文章编号: 1001-5078(2019)01-0051-04　　·激光器技术·

3.705 μm 紧凑型光参量振荡器

赵志刚[1], 刘　虎[1], 王德飞[1], 何　洋[2], 楚振锋[1]
(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;
2. 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, 吉林 长春 130033)

摘　要: 报道了一种基于工程应用的 3.705 μm 紧凑型高稳定性光参量振荡器。采用半导体制冷、强制气体对流冷却和热管导热技术相结合的方式, 对主振荡功率放大结构的掺 Yb 光纤泵浦模块泵浦过程中产生的废热进行有效管理, 再将经过耦合后的泵浦光注入到使用温控炉精确控温的 PPMgLN 晶体, 在重复频率为 55.56 kHz 时, 获得了功率不稳定度优于 1.5% 的 1.78 W, 脉冲宽度 120 ns, 峰值波长 3.705 μm 的线偏中红外激光输出, 光光转换效率为 12.6%。

关键词: 中红外激光; 光参量振荡器; 不稳定度; 发散角
中图分类号: TN248.1　　**文献标识码:** A　　**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.01.008

3.705 μm compact optical parametric oscillator

ZHAO Zhi-gang[1], LIU Hu[1], WANG De-fei[1], HE Yang[2], CHU Zhen-feng[1]
(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center China, Luoyang 471003, China; 2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin 130033, China)

Abstract: A 3.705 μm compact, highly stable optical parametric oscillator (OPO) based on engineering application was reported. The method of combining semiconductor cooling technique, forced convection cooling technique and heat pipe technique was adopted to effectively manage the waste heat generated from pumping process of the main oscillator power amplifier (MOPA) structure of the Yb-doped fiber pumped module. Then the coupled pump light was injected into the PPMgLN crystal, which was precisely temperature controlled by a constant temperature oven. When repetition rate was at 55.56 kHz, average output power of 1.78 W at 3.705 μm line-polarized mid-infrared laser was obtained with 120 ns pulse width, the power instability was better than 1.5% and light-light conversion efficiency was 12.6%.

Key words: mid-infrared laser; optical parametric oscillator; instability; divergence angle

1　引　言

3 ~ 5 μm 波段中红外激光处于热辐射能量集聚区, 位于大气吸收窗口, 而且水吸收强烈, 因此该波段激光在大气科学、激光光谱学、医疗诊断和军事对抗等诸多领域有广泛的应用和潜在需求[1]。在众多产生中红外激光的技术中, OPO 技术具有波长调谐范围宽、全固化、结构紧凑、输出功率高等特点, 受到广泛关注与研究[2-6]。工程应用紧凑型 OPO, 通常是将泵浦模块和 OPO 模块集成在一个箱体内, 泵浦源的电光转换效率为 20% ~ 30%[7], 其余能量会大量累积形成废热, 需要及时进行散除, 否则会严重影响系统的整体性能, 甚至导致系统失效。此外, OPO 过程中, 热膨胀会对非线性晶体的极化周期产生影响, 而极化周期又与温度密切相关, 造成参量光

作者简介: 赵志刚(1984 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事固体激光技术研究。E-mail: 18537960296@163.com
收稿日期: 2018-04-24

峰值波长飘移，同时引起转换效率和输出功率的变化。因此，有效的废热管理和精确的温度控制是紧凑型 OPO 稳定工作的关键。

本文所报道的基于工程应用的紧凑型光参量振荡器，采用 MOPA 结构的掺 Yb 光纤泵浦模块泵浦 PPMgLN 晶体，利用半导体制冷、强制气体对流冷却和热管导热技术相结合的方式，对泵浦过程中产生的废热进行有效管理，同时利用恒温炉对 OPO 过程的温度进行精确控制，在重复频率为 55.56 kHz 时，获得了功率不稳定度优于 1.5% 的 1.78 W、脉冲宽度 120 ns、峰值波长 3.705 μm 的线偏中红外激光输出，光光转换效率为 12.6%。

2 理论分析与系统结构

2.1 理论分析

功率体积比的增大，使得散热问题愈发突出，严重制约 OPO 系统向小型化、高效化发展[8]。在 OPO 系统中，废热主要来自于泵浦模块。如果废热在泵浦模块的狭小空间内累积，会导致光学晶体温度升高，引起热透镜、热致双折射等效应，造成光束质量和光光转换效率降低，输出功率波动、降低，甚至导致晶体膜层损伤或激光器失效，最终难以获得中红外激光输出。因此，必须采取措施对泵浦模块产生的废热进行管理。

