

基于 MgO:PPLN 的高重频、高峰值功率中红外光参量振荡器

高宝光^{1,2}, 孟冬冬^{1,2*}, 乔占朵¹, 邱基斯¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

摘要: 报道了一种基于周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体 (MgO:PPLN) 的高峰值功率、纳秒宽调谐中红外光参量振荡器 (Optical parametric oscillation, OPO)。采用重复频率 30~50 kHz、脉冲宽度小于 4 ns 的高光束质量 1064 nm 基频光泵浦基于极化周期为 29 μm MgO:PPLN 的 OPO, 当 MgO:PPLN 温度为 80 $^{\circ}\text{C}$ 时获得 30 kHz、脉宽 1.19 ns、峰值功率 48.45 kW 的 3.93 μm 激光输出。在 MgO:PPLN 温度区间为 50~200 $^{\circ}\text{C}$ 时, 中红外调谐输出波长为 3.77~3.96 μm 。根据实验结果分析讨论了不同重复频率下转换效率的特点、温度调谐特性与理论分析的一致性。

关键词: 光参量振荡器; 周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体; 中红外激光器; 高峰值功率
中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220069

High repetition rate, high peak power mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN

Gao Baoguang^{1,2}, Meng Dongdong^{1,2*}, Qiao Zhanduo¹, Qiu Jisi¹

(1. The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A widely tunable mid-infrared optical parametric oscillator (OPO) with high peak power, nanosecond pulses output, which was based on MgO-doped periodically poled LiNbO₃ (MgO:PPLN) was reported in this paper. The MgO:PPLN OPO with a domain period of 29 μm was pumped by a fundamental laser of 1064 nm with high beam quality, and the fundamental laser operated at the repetition rates from 30 kHz to 50 kHz with the pulses duration less than 4 ns. The 48.45 kW peak power, 1.19 ns, and 30 kHz pulses at 3.93 μm were obtained, as the temperature of MgO:PPLN was at 80 $^{\circ}\text{C}$. The tunable range of mid-infrared wavelength was from 3.77 μm to 3.96 μm , as the temperature of MgO:PPLN was from 50 $^{\circ}\text{C}$ to 200 $^{\circ}\text{C}$. According to the experimental results, the characteristics of conversion efficiency and temperature tuning characteristics under different repetition rates were analyzed and discussed.

Key words: optical parametric oscillation; periodically polarized lithium niobate doped with magnesia; mid-infrared laser; high peak power

收稿日期:2022-01-20; 修订日期:2022-02-18

基金项目:天津市重点研发计划 (19YFZCGX00210)

作者简介:高宝光,男,硕士生,主要从事固体激光器设计、调试方面的研究。

导师简介:邱基斯,男,研究员,博士,从事全固态激光技术、复杂激光放大技术方面的研究。

通讯作者:孟冬冬,男,高级工程师,博士,主要从事光电技术、激光技术方面的研究。

0 引言

3~5 μm 波段位于大气窗口,且涵盖了许多原子、分子的吸收峰,使得该波段的中红外激光在红外遥感、环境监测、医疗诊断和自由空间光通信^[1-5]等方面都有重要的应用价值。目前,中红外激光光源的主要实现方式包括光纤激光器、量子级联激光器^[6]、化学激光器和光参量振荡器^[7]等。其中,光参量振荡器是获得高重复频率、高峰值功率中红外激光输出的主要方式。

目前,用于光参量振荡产生中红外激光的非线性晶体主要包括磷酸氧钛钾(KTP)、硒镓银(AgGaSe₂)、磷锗锌(ZnGeP₂)、周期性极化铌酸锂(PPLN)等^[8-10]。MgO:PPLN 晶体具有良好的物化特性和较高的非线性系数^[11-12],是获取中红外激光输出的理想晶体之一。由于采用纳秒激光泵浦源,可以有效提高 OPO 的转换效率,获得高功率中红外激光输出^[13],因此 MgO:PPLN 在纳秒中红外激光光参量振荡器中被广泛研究。

