

光纤激光泵浦PPMgLN高效率2.70 μm 光参量振荡器研究

昌程程, 王子健

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月29日; 录用日期: 2024年12月11日; 发布日期: 2024年12月19日

摘 要

报道了一种1.06 μm 掺镱光纤激光泵浦PPMgLN光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator), 实现高转换率的2.70 μm 中红外激光输出。在泵浦注入功率为14.7 W、重复频率110 kHz、脉宽60 ns的条件下, 获得最大输出功率为3.4 W的2.70 μm 激光输出。对应脉冲宽度为55.39 ns, 光-光转换效率为22.8%。2.70 μm 闲频光光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为1.41和1.42, 其光斑模式接近基模。此外, 控制晶体温度在30~90℃变化, 实现了闲频光波长在2.692~2.493 μm 范围内调谐。

关键词

光纤激光器, 中红外激光, 光参量振荡器

Research on High-Efficiency 2.70 μm Optical Parametric Oscillator Pumped by Fiber Laser Based on PPMgLN

Chengcheng Chang, Zijian Wang

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 29th, 2024; accepted: Dec. 11th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

Abstract

An optical parametric oscillator (OPO) pumped by a 1.06 μm Yb-doped fiber laser based on a periodically poled MgO-doped lithium niobite (PPMgLN) is reported for high-efficiency 2.70 μm mid-

infrared laser output. Under the condition of a pump injection power of 14.7 W, a repetition rate of 110 kHz, and a pulse width of 60 ns, a maximum output power of 3.4 W of 2.70 μm laser output is achieved. The corresponding pulse width is 55.39 ns, with an optical-to-optical conversion efficiency of 22.8%. The beam quality factors M_x^2 and M_y^2 of the 2.70 μm idler light are 1.41 and 1.42, respectively. The laser beam quality closely approaches the theoretical quality of the fundamental mode beam. Moreover, by controlling the crystal temperature in the range of 30~90°C, a wavelength tuning range of idler light from 2.692 to 2.493 μm is achieved.

Keywords

Fiber Laser, Mid-Infrared Laser, Optical Parametric Oscillation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2~5 μm 波段中红外激光位于大气窗口区, 在光谱分析、激光医疗、激光对抗、大气污染物防治等众多领域具有广泛的应用前景。当前全球环境问题日益凸显, 大气中微量的温室气体, 例如二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)和二氧化氮(NO_2)等气体的监测变得极为重要。中红外激光在 2.70 μm 的波段对 CO_2 气体表现出显著的吸收峰[1]-[3]。借助中红外激光技术对大气中这些微量气体的含量变化进行检测, 可以有效监测大气环境的变化。当前, 基于近红外波泵浦的光学参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)是实现中红外激光最高效且最具灵活性的方法之一[4][5]。通常, 基于 PPMgLN 晶体的 OPO (PPMgLN-OPO) 采用光纤激光器或固体激光器作为泵浦源。光纤激光器具有光束质量好, 转换效率高, 结构紧凑、发散角小、输出功率稳定等优点[6]-[9], 因此, 将光纤激光器作为 PPMgLN-OPO 的泵浦源, 有利于实现激光器的小型化和集成化。

目前使用纳秒脉冲激光器(YDFL)泵浦 OPO 实现中红外波段激光输出的公开报道有很多。2014 年, 浙江大学的陈滔采用 1064 nm 声光调 Q 的脉冲 YDFL 泵浦 PPMgLN-OPO, PPMgLN 为变频介质, 实现了功率为 3.27 W 的 3.82 μm 闲频光输出, 光-光转换效率约为 13%, 光束质量因子为 $M_x^2 = 1.98$ 和 $M_y^2 = 1.44$ [10]。2017 年, 中国科学院合肥物理研究所的 Ting Xing 等人利用单纵模脉冲掺 Yb 光纤激光器泵浦 PPMgLN-OPO, 实现了输出功率为 2.67 W 的 3031 nm 闲频光输出, 光-光转换效率为 17.4%。通过对非线性晶体进行温度控制, 实现了在 2.85~3.05 μm 范围内波长调谐[11]。2022 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所何洋等人采用 1.064 μm 掺镱光纤激光器泵浦 PPMgLN-OPO, 实现了最大输出功率为 9.15 W 的 3.754 μm 闲频光输出, 转换效率为 11.57% [12]。

