

## 基于光参量振荡的 35 kHz 中红外激光器研究

蒋星晨<sup>1,2</sup>, 程德华<sup>1,2</sup>, 李业秋<sup>1,2</sup>, 崔建丰<sup>1,2</sup>, 岱 钦<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 辽宁省高性能激光器及应用专业技术创新中心, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 研究了基于高重频 1064 nm 激光泵浦的 3.8  $\mu\text{m}$  周期性极化铌酸锂 (periodically poled LiNbO<sub>3</sub>, PPLN) 光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO)。采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器, 获得了光束质量良好, 重复频率 25~35 kHz, 最大平均输出功率 6.1 W, 脉冲宽度 59.1 ns 的 1064 nm 基频激光。模拟分析了在 1064 nm 激光泵浦下, 极化周期  $A=29.5 \mu\text{m}$  MgO:PPLN 晶体的温度调谐特性。通过实验, 在 25~200  $^{\circ}\text{C}$  的温度范围内, 获得了 3599.6~3845.5 nm 连续变化的中红外激光。当 PPLN 晶体温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ , 基频光功率为 6.1 W 时, 得到了最大输出功率 0.45 W, 重复频率为 35 kHz 的 3845.5 nm 中红外光输出。

**关键词:** 高重频; 中红外; 周期性极化铌酸锂; 光参量振荡器

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210817

## Research on mid-infrared laser at 35 kHz based on optical parametric oscillator

Jiang Xingchen<sup>1,2</sup>, Cheng Dehua<sup>1,2</sup>, Li Yejiu<sup>1,2</sup>, Cui Jianfeng<sup>1,2</sup>, Dai Qin<sup>1,2</sup>

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Technology Innovation Center of High Performance Laser and Application, Liaoning Province, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** A 3.8  $\mu\text{m}$  periodically poled LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator based on high repetition frequency pumping is studied. The Nd:YVO<sub>4</sub> acousto-optic Q-switched laser is used, obtaining a fundamental 1064 nm laser with good beam quality, the repetition frequency at 25-35 kHz, the maximum average power of 6.1 W and the pulse width of 59.1 ns. The temperature tuning characteristic of MgO:PPLN crystal with the period  $A=29.5 \mu\text{m}$  under the 1064 nm laser pumping is simulated. Through experiments, the 3599.6-3845.5 nm mid-infrared laser is obtained at a temperature of 25-200  $^{\circ}\text{C}$ . When the temperature of the PPLN crystal is 30  $^{\circ}\text{C}$  and the pump power is 6.1 W, the mid-infrared laser is obtained with the maximum output power of 0.45 W and the repetition frequency of 35 kHz at 3845.5 nm.

**Key words:** high repetition frequency; mid-infrared; periodically poled LiNbO<sub>3</sub>; optical parametric oscillator

收稿日期:2021-11-03; 修订日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金 (61705145); 辽宁省高等学校创新人才支持计划 (LR2016079); 辽宁省自然科学基金 (20180550330); 沈阳理工大学科研创新团队建设项目 (SYLUTD2020); 沈阳理工大学高水平成果建设计划

作者简介:蒋星晨,男,硕士生,主要从事固体激光技术方面的研究。

导师简介:岱钦,男,教授,博士,主要从事固体激光技术方面的研究。

## 0 引言

3~5 μm 中红外激光位于大气透射窗口, 该波段的激光在大气中衰减较小, 能够实现远距离传输。同时该波段覆盖了许多重要原子、分子的振动谱线。因此中红外光在激光雷达、遥感探测、光通信、光谱分析等方面<sup>[1-3]</sup>具有重要的应用价值。中红外发光源的研究在国内外都受到了极大的重视。