Lei Guo 等设计研究了一种室温下的高效率 MgO:PPLN 光参量振荡器,利用声光调 Q Tm:YAP 激光器产生的 1937 nm 激光作为泵浦光,在简并点 3.87 μm 处获得最大输出功率 1.2 W,其中,单脉冲能量和峰值功率分别为 0.2 mJ 和 2.67 kW^[14]。Ishizuki 等采用 10 Hz、10 ns、709 mJ 的 1064 nm 基频光泵浦 10 mm 厚的 PPLN 晶体,获得 540 mJ 的脉冲参量光输出^[15],该报道中虽然获得了较高的参量光峰值功率,但重复频率较低。山东大学何京良课题组采用高功率纳秒 1064 nm 激光器泵浦 2 mm 厚的 PPLN 晶体,实现了高功率、高效率的简并点 OPO 参量光输出^[16],在重频 30 kHz 工作时,3.79 μm 的脉冲宽度为 18.65 ns,对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 0.34 mJ 和 18.2 kW。

2021 年,蒋星辰等采用重复频率 25~35 kHz、脉冲宽度 51 ns 的 1064 nm 激光器泵浦 MgO:PPLN 光参量振荡器,在 35 kHz 频率下获得了最大输出功率 0.45 W、10.75 ns、3842.5 nm 中红外激光输出^[17],对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 0.013 mJ 和 1.196 kW。根据以上分析可知,在基于 MgO:PPLN 的纳秒光参量振荡器中,同时实现高重复频率和高峰值功率仍然存在较大技术难度。

文中采用高重复频率 1064 nm 纳秒激光泵浦基于 MgO:PPLN 的光参量振荡器,MgO:PPLN 尺寸为 50 mm×3 mm×1 mm,当 MgO:PPLN 温度为 80 ℃、基频光功率为 11.83 W 时,获得了平均功率 1.74 W、重复频 30 kHz,脉冲宽度 1.19 ns 的 3.93 μm 中红外激光输出,对应峰值功率为 48.5 kW。在泵浦功率相同时,实验研究了基频光重复频率分别为 30 kHz、40 kHz、50 kHz 的条件下,闲频光输出功率、转换效率的变化,根据实验结果,选取最大转换效率工作点。在此基础上,进一步开展了光参量振荡器的温度调谐实验,得到了与理论曲线符合较好的实验结果。

1 实验装置

实验采用 1064 nm 激光泵浦 MgO:PPLN OPO 单谐振腔结构,实验装置如图 1 所示。1064 nm 激光器为一台基于主振荡功率放大(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)构型的光电调 Q 激光器,其平均功率输出 ≥50 W,重复频率在 30~100 kHz 范围内可调,光束质量 $M^2 \leq 1.8$,光斑直径 ≤4 mm。为了便于控制基频光的热稳定参数,将 λ/2 波片和光隔离器组合使用,通过调节 λ/2 波片控制隔离器后的基频光功率。进而通过一组 4 倍缩束系统,将基频光光束尺寸压缩整形后,注入 MgO:PPLN OPO。

为提高转换效率,光参量振荡器采用单谐振平凹

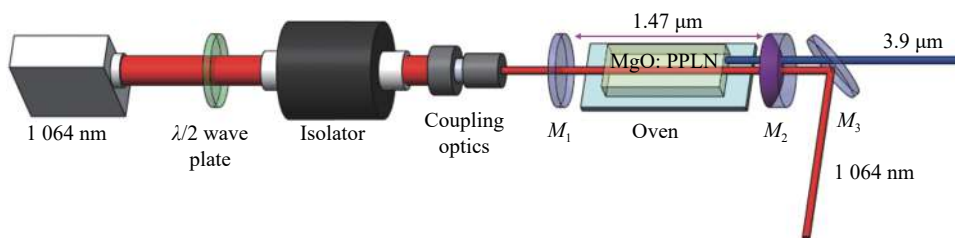


图 1 基于 MgO:PPLN 的光参量振荡器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of OPO based on MgO:PPLN