本文选用 MOPA 放大结构的 1.06 μm YDFL 作为泵浦源, 并选择极化周期为 31.89 μm 的 PPMgLN 为变频介质, 以获取高功率、高转换率的 2.70 μm 中红外激光输出。采用光纤激光泵浦 PPMgLN-OPO 线性腔结构, 在实验中, 对重频、脉宽的最佳匹配值进行调控, 在泵浦注入功率为 14.7 W、重复频率 110 kHz、脉宽 60 ns 的情况下, 获得了最大输出功率为 3.4 W 的 2.70 μm 的闲频光输出。其相应脉冲宽度为 55.39 ns, 光-光转换效率为 22.8%。利用这种技术研发的 OPO 具有灵活的调谐性能, 控制晶体温度在 30~90°C 变化, 实现了闲频光在 2.692~2.493 μm 范围内连续可调。这为测量痕量气体提供了一种有效的技术手段, 具有重要的学术和应用价值。

2. 实验装置与原理

光纤激光泵浦 PPMgLN-OPO 的实验装置如图 1 所示, 采用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 最高输出功率为 $40\ \text{W}$ 的 YDFL 作为泵浦源, 掺镜光纤激光器输出端包含法拉第旋转器(FR)、偏振分束器(PBS)和 $\lambda/2$ 波片(HWP)隔离系统, 即可在激光输出端进行模式转换, 并防止反射光损伤泵浦系统。OPO 谐振腔由输入镜 M1、输出镜 M2 及 PPMgLN 构成。依据谐振腔稳定条件, 设定腔长为 $75\ \text{mm}$ 。波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 的泵浦光经过一个焦距为 $150\ \text{mm}$ 的聚焦透镜后焦距到非线性晶体中心。其中, 采用一个极化周期为 $31.89\ \mu\text{m}$ 、MgO 掺杂量为 5%、尺寸为 $2 \times 2 \times 50\ \text{mm}^3$ 的 PPMgLN 晶体作为非线性变频介质, 晶体两端镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $1.4\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 的增透膜。将 PPMgLN 晶体放置在相应尺寸的晶体夹中, 并在室温 20°C 下开展实验。谐振腔中各腔镜曲率及镀膜情况如表 1 所示。

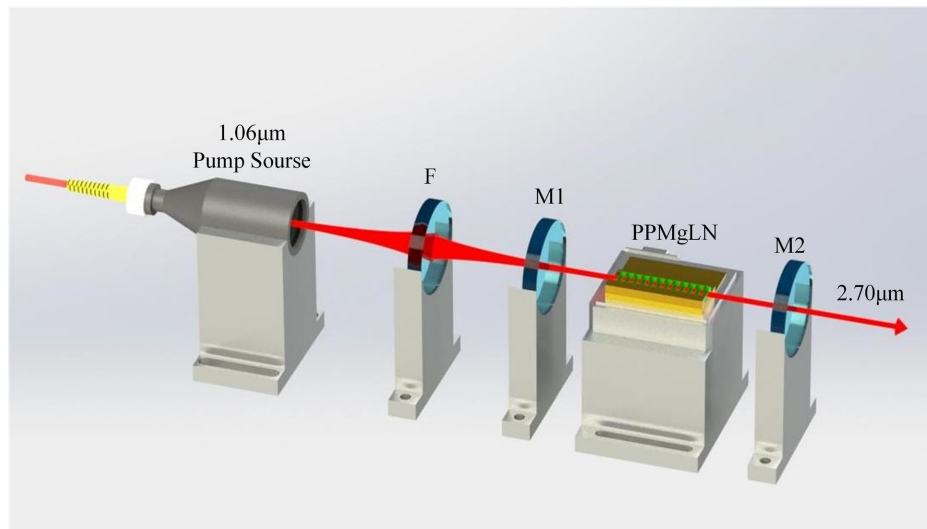


Figure 1. Experimental setup of fiber laser pumped PPMgLN-OPO

图 1. 光纤激光泵浦 PPMgLN-OPO 实验装置

Table 1. Fiber laser pumped $2.70\ \mu\text{m}$ mid-infrared experimental OPO cavity mirror coating specifications