OPO 在运转中，必须满足能量守恒和动量守恒方程[9]：

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}$$

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

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_0)\left[1 + \alpha(T - T_0)\right] \tag{1}$$

式中，λ_p，λ_s，λ_i，n_p，n_s，n_i 分别表示泵浦光，信号光和闲频光的波长与折射率；α 表示 PPMgLN 晶体的热膨胀系数；Λ 表示晶体的极化周期。由上式可知，在光参量振荡过程中，非线性晶体的热膨胀系数、极化周期和温度密切相关，相互影响。热膨胀系数的变化，引起晶体极化周期发生变化，极化周期又会引起参量光波长的变化，同时高增益会导致光参量过程发生逆转换，使得光光转换效率和输出功率降低。因此，OPO 模块中必须使用高精度的恒温炉对光参量过程进行精确控温。

2.2 系统结构

OPO 系统结构及光路如图 1 所示。系统由激光箱和电控箱组成，掺 Yb 光纤泵浦模块、OPO 模块和热控模块集成在激光箱中，驱动、控制和电源模块集成在电控箱中。通过合理设计各个模块的安装位置和机箱结构，并采用轻质铝材，使用翅片风冷压缩体积和重量，以实现小型化、紧凑型设计。

掺 Yb 光纤泵浦模块采用全光纤 MOPA 结构设计。种子源为声光调 Q 脉冲掺 Yb 光纤激光器，输出的种子光通过光纤隔离器与放大器相连，最终由光纤准直头(collimator)整形为平行光输出。在重复频率为 55.56 kHz 时，输出功率大约 30 W，脉宽 146 ns，光束质量因子小于 1.3。准直后的泵浦光经 45°镜(M1)反射，进入隔离器(OI)对泵浦光进行光学隔离，同时将泵浦光的偏振态调整至垂直偏振方向。再经耦合镜组(coupler)调整泵浦光斑的大小，进入 PPMgLN 晶体。谐振腔采用泵浦光双通、信号光单谐振结构。晶体放置在恒温炉(oven)上，端面均镀有泵浦光、信号光和闲频光的增透膜。OPO 输出的参量光，使用锗片(M4)将中红外波段以外的信号光、泵浦光滤除，最终得到 3.705 μm 激光输出。为了方便使用，引入半导体激光器(LD)产生指示光，经分光镜反射，实现与中红外激光的同路同向输出，起到辅助瞄准作用。

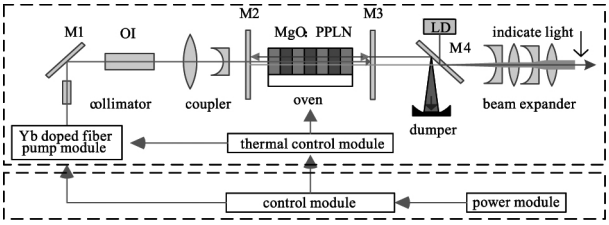


图1 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic setup of the laser

泵浦模块产生的废热主要来自于 LD 和掺 Yb 增益光纤，二者均固定在泵浦模块的底板上，在底板下方安装多个单级 TEC，TEC 的另一端与激光箱底部机壳相连。机壳加工成散热翅片结构，同时在翅片的两端安装轴流高速风扇，通过强制气体对流使废热导出。此外，系统的底部安装了导热管，进一步提高了内部废热的传导效率。OPO 模块中，晶体的侧面、上下表面均加工成毛面，然后涂抹一层液态金属，再固定在热沉中间(热沉卡槽尺寸和晶体尺寸严格匹配)，既利于晶体和热沉的紧密贴合，提高固定夹持精度，又提高了热传导的效果。热沉底部贴有 TEC 和温度传感器，通过热控驱动电路实现控

温，精度为 ±0.1 ℃。

3　测试结果与分析

3.1　峰值波长和平均功率

系统测得的输出闲频光峰值波长为 3.705 μm，谱线如图 2 所示，此时重复频率为 55.56 kHz，脉冲宽度为 120.32 ns。泵浦光与闲频光的功率曲线如图 3 所示。由图 3 可知，闲频光输出平均功率的增长随泵浦光功率的增长呈线性趋势，说明随泵浦功率的继续增加，闲频光的输出功率依然会增大，直到趋于饱和，达到最大值。实验中，OPO 的泵浦功率最高加到 14.1 W，获得 1.78 W 闲频光输出，光光转换效率为 12.6%。