目前, 产生中红外的方法主要有量子级联激光器、掺稀土固体激光器、光参量振荡器等<sup>[4-7]</sup>。其中光参量振荡器相比于其他技术, 有结构紧凑、输出波长可调谐、输出效率较高等优点, 具有重要的研究价值。随着周期性极化晶体和准相位匹配技术的发展, 中红外光参量振荡器有了进一步的提升。彭跃峰等人利用椭圆形光斑泵浦 PPLN, 在 8 kHz 的重复频率下, 获得了平均功率 11.2 W, 光-光转换斜效率 14.5% 的 3.84 μm 中红外输出<sup>[8]</sup>; Bo Wu 等人使用半外腔结构的 PPLN-OPO, 获得了 9.23 W 的 3.82 μm 中红外光, 实现了 29.4% 的斜效率<sup>[9]</sup>; S. Parsa 等人报道了一种掺 Yb 皮秒光纤激光器泵浦的 PPLN-OPO, 在 80 MHz 的重复频率下, 得到了 1 W 的 3 340 nm 中红外光<sup>[10]</sup>; Lei Guo 等人利用声光调 Q Tm:YAP 激光器泵浦 PPLN-OPO, 在重复频率 6 kHz、脉冲宽度 45 ns 的情

况下, 得到了最大输出功率 1.2 W 的 3.87 μm 激光, 对应的光-光转换效率为 19.4%<sup>[11]</sup>。

论文研究了高重频 PPLN-OPO 中红外激光光源。实验采用端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器产生的 35 kHz 1064 nm 激光作为基频光, 通过缩束系统压缩光斑直径, 设计了  $A=29.5 \mu\text{m}$  的单周期 PPLN 直腔光参量振荡器, 对 PPLN 进行温度调谐, 实现了 PPLN-OPO 的中红外波段的连续调谐输出。

## 1 实验装置

激光器实验光路如图 1 所示。端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器采用 L 型腔型结构, 由 M1、M2、M3 三个平平镜构成。其中 M1 镀有 45°808 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜; M2 透过率为 15%; M3 镀有 1064 nm 高反膜。Nd:YVO<sub>4</sub> 增益介质的掺杂浓度为 0.2%, 使用铝箔包裹放置在热沉中。Q 开关为声光调 Q 器 (Gooch & Housego), 调频范围为 0~50 kHz。808 nm 泵浦源、激光晶体、声光调 Q 器均采用循环水冷却, 温度设置为 22.5 °C。1064 nm 激光经过 45° 反射镜 M4、M5 后进入光隔离器, 避免反射对基频激光光路造成损坏。基频光通过缩束系统, 光斑直径约为 0.4 mm。