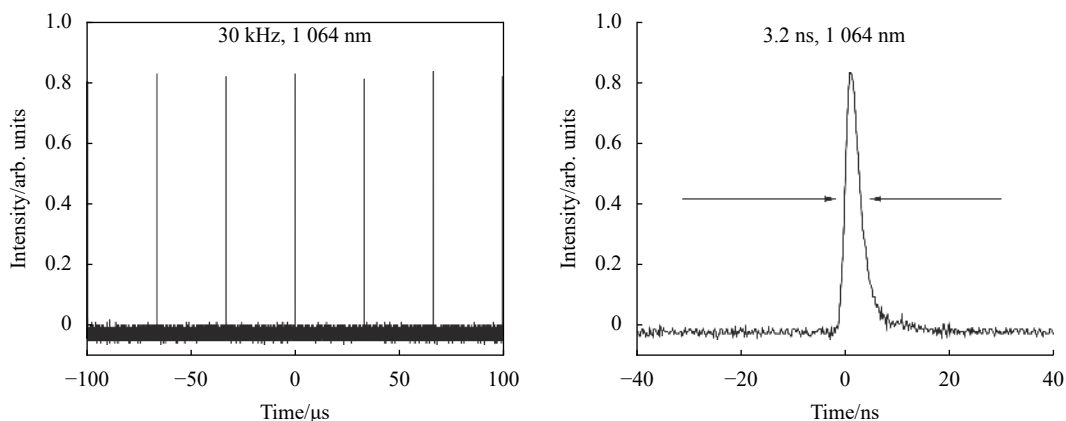
腔结构, 谐振腔长度为 83 mm。 M_1 是平行平面镜, 镀有 1064 nm 高透膜, 1.4~1.7 μm 高反膜; M_2 是 $R=-100$ mm 的平凹输出镜, 凹面朝向谐振腔内, 该面镀有 1.4~1.7 μm 高反膜, 1064 nm 和 3.8~4.5 μm 高透膜。 M_1 和 M_2 构成光参量振荡器的谐振腔, 基频光和闲频光经过谐振腔直接输出, 信号光在谐振腔内振荡。MgO:PPLN 尺寸为 50 mm \times 3 mm \times 1 mm, 极化周期 $A=29$ μm , 5 mol% MgO 掺杂。晶体两端均镀有对基频光、信号光和闲频光波段 (AR@1064 nm & 1.3~1.6 μm & 3.8~4.5 μm) 的增透膜。MgO:PPLN 晶体置于温控炉内, 温度控制范围为 25~200 $^{\circ}\text{C}$, 温控精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。 M_3