表 1. 光纤激光泵浦 $2.70\ \mu\text{m}$ 中红外实验 OPO 腔镜膜系指标

名称	材质	类型	曲率半径	膜系
F	K9	凸 - 凸	$F = 150\ \text{mm}$	HT@1064 nm ($T \approx 99.98\%$)
M1	ZNS	平 - 凹	$R1 = 200\ \text{mm}$	S1: HR@ $1.4\sim 1.85\ \mu\text{m}$ ($R \approx 99.99\%$), HR@ $2.6\sim 4.3\ \mu\text{m}$ ($R \approx 99.99\%$), HT@ $1.06\sim 1.095\ \mu\text{m}$ ($T \approx 99.19\%$) S2: AR@ $1.06\sim 1.095\ \mu\text{m}$
M2	CaF ₂	平 - 凹	$R2 = 150\ \text{mm}$	S1: HR@ $1.06\sim 1.095\ \mu\text{m}$ ($R \approx 99.99\%$), HR@ $1.4\sim 1.85\ \mu\text{m}$ ($R \approx 99.99\%$), HT@ $2.6\sim 4.3\ \mu\text{m}$ ($T \approx 99.19\%$) S2: AR@ $2.6\sim 4.3\ \mu\text{m}$

光参量振荡器实现准相位匹配的前提需要同时满足两个条件: 能量守恒与动量守恒[13], 即:

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

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i \quad (2)$$

上式中, λ 代表参量光波长, ω 代表角频率, n 代表折射率。其中, 泵浦光、信号光和闲频光分别用角标

p 、 s 、 i 表示。对于准相位匹配的 OPO，需要再增加一个 k_m 项，来保证在相位匹配过程中 $\Delta k = 0$ ，即：

$$\Delta k = \frac{1}{c} (n_p \omega_p - n_s \omega_s - n_i \omega_i - m \omega_\Lambda) = 0 \quad (3)$$

式中， $\omega_\Lambda = 2\pi c/\Lambda$ ， m 为准相位匹配阶数， Λ 为非线性晶体的极化周期，因此，式(2-15)可以被转换成以下形式：

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda} = 0 \quad (4)$$

根据 PPMgLN 晶体 e 偏振光色散方程(Sellmerier)为：

$$n^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (5)$$

式中， f 用温度 t 表示为：

$$f = (t - 24.5)(t + 570.82) \quad (6)$$

由式(1)~(6)，可以发现，OPO 参量光输出波长与 PPMgLN 晶体温度、极化周期及泵浦光波长密切相关。本文中，采用 $1.06 \mu\text{m}$ 掺镱光纤激光器泵浦 PPMgLN 晶体，确保了泵浦光的波长是稳定的。因此，通过使用独立的温控装置对 PPMgLN 晶体温度进行控制，可以实现宽波长范围的激光输出。

3. 实验结果及分析

测试 YDFL 输出功率与 LD 抽运功率的关系如图 2 所示。设定重频为 110 kHz、脉宽为 60 ns，在 LD 抽运功率为 100 W 的情况下，利用以色列 OPHIR 公司生产的 F150A-BB-26-PPS 型功率探头对 $1.06 \mu\text{m}$ YDFL 输出功率进行了测量，最大输出功率为 40.2 W。利用热释电阵列相机(OPHIR PyrocamIII)测量了 $1.06 \mu\text{m}$ YDFL 光斑形貌并使用 OSA205 傅里叶光谱仪(波长精度 $\pm 0.05 \text{ nm}$ ，谱线范围 $1 \sim 5.6 \mu\text{m}$)对输出闲频光的光谱进行测量，如图 3 所示。泵浦源中心波长为 1063.68 nm，采用刀口法对聚焦后泵浦光光斑大小进行测量，依据高斯光束的传播方程，拟合得到了激光远场发散角和光斑束腰半径，经计算光束质量因子 M^2 为 1.23，接近衍射极限。因此，YDFL 可作为有效非线性变换的高质量泵浦源。