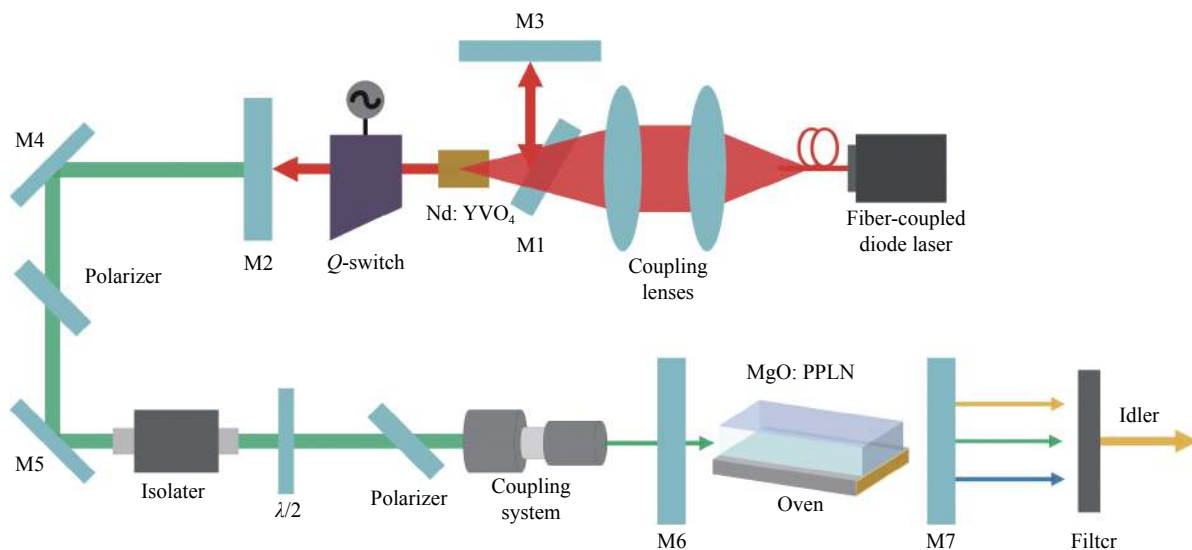


图 1 实验光路图

Fig.1 Optical path schematic of the experimental

OPO 采用直腔结构, 为提高光束质量, M6、M7 采用平平腔镜。M6 镀有 1.064 μm 高透膜, 1200~1 600 nm

高反膜; M7 镀有 1.064 μm 和 3 000~8 000 nm 高透膜, 1250~1 530 nm 高反膜。PPLN 晶体极化周期  $A=$

29.5 μm, 5 mol%MgO 掺杂, 晶体尺寸为 10 mm×1 mm×50 mm。相比于普通的 PPLN 晶体, MgO:PPLN 具有更高的抗损伤阈值。晶体两端均镀有基频光、信号光、闲频光波段的增透膜 (AR@1064 nm & 1.4~1.7 μm & 3.2~3.9 μm)。温度控制器的调谐范围为 25~200 °C, 精度为±0.1 °C。OPO 腔长为 60 mm。

## 2 实验结果与分析

基频光的光束质量、峰值功率是影响 OPO 性能的重要因素。在 35 kHz 重复频率下, 测得其最大平均输出功率为 6.1 W (COHERENT, PM10 V1), 利用光束质量分析仪 (NS-PYRO) 测量其输出光斑。基频激光输出功率曲线以及光斑轮廓如图 2 所示。

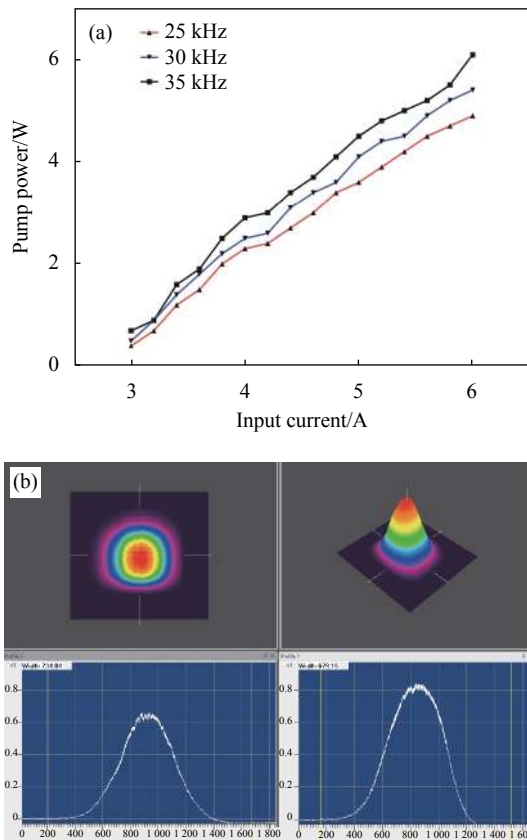


图 2 (a) 不同调 Q 频率下的 1064 nm 激光输出功率曲线; (b) 35 kHz, 6.1 W 时的光斑图

Fig.2 (a) 1064 nm laser output power curves at different Q-switched frequencies; (b) Beam profile at 35 kHz and 6.1 W

利用光电探测器 (DET10 A/M) 和示波器 (TDS 3034 B) 测量了基频光的脉冲波形, 如图 3 所示, 当重复频率为 35 kHz, 激光输出功率为 6.1 W 时, 基频激