镀有 45 $^{\circ}$ 1064 nm 高反膜和 3.8~4.5 μm 高透膜, 用于将基频光与闲频光分开, 在 M_3 后得到中红外闲频光输出。

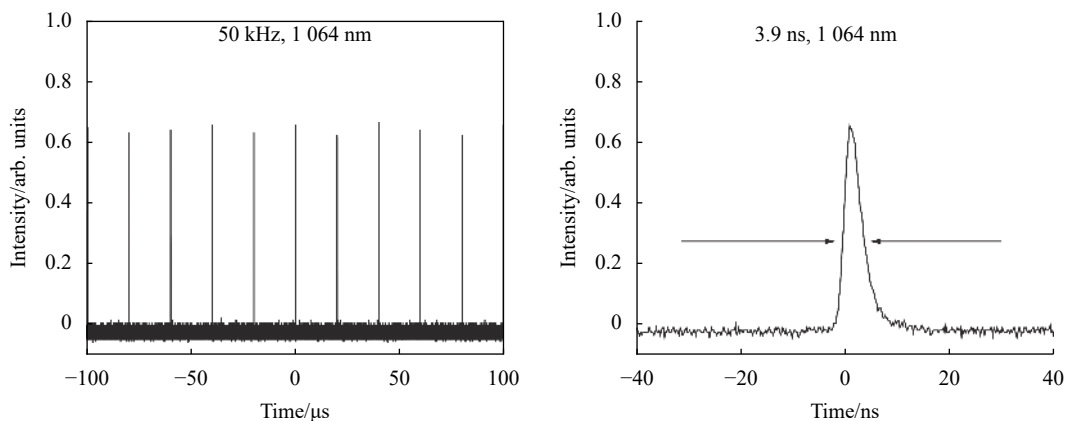
2 实验结果与分析

2.1 基频光光束参数特征

1064 nm 基频光的性能对 OPO 输出有重要影响。实验中采用泰克 DPO4104 B 示波器及 DET10 光电探测器、分别测量了 30~50 kHz 基频光的重复频率与脉冲宽度, 其中 30 kHz 和 50 kHz 重复频率和单脉冲波形测试结果如图 2 所示。



(a) 30 kHz 基频光对应的重复频率与脉宽
(a) The repetition rates and pulse duration of fundamental laser at 30 kHz



(b) 50 kHz 基频光对应的重复频率与脉宽
(b) The repetition rates and pulse duration of fundamental laser at 50 kHz

图 2 基频光输出重复频率与脉宽

Fig.2 The repetition rates and pulse duration of fundamental laser

图 2 所示的基频光的脉宽和重复频率测试结果表明, 1064 nm 基频光在 30 kHz 重复频率下输出脉冲宽度为 3.2 ns, 相比于 50 kHz 重复频率下的 3.9 ns 更窄。

采用 Ophir-sp620 型光束质量分析仪测试了基频光在 30 kHz 输出时的光束质量, 测试结果如图 3 所示。 $M_x^2=1.62$ $M_y^2=1.53$ 。

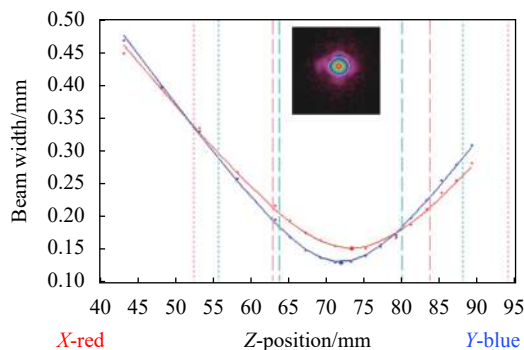


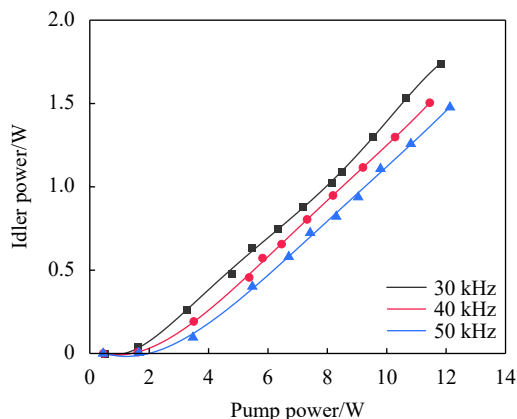
图 3 基频光在 30 kHz 输出时的光束质量

Fig.3 Quality factor M^2 of fundamental laser at 30 kHz

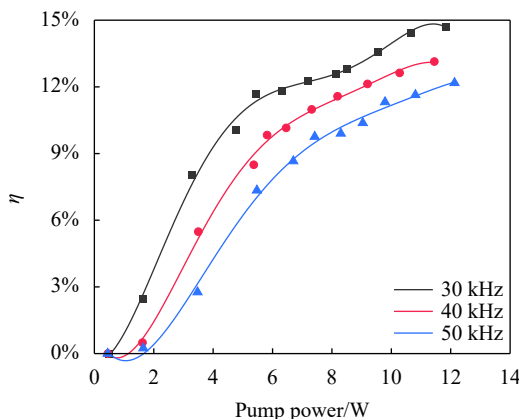
2.2 光参量振荡器

2.2.1 光参量振荡器输出功率与转换效率特点

采用上述 1064 nm 激光器泵浦 MgO:PPLN 光参



(a) 闲频光输出功率与基频光重复频率及功率的关系
(a) Relationship between power of idler laser and the repetition rates, power of fundamental laser