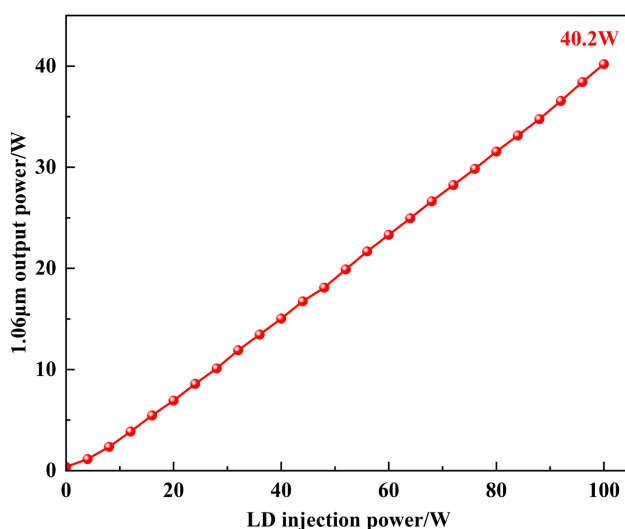


Figure 2. Relationship between $1.06 \mu\text{m}$ YDFL output power and LD pumping power

图 2. $1.06 \mu\text{m}$ YDFL 输出功率与 LD 抽运功率的关系

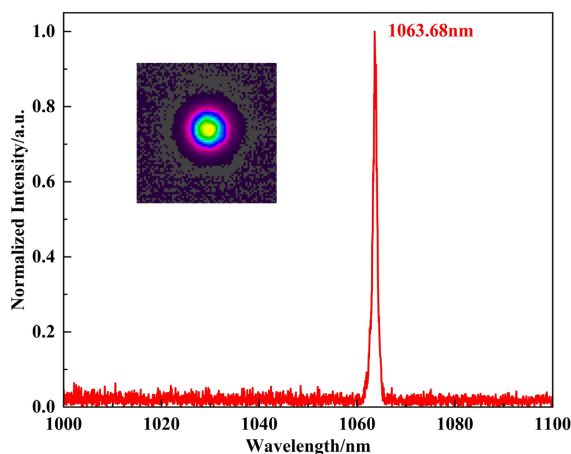


Figure 3. 1.06 μm YDFL beam and spectrum

图 3. 1.06 μm YDFL 光斑及光谱图

对不同脉宽、重频下 YDFL 泵浦 PPMgLN-OPO 闲频光输出特性测试。泵浦光的参数将分别设置为不同的脉宽(30 ns、60 ns、120 ns、200 ns)和重频(110 kHz、120 kHz、150 kHz、200 kHz), 并进行相应实验。利用 F150A-BB-26-PPS 型功率探头对输出的 2.70 μm 闲频光的输出功率进行测量。不同重频脉宽下, 2.70 μm 闲频光输出功率变化曲线, 如图 4 所示。