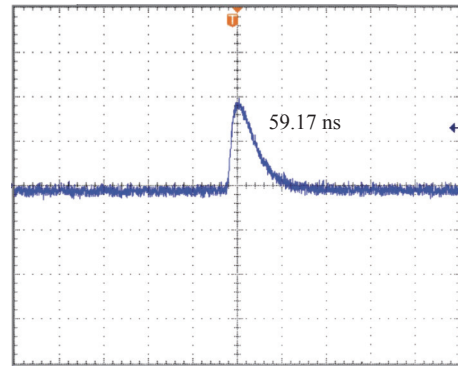


图 3 基频光脉冲宽度

Fig.3 The pulse width of fundamental laser

光脉冲宽度为 59.1 ns。

在 30~190 °C 连续温度变化下, 使用近红外光谱仪 (NIRQUEST) 测量 PPLN-OPO 的调谐波长, 图 4 为信号光波长光谱图, 根据  $1/\lambda_i = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$  可精确推算得到对应的闲频光波长。图 5 为测得的信号光波长以及计算所得的闲频光波长调谐曲线。

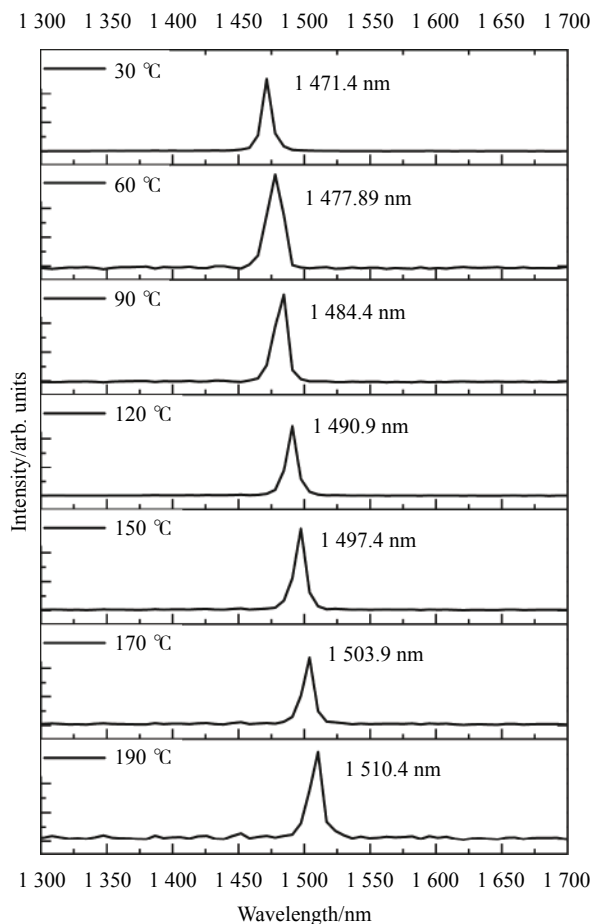


图 4 不同温度下的信号光光谱图

Fig.4 Signal spectrum at different temperatures

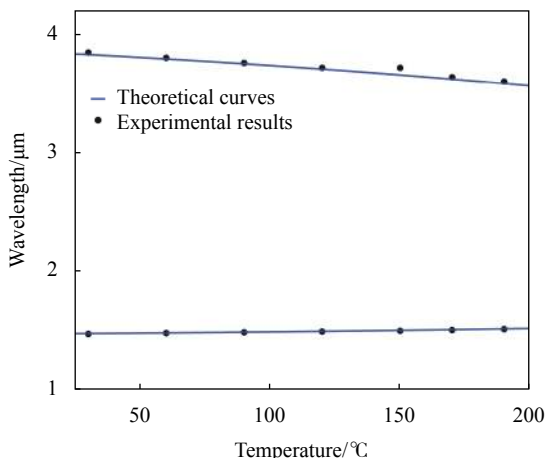


图 5 实验结果与理论曲线对比图

Fig.5 Comparison of experimental results and theory curves

对光参量振荡输出特性进行研究,分别测量了 30、90、120 °C 下闲频光输出功率,如图 6 所示。可以看出,随着温度的升高,输出中红外光波长变短,输出功率有了一定的提高。由于闲频光波长的缩短,晶体对闲频光的吸收系数减小,导致闲频光的损耗降低,同时光参量振荡过程中的量子亏损 ( $\eta=\lambda_p/\lambda_s$ ) 也降低,使得输出的中红外光能量得到了提升。