(b) 闲频光转换效率与基频光重复频率及功率的关系
(b) Relationship between conversion efficiency of idler laser and the repetition rates, power of fundamental laser

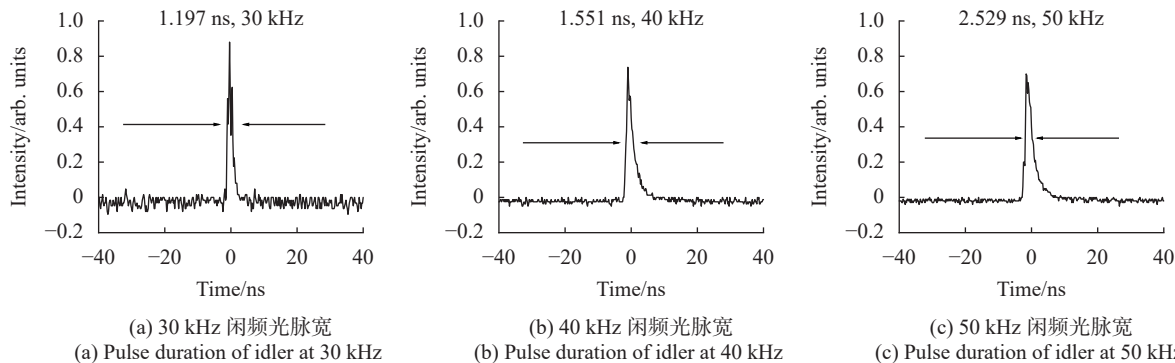
图 4 闲频光输出与基频光重复频率及功率的关系

Fig.4 Relationship between output of idler laser and the repetition rates, power of fundamental laser

2.2.2 光参量振荡器脉冲宽度特点

实验中,通过示波器及 VIGO 中波光电探测器,

对 3.93 μm 的闲频光在不同重复频率下的脉冲宽度进行了测试,测试结果如图 5 所示。



(a) 30 kHz 闲频光脉宽 (a) Pulse duration of idler at 30 kHz
(b) 40 kHz 闲频光脉宽 (b) Pulse duration of idler at 40 kHz
(c) 50 kHz 闲频光脉宽 (c) Pulse duration of idler at 50 kHz

图 5 3.93 μm 闲频光在不同重复频率下的脉冲宽度

Fig.5 The pulse duration of 3.93 μm idler laser at different repetition rates

当激光器工作在 30 kHz 时, 获得了脉冲宽度为 1.197 ns 的 3.93 μm 激光输出, 相对于 40 kHz 和 50 kHz 工作状态下脉冲宽度更窄, 主要是因为基频光在 30 kHz 时脉冲宽度更窄。闲频光相对于基频光脉冲宽度出现明显压缩, 主要是因为光参量振荡器在参量光产生的过程中会产生晶体吸收损耗以及振荡腔的腔损耗, 低能量的部分被抑制。

由以上实验可看出, 同等注入功率条件下, 基频光以 30 kHz 工作比 40、50 kHz 具有更高的转换效率, 这主要是因为同等注入功率条件下, 30 kHz 的基频光具有更高的单脉冲能量和峰值功率。