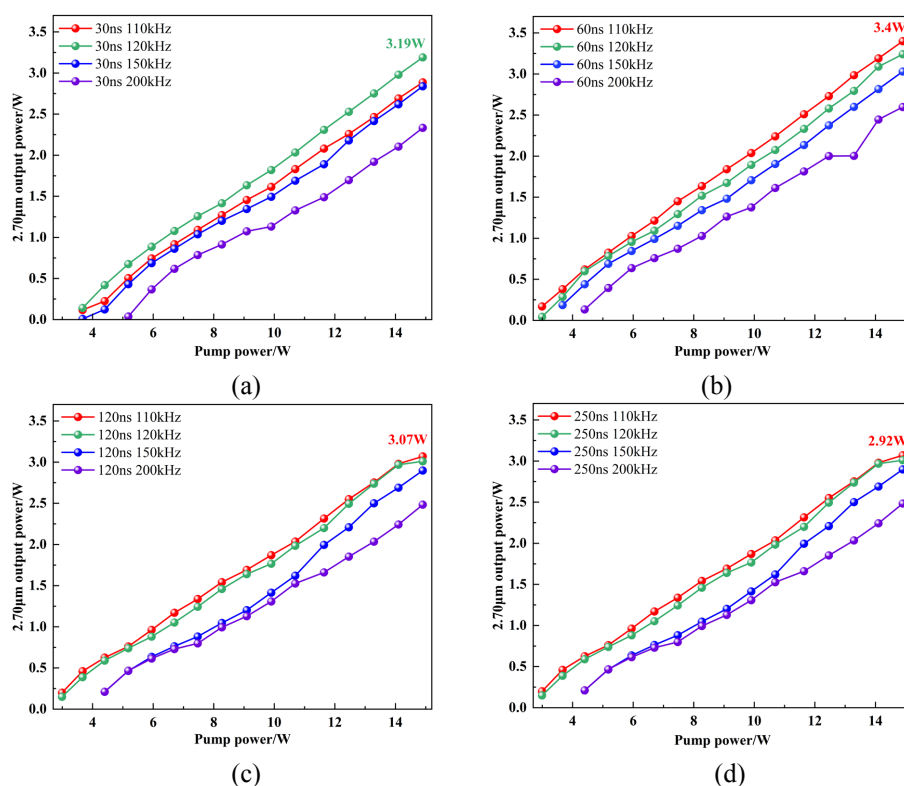


Figure 4. Variation curve of the output power of idler light at 2.70 μm under different repetition rates and pulse widths. (a) With a fixed pulse width of 30 ns, (b) with a fixed pulse width of 60 ns, (c) with a fixed pulse width of 120 ns, (d) with a fixed pulse width of 200 ns

图 4. 不同重频脉宽下, 2.70 μm 闲频光输出功率变化曲线。(a) 固定脉宽 30 ns, (b) 固定脉宽 60 ns, (c) 固定脉宽 120 ns, (d) 固定脉宽 200 ns

经对比图 4(a)~(d)可知, 当设定泵浦光重频为 110 kHz、脉宽为 60 ns, 泵浦功率为 14.9 W 时, 获得最佳输出功率为 3.4 W 的 2.70 μm 闲频光输出, 光-光转换效率为 22.8%。其原因是在泵浦光注入的能量保持不变的情况下, 较低的重复频率会导致峰值功率的提升。这种较高的峰值功率有助于促进光参量振荡过程中能量转换。采用 OSA205 傅里叶光谱仪(波长精度 ± 0.05 nm, 谱线范围 1~5.6 μm)对输出闲频光的光谱进行测量, 如图 5 所示, 输出闲频光中心波长为 2.704 μm 。