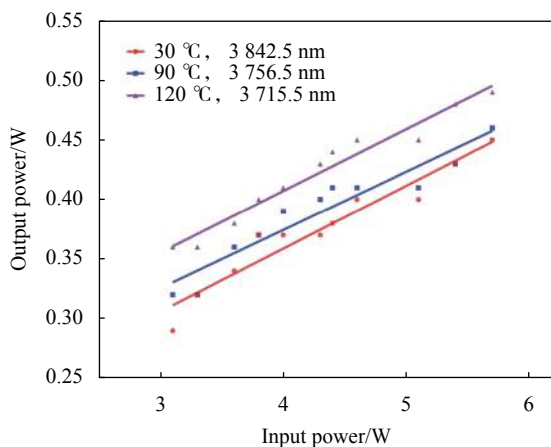


图 6 不同温度下闲频光输出功率曲线

Fig.6 Output power curve of idler at different temperatures

PPLN 晶体温度设定为 30 °C,重复频率为 35 kHz 时,闲频光的输出功率曲线以及光-光转换效率曲线如图 7 (a) 所示。在基频激光功率为 6.1 W 时,得到最大输出功率为 0.45 W 的 3.8 μm 中红外光,OPO 阈值为 2.06 W。转换效率随着基频光能量的增加呈现出先上升再下降的趋势,在输入功率为 3.2 W 时,得到 10% 的最大光-光转换效率。主要原因是 808 nm 泵浦

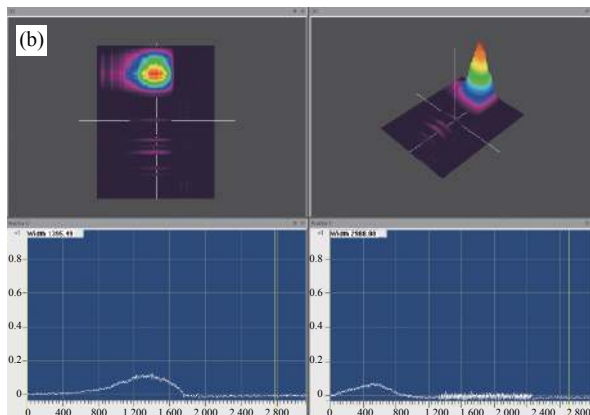
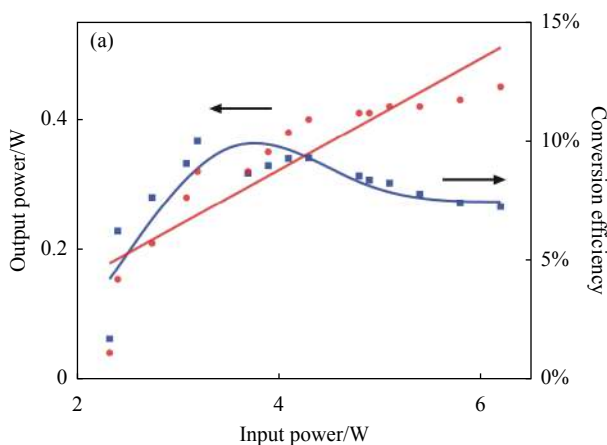


图 7 (a) 35 kHz 时的 3.8 μm 激光输出功率、转换效率曲线; (b) 闲频光光斑图

Fig.7 (a) 3.8 μm output power and conversion efficiency curves at 35 kHz; (b) Idler beam profile

