和 0.4 W, 偏振消光比>13 dB, 不考虑水平偏振分量, Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的光光转换效率为 27.2%。

如图 4 所示为 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器在最高输出功率情况下, 使用光电探测器 (滨松公司 C5658 型) 和示波器 (Agilent 公司 DSO-X 3024A 型) 测得的 1.064 μm 激光脉冲波形图。由图 4 可知, 激光重复频率与方波信号一致, 均为 30 kHz, 激光脉冲宽度为 11.3 ns, 因此在最高输出功率情况下, 1.064 μm 激光的峰值功率可达~27.5 kW。采用刀口法对 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的光束质量进行了测量, 在激光输出功率为 9.3 W 时, 水平方向  $M_x^2$  因子与垂直方向  $M_y^2$  因子分别为 1.41 和 1.52。

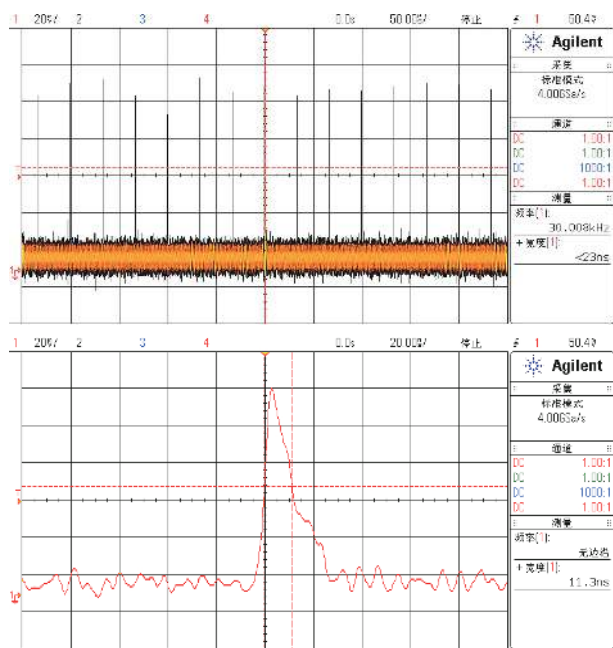


图 4 1.064 μm 激光脉冲波形图

Fig.4 Waveforms of the pulse laser at 1.064 μm

## 2.2 光参量振荡器

采用上述声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO。为了获得高光束质量中红外激光输出, 在 OPO 谐振腔中加入了光阑。如图 5 所示为无光阑和有光阑情况下中红外激光光谱和功率随 1.064 μm 泵浦光功率变化曲线。可见, 当泵浦功率低于 4 W 时, 有光阑和无光阑情况下的阈值泵浦功率均为~1.6 W, 且中红外激光功率相差较小, 因为在泵浦功率较低时, 谐振腔中的高阶模成分较少, 光阑对光参量振荡过程影响较小。但随着泵浦功率的增加, 谐振腔中的高阶模开始振荡, 加入光阑可对高阶模的振荡进行抑

制, 并提高低阶模的转换效率, 但是中红外激光功率会出现一定程度的下降。采用中红外傅里叶光谱仪 (Arcoptix 公司 FIT-MIR 2-6 型, 波长分辨率~0.006 μm) 对中红外激光光谱进行测量, 在最高泵浦功率为 9.3 W 时, 激光峰值波长为 3.765 μm, 无光阑和有光阑情况下, 中红外激光功率分别为 1.20 W 和 1.08 W, 相应的光光转换效率分别为 12.9% 和 11.6%。

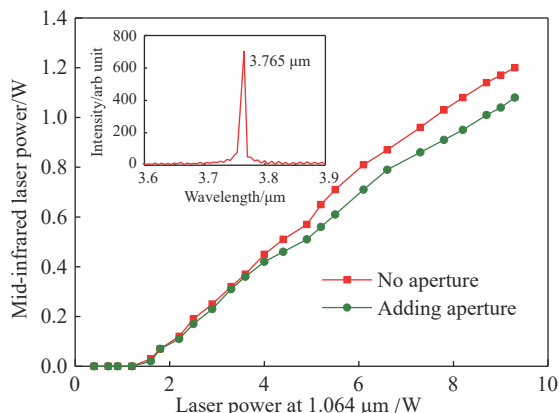


图 5 中红外激光功率随泵浦功率变化曲线和中红外激光光谱

Fig.5 Mid-infrared output power as a function of pump power and mid-infrared spectrum