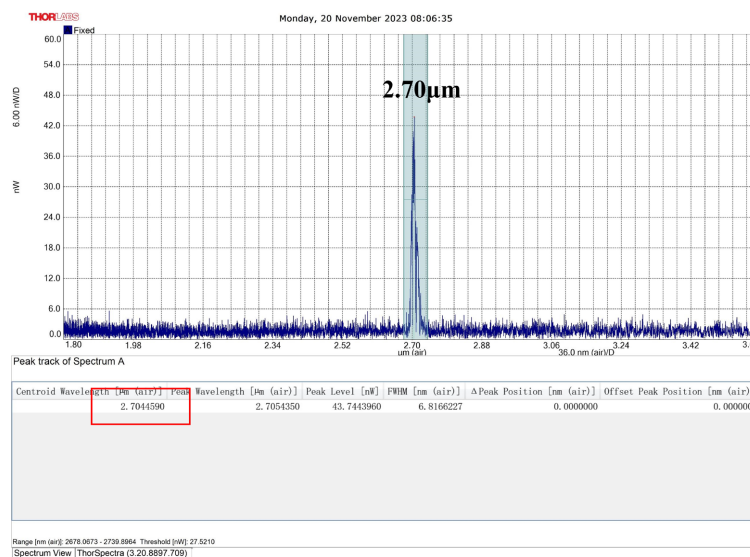


Figure 5. The spectrum of idler light at 2.70 μm
图 5. 闲频光 2.70 μm 光谱图

利用美国泰克公司生产的型号为 MDO3054 示波器测量了 2.70 μm 闲频光的重频及脉宽, 如图 6 所示。实验结果显示, 2.70 μm 闲频光重频为 110 kHz, 脉宽为 55.39 ns。在光参量振荡过程中, 1.06 μm 泵浦光会同步转换为闲频光以及信号光。因此, 最终输出 2.70 μm 闲频光脉冲宽度要小于 1.06 μm 泵浦光脉宽。

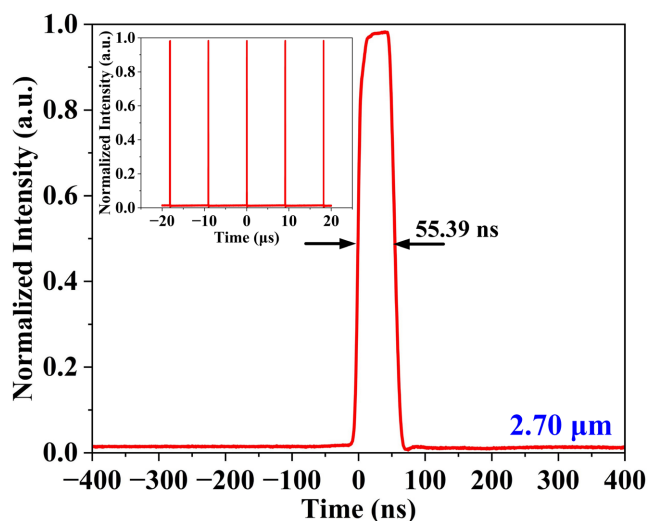


Figure 6. Pulse width of 2.70 μm idler light at a fundamental frequency of 1.06 μm , with a repetition rate of 110 kHz and a pulse width of 60 ns
图 6. 在 1.06 μm 重频为 110 kHz、脉宽为 60 ns 下, 2.70 μm 闲频光脉宽

使用以色列 OPHIR 公司生产的热释电阵列相机(OPHIR PyrocamIII)对输出 $2.70\ \mu\text{m}$ 闲频光光束质量进行光斑形貌进行测量, 如图 7 所示。在泵浦源输出端放置焦距为 $200\ \text{mm}$ 的聚焦镜, 利用刀口法测量经聚焦后的闲频光光斑大小, 根据高斯光束传播方程, 拟合得到激光的远场发散角以及光斑束腰半径, 计算得出光束计算得出 $2.70\ \mu\text{m}$ 在水平垂直两方向上的光束质量分别为 $M_x^2 = 1.41$ 和 $M_y^2 = 1.42$ 。