源功率增加,激光晶体内部热效应加重,造成基频光光束质量降低,从而导致光-光转换效率下降。

受限于探测器的波长响应范围,实验测量了 OPO 输入功率为 6.1 W 时,产生的信号光脉宽如图 8 所示,信号光的脉宽为 10.7 ns。非线性晶体对于能量的

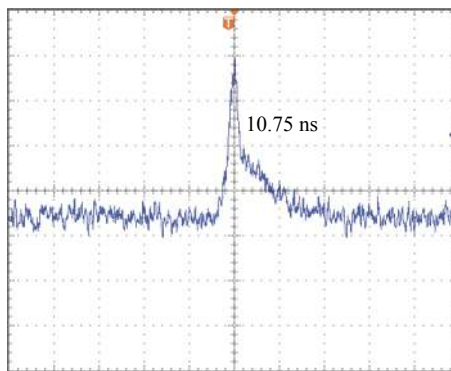


图 8 信号光脉冲宽度

Fig.8 The pulse width of signal

吸收损耗和振荡产生的衍射损耗提升了振荡阈值,使得输出的参量光脉宽比基频光的脉宽要窄。

### 3 结 论

设计研究了中红外波段 PPLN 光参量振荡器,通过端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器实现了高重频、高光束质量 1064 nm 基频激光。采用温度调谐 PPLN-OPO 的方式,获得了 3599.6~3842.5 nm 的高重频中红外波段激光调谐输出。当 PPLN 晶体温度控制在 30 °C,输入基频光功率为 6.1 W,重复频率为 35 kHz 条件下,实现了最大输出功率为 0.45 W 的 3842.5 nm 中红外激光的稳定输出,最大转换效率为 10%。

#### 参考文献:

- [1] Larson E, Hines M, Tanas M, et al. Mid-infrared absorption by soft tissue sarcoma and cell ablation utilizing a mid-infrared interband cascade laser [J]. *Journal Biomedical Optics*, 2021, 26(4): 043012.
- [2] Junaid S, Tomko J, Semsiv M P, et al. Mid-infrared upconversion based hyperspectral imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2203-2211.
- [3] Ma Q, Fan Y, Luo Z, et al. Quantitative analysis of collagen and capillaries of 3.8- $\mu\text{m}$  laser-induced cutaneous thermal injury and wound healing [J]. *Lasers Medical Science*, 2021, 36(7): 1469-1477.
- [4] Meng X, Wang Z, Tian W, et al. High average power 200 fs mid-infrared KTP optical parametric oscillator tunable from 2.61 to 3.84  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics B*, 2021, 127: 129.
- [5] Yun C, Zhang C, Miao X, et al. Ultra-broadband 4.1  $\mu\text{m}$  mid-infrared emission of Ho<sup>3+</sup> realized by the introduction of Tm<sup>3+</sup> and Ce<sup>3+</sup> [J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 239: 118368.
- [6] Jiao Z, Huang W, Liu B, et al. InAs triangular quantum wells grown on InP/SiO<sub>2</sub>/Si heterogeneous substrate for mid-infrared emission [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 136: 106163.
- [7] Zong Mengyu, Zhang Zhen, Liu Jingjing, et al. LD pumped high-power mid-infrared solid state lasers based on 1.3 at.% Er<sup>3+</sup>: CaF<sub>2</sub> crystal (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210336. (in Chinese)
- [8] Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang, et al. 3.8  $\mu\text{m}$  mid-infrared laser with 11.2 W output power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 82-85. (in Chinese)
- [9] Wu B, Kong J, Shen Y. 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.
- [10] Parsa S, Kumar S C, Nandy B, et al. Yb-fiber-pumped, high-beam-quality, idler-resonant mid-infrared picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25436-25444.
- [11] Guo L, Yang Y, Zhao S, et al. Room temperature watt-level 3.87 microm MgO: PPLN optical parametric oscillator under pumping with a Tm: YAP laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32916-32924.