虽然加入光阑后中红外激光的光光转换效率出现少量下降, 但中红外激光的光束质量可获得较大提高。如图 6 所示为中红外激光功率达到最大值时, 采用刀口法对中红外激光  $M^2$  因子进行测试的结果。可见, 在无光阑情况下, 水平方向  $M_x^2$  因子与垂直方向  $M_y^2$  因子分别为 1.89 和 1.98, 而在加入光阑后, 中红外激光的  $M_x^2$  因子和  $M_y^2$  因子分别为 1.20 和 1.29, 这说明光阑有效地抑制了高阶模产生, 能够提高中红外激光的光束质量, 加入光阑后的中红外激光光斑轮廓图如图 6(b) 所示。

采用 HgCdTe 光电探测器 (Vigo 公司 PV-2TE-4 型) 和示波器 (Keysight 公司 DSO-X 4104A 型) 对中红外激光脉冲波形进行测试, 如图 7 所示为加入光阑情况下, 中红外激光功率为 1.08 W 时的脉冲波形图。可见, 当重复频率为 30 kHz 时, 中红外激光的脉冲宽度可达 8.4 ns, 相应的中红外脉冲激光的峰值功率可达~4.3 kW。上述结果表明, 通过在谐振腔中加入光阑, 在提高 MgO:PPLN-OPO 光束质量的同时, 还可实现高效率、高功率中红外激光输出。

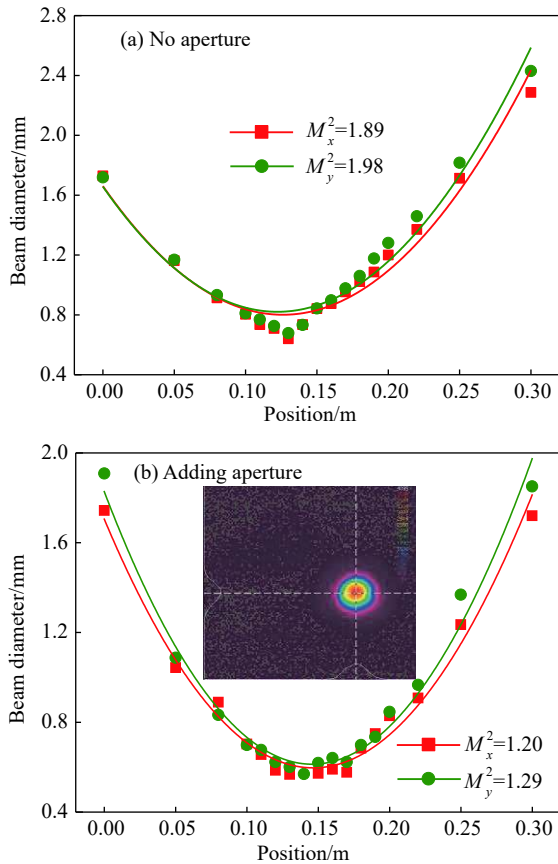


图 6 (a) 无光阑和 (b) 有光阑情况下中红外激光  $M^2$  因子测试及光斑轮廓

Fig.6 Mid-infrared  $M^2$  factors and beam profile for (a) no aperture and (b) adding aperture