2.2.3 光参量振荡器温度调谐特点

光参量转换过程需满足能量守恒和动量匹配条件, 能量为 $h\nu_p$ 的基频光光子转化为能量为 $h\nu_s$ 的信号光光子和能量为 $h\nu_i$ 的闲频光光子^[18], 在这个过程中三波波长同时满足公式 (1) 和 (2):

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (1)$$

$$2\pi \left[\frac{n_p(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n_i(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda} \right] = \Delta k_{opo} \quad (2)$$

式中: p 、 s 、 i 分别代表基频光、信号光和闲频光; λ 为波长; n 为折射率; Λ 为晶体极化周期; Δk_{opo} 为最佳相位失配量, 准相位匹配条件下 $\Delta k_{opo}=0$ 。通过以上两个方程式, 可以看出当泵浦光波长一定时, 改变温度可以实现闲频光和信号光波长的调谐。结合实际应用需求, 实验中控制 MgO:PPLN 晶体温度在 50~200 °C 温度变化, 使用 Aecopitx 公司的 CH-2000 型中红外光谱仪测试了光参量振荡器的调谐波长, 测试结果如图 6 所示。

图 6 表明, 当 MgO:PPLN 的温度在 50~200 °C 范围改变时, 其波长调谐范围为 3 770~3 961 nm。进一步将 MgO:PPLN OPO 温度调谐实验测量结果与理论曲线的对比, 对比结果如图 7 所示。光谱实验测量结果与理论曲线符合较好。

实验中采用刀口法测量了 3.93 μm 闲频光的光束质量, 测试结果为 $M_x^2=2.12$, $M_y^2=1.98$ 。实验结果表明, 经过 OPO 腔后, 光束质量有一定程度的下降, 在后续的研究中应优化 OPO 腔参数、增加选模措施, 进一步提升光束质量。

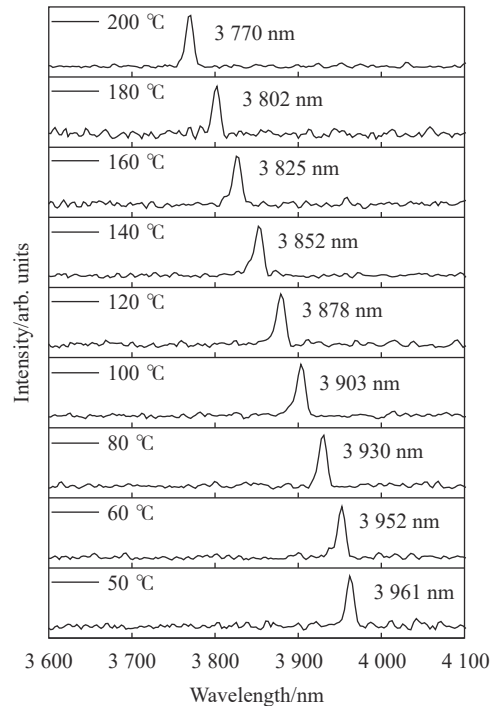


图 6 不同温度下闲频光光谱图

Fig.6 Spectra of idler laser at different temperatures

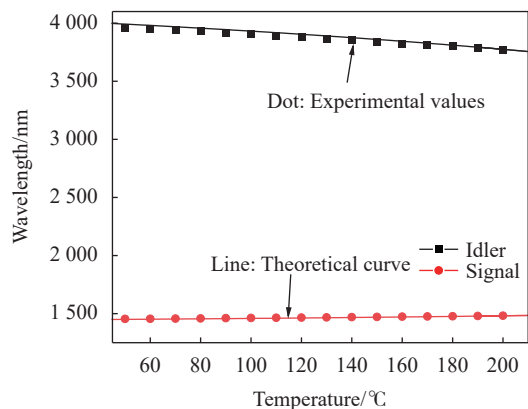


图 7 MgO:PPLN 温度调谐理论曲线与实验结果对比

Fig.7 Comparison between experimental results and theoretical curve of temperature tuned MgO:PPLN