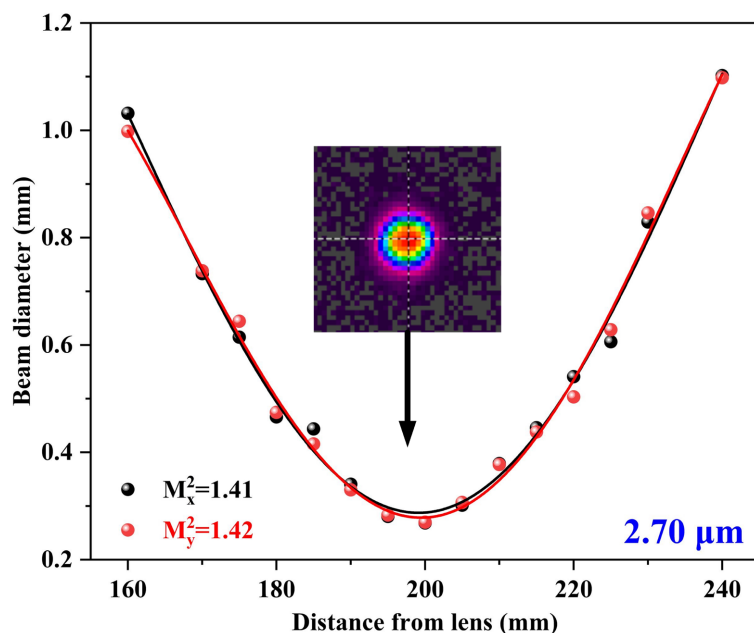


Figure 7. Beam quality of $2.70\ \mu\text{m}$ idler light

图 7. $2.70\ \mu\text{m}$ 闲频光光束质量

使用 HCP 公司生产的温控炉 OV50, 对 PPMgLN 晶体工作温度进行精确控制, 并利用 AQ6373 光谱分析仪(测量波长精度 $<0.1\ \text{nm}$, 测量光谱范围 $1\sim12\ \mu\text{m}$)对输出闲频光进行了测量, 具体的实验结果如图 8 所示。从图中可以看出, 极化周期 $31.89\ \mu\text{m}$ 的 PPMgLN 晶体温度在 $30\sim90^\circ\text{C}$ 变化, 其调谐范围为 $2.692\sim2.493\ \mu\text{m}$, 调谐带宽为 $199\ \text{nm}$ 。

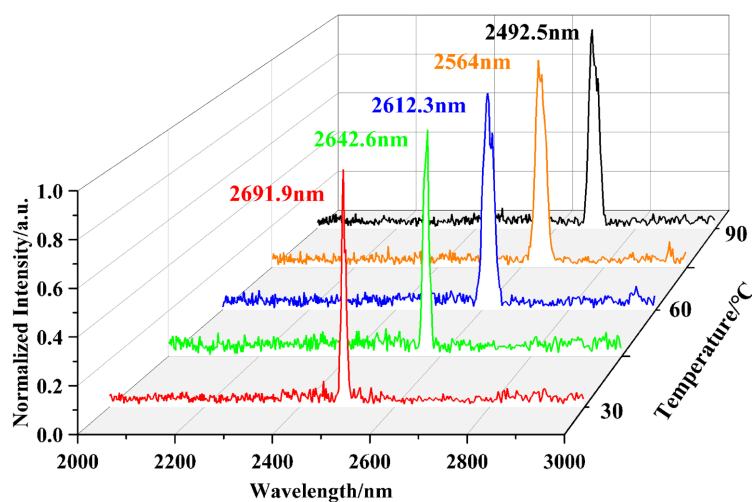


Figure 8. Output mid-infrared wavelength versus the temperature of PPMgLN

图 8. 输出中红外波长与 PPMgLN 温度的关系

根据色散方程, 模拟实验所用的 PPMgLN 晶体在不同温度下的输出波长变化, 并与实验测量值进行对比, 如图 9 所示。可知实际测量值要低于理论值, 这是因为在实验过程中, 随着泵浦光注入能量的增加, 晶体的实际温度会略大于温控炉设定的温度, 从而导致理论值与实验实测值有偏差。

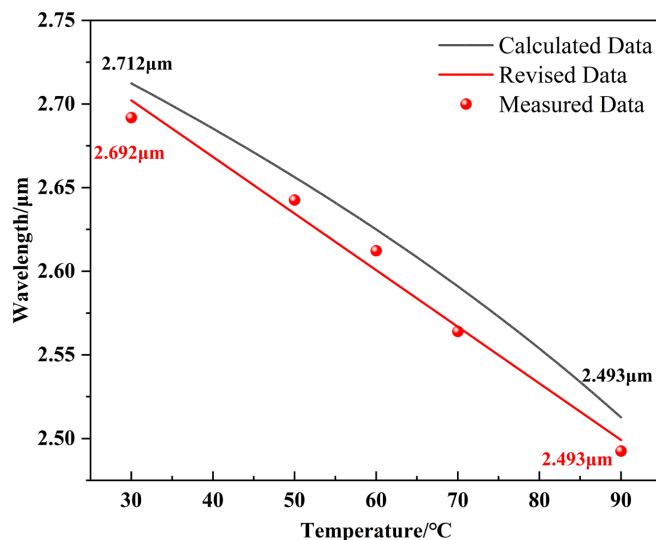


Figure 9. Theoretical and actual variation curves of output wavelength with crystal temperature
图 9 输出波长随晶体温度理论与实际变化曲线