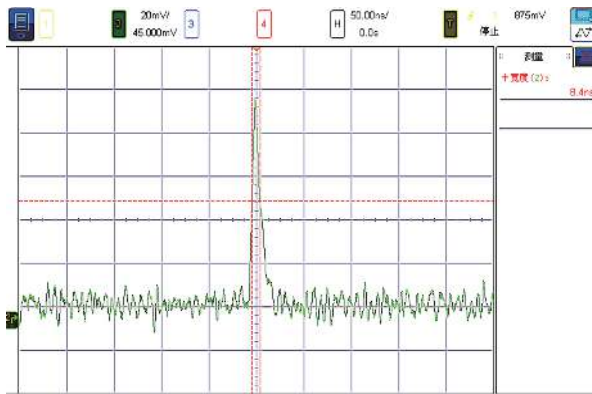


图 7 中红外激光脉冲波形图

Fig.7 Waveforms of the pulse mid-infrared laser

### 3 结论

文中介绍了声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO 的结构和工作原理, 该中红外激光器采用热电制冷和风冷相结合的散热方式, 并通过在 OPO

谐振腔中加入光阑对中红外激光的光束质量进行了优化。实验结果表明: 采用无水冷的声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器能够实现最高 9.3 W 的脉冲激光输出, 光光转换效率为 27.2%, 峰值功率可达~27.5 kW; 在 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦下, 在无光阑情况下, MgO:PPLN-OPO 可实现最高 1.20 W 的 3.765 μm 激光输出,  $M_x^2$  和  $M_y^2$  因子分别为 1.89 和 1.98, 在谐振腔中加入光阑后, MgO:PPLN-OPO 的最高输出功率略降至 1.08 W, 但光束质量有明显提高,  $M_x^2$  和  $M_y^2$  因子分别为 1.20 和 1.29, 同时, 激光峰值功率可达~4.3 kW。上述结果证明了热电制冷和风冷能够对 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器进行有效地热控, 通过在 MgO:PPLN-OPO 谐振腔中加入光阑不仅能够提高中红外激光光束质量, 还可实现高效率、高峰值功率中红外激光输出。此外, 声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器和 MgO:PPLN-OPO 的输出功率均随泵浦功率的增加呈线性增长, 因此若进一步提高泵浦功率, 有望实现数瓦级的高功率中红外激光输出。上述实验方案为研制工程化中红外 MgO:PPLN-OPO 提供了可行的技术途径。

### 参考文献:

- [1] Basum G V, Halmer D, Hering P, et al. Parts per trillion sensitivity for ethane in air with an optical parametric oscillator cavity leak-out spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(8): 797-799.
- [2] Zhang Y, Wang F, Zhao Y, et al. Experiment research on ellipsoidal structure methane using the absorption characteristics of 3.31 μm mid-infrared spectroscopy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(4): 353-356.
- [3] Yang Aifen, Zhang Jia, Li Gang, et al. Technology of MWIR laser in directed infrared countermeasure systems [J]. *Applied Optics*, 2015, 36(1): 119-125.
- [4] Li Chong, Xie Jijiang, Pan Qiqun, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624.
- [5] Kumar S C, Das R, Samanta G K, et al. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 31-35.
- [6] Shen Zhaoguo, Dong Tao, Yang Yi, et al. Study on fiber laser pumped optical parametric oscillator [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 502-505.

- [7] Tillman K A, Reid D T, Artigas D, et al. Idler-resonant femtosecond tandem optical parametric oscillator tuning from 2.1  $\mu\text{m}$  to 4.2  $\mu\text{m}$  [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(8): 1551–1558.
- [8] Lin D, Alam S, Shen Y H, et al. Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8  $\mu\text{m}$  pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15008–15014.
- [9] Shang Y, Shen M, Wang P, et al. Amplified random fiber laser-pumped mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(12): 121901.
- [10] He Y, Chen F, Yu D Y, 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.
- [11] Yu Guangqi, Wang Peng, Song Wei, et al. Fiber laser pumped multi-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404003. (in Chinese)
- [12] Wu B, Kong J, Shen Y H. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1118–1120.
- [13] Zhang Y, Duan Y, Wang Z, et al. Continuous-wave widely tunable MgO: PPLN optical parametric oscillator with compact linear cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(20): 1756–1759.
- [14] Zhang Yongchang, Zhu Haiyong, Zhang Jing, et al. Compact widely tunable continuous-wave MgO: PPLN optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105008. (in Chinese)