3 结 论

采用 1 064 nm 激光泵浦准相位匹配 MgO:PPLN 晶体, 在重复频率 30~50 kHz、脉冲宽度小于 4 ns 的高重频泵浦条件下, 平均光光转化效率大于 10%, 实现了 3 770~3 961 nm 的波长调谐。通过对转换效率及脉冲宽度的测试, 优化出最佳转换效率工作点, 当基频光重复频率为 30 kHz、脉冲宽度为 3.2 ns、平均功率 11.83 W 时, 获得平均功率 1.744 W、脉冲宽度

约 1.2 ns, 对应峰值功率为 48.5 kW 的 3.93 μm 激光输出, 光光转化效率为 14.71%。后续研究中将进一步研究该类型光参量振荡器提升峰值功率和光束质量优化的方法。

参考文献:

- [1] Kovalchuk E V, Dekorsy D, Lvovsky A I, et al. High-resolution Doppler-free molecular spectroscopy with a continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2002, 26(18): 1430-1432.
- [2] Han Kezhen, Ning Jian, He Jingliang, et al. High-efficiency mid-infrared picosecond MgO: PPLN single resonant optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(5): 59-62.
- [3] Duan Yanming, Zhu Haiyong, Ruan Xiukai, et al. Cascaded OPO based on single KTA crystal for 2.6 μm laser generation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(10): 160152. (in Chinese)
- [4] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 432-439.
- [5] Vainio M, Siltanen M, Peltola J, et al. Grating-cavity continuous-wave optical parametric oscillators for high-resolution mid-infrared spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): A1-A10.
- [6] Tan Song. Study on quantum cascade lasers for trace gas detection [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [7] Zhao Jiaqun. Study on mid-infrared continuous wave optical parametric oscillator based on MgO: PPLN [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] Komine H, Fukumoto J M, Long W H, et al. Noncritically phase matched mid-infrared generation in AgGaSe₂ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 44-49.
- [9] Yang J F, Zhang B T, He J L, et al. Intracavity optical parametric oscillator based on GTR-KTP pumped by diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(1): 49-54.
- [10] Jiang H L, Bian J T, Nie J S, et al. Theoretical and experimental investigation on the 2.7 μm laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator generating 4.3 μm laser[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7655: 76551P.
- [11] Chen Yi, Liu Gaoyou, Wang Ruixue, et al. Research progress of nonlinear crystals applied to mid - and long-wave infrared solid lasers [J]. *Journal of Artificial Crystals*, 2020, 49(8): 1379. (in Chinese)
- [12] Qian Chuanpeng, Yu Ting, Liu Jing, et al. Research progress of all-solid-state mid-Infrared laser [J]. *Modern Applied Physics*, 2020, 11(4): 040102. (in Chinese)
- [13] Nie Hongkun, Ning Jian, Zhang Baitao, et al. Research progress of infrared optical parametric oscillators in optical superlattices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501008. (in Chinese)
- [14] Guo L, Yang Y, Zhao S, et al. Room temperature Watt-level 387 m MgO: PPLN optical parametric oscillator under pumping with a Tm: YAP laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32916.
- [15] Ishizuki H, Taira T. Half-joule output optical-parametric oscillation by using 10-mm-thick periodically poled Mg-doped congruent LiNbO₃ [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20002-20010.
- [16] Chen B Y, Yu Y J, Wu C T, et al. Research on high efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO: PPLN optical parametric oscillator based on narrow linewidth 1 064 nm fiber laser pumped [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 20200169. (in Chinese)
- [17] Jiang Xingcheng, Cheng Dehua, Li Yeqiu, et al. Research on 35 kHz mid-infrared laser based on optical parametric oscillation[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*. (2021-12-07)[2022-03-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211206.1724.006.html>
- [18] Kolker D B, Sherstov I V, Kostyukova N Y, et al. Broadband mid-IR source based on a MgO: PPLN optical parametric oscillator [J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(2): 191-194.