4. 结论

本文介绍了一种光纤激光泵浦 PPMgLN-OPO, 实现了高转换效率的 2.70 μm 激光输出。在泵浦功率为 14.7 W、重复频率 110 kHz、脉宽 60 ns 条件下, 获得最大输出功率为 3.4 W 的 2.70 μm 的闲频光输出。相应脉冲宽度为 55.39 ns, 光-光转换效率为 22.8%。2.70 μm 闲频光光束质量 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.41 和 1.42。同时, 通过控制晶体温度在 30~90°C 变化, 实现了闲频光在 2.692~2.493 μm 范围内连续可调。在大气探测的实际应用中, 特别是在痕量气体测量方面, 2.70 μm OPO 有着巨大的应用潜力。

基金项目

本工作依托于吉林省科技发展计划项目(编号 20220402022GH)。

参考文献

- [1] 聂鸿坤, 宁建, 张百涛, 等. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 125-152.
- [2] 钱传鹏, 余婷, 刘晶, 等. 全固态中波红外激光器研究进展[J]. 现代应用物理, 2020, 11(4): 17-27.
- [3] 阮双琛, 侯静, 李剑峰, 等. 先进中红外激光技术及应用[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 9-10.
- [4] 胡小鹏, 张勇. 基于光学超晶格的新型激光器和新颖光学效应[J]. 物理实验, 2019, 39(6): 1-8, 15.
- [5] 刘豪. 大气二氧化碳探测差分吸收激光雷达技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [6] Parsa, S., Kumar, S.C., Nandy, B. and Ebrahim-Zadeh, M. (2019) Yb-Fiber-Pumped, High-Beam-Quality, Idler-Resonant Mid-Infrared Picosecond Optical Parametric Oscillator. *Optics Express*, **27**, 25436-25444. <https://doi.org/10.1364/oe.27.025436>
- [7] Jin, L., Martinez, A. and Yamashita, S. (2013) Optimization of Output Power in a Fiber Optical Parametric Oscillator. *Optics Express*, **21**, 22617-22627. <https://doi.org/10.1364/oe.21.022617>
- [8] Zhao, J.Q., Yao, B.Q., Tian, Y., Ju, Y.L. and Wang, Y.Z. (2010) High Power, Continuous Wave, Singly Resonant OPO Based on MgO:PPLN. *Laser Physics*, **20**, 1902-1906. <https://doi.org/10.1134/s1054660x10190205>

-
- [9] Lu, J., Al Sayem, A., Gong, Z., Surya, J.B., Zou, C. and Tang, H.X. (2021) Ultralow-threshold Thin-Film Lithium Niobate Optical Parametric Oscillator. *Optica*, **8**, 539-544. <https://doi.org/10.1364/optica.418984>
- [10] 陈滔. 基于准相位匹配技术的高性能光参量振荡器研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [11] Xing, T., Wang, L., Hu, S., Cheng, T., Wu, X. and Jiang, H. (2017) Widely Tunable and Narrow-Bandwidth Pulsed Mid-IR PPMgLN-OPO by Self-Seeding Dual Etalon-Coupled Cavities. *Optics Express*, **25**, 31810-31815. <https://doi.org/10.1364/oe.25.031810>
- [12] 何洋, 陈飞, 万浩华, 等. 光纤激光泵浦 MgO: PPLN 高功率中波红外光参量振荡器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 13-17.
- [13] Armstrong, J.A., Bloembergen, N., Ducuing, J. and Pershan, P.S. (1962) Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric. *Physical Review*, **127**, 1918-1939. <https://doi.org/10.1103/physrev.127.1918>