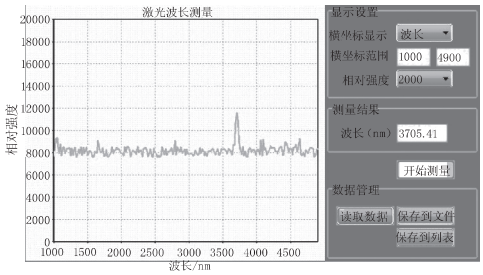


图 2　闲频光谱线图

Fig. 2 Spectra of idler light

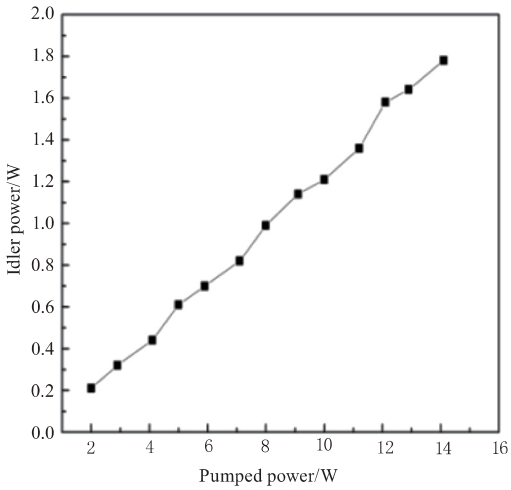


图 3　功率增长曲线图

Fig. 3 Idler output power versus pump power

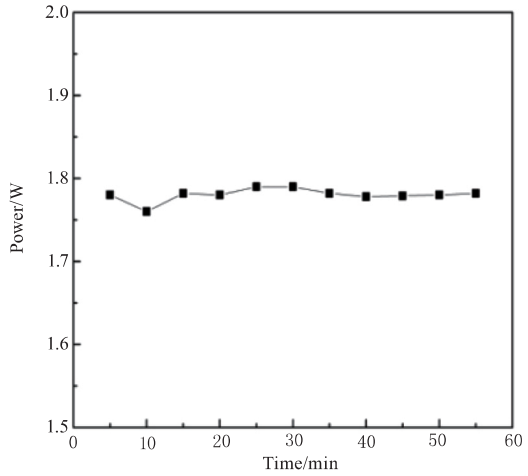
3.2　发散角

实验采用刀口法测量了闲频光的发散角，大约为 9 mrad，原因在于 PPMgLN 晶体中的泵浦光光斑直径较小，造成输出闲频光的发散程度相对较大。为此，设计了两级望远镜型扩束镜组进行扩束，第一级进行 3 倍扩束，将中红外激光发散角压缩至约 3 mrad，再通过第二级 3 倍扩束，最终将中红外激光发散角压缩至 1 mrad 以下。通过调节第二级扩束镜组的间距可实现对发散角在 1 ~ 5 mrad 之间的连续调谐，可用于测量、目标指示等特殊行业的应用需求。

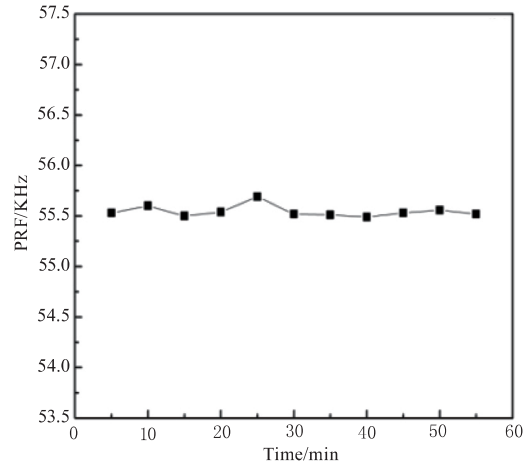
3.3　稳定性

工程应用中，对激光器的稳定性有严格的要求。为了检验系统的稳定性，实验对输出功率、重复频率和峰值波长进行了持续监测，绘制的时间曲线如图 4(a)、(b) 和(c) 所示。根据 GB/T 15175 – 2012 中输出功率不稳定度的计算公式(2)（ΔP 表示监测时间内最大与最小功率的差值），计算得到系统的输出功率不稳定度优于 1.5%。比照输出功率不稳定度的计算方式，得到重复频率的不稳定度优于 0.2%。由图 4(c) 可知，闲频光峰值波长平均值为 3.705 μm，最大值和最小值的差为 4 nm，即峰值波长为 3.705 ±0.002 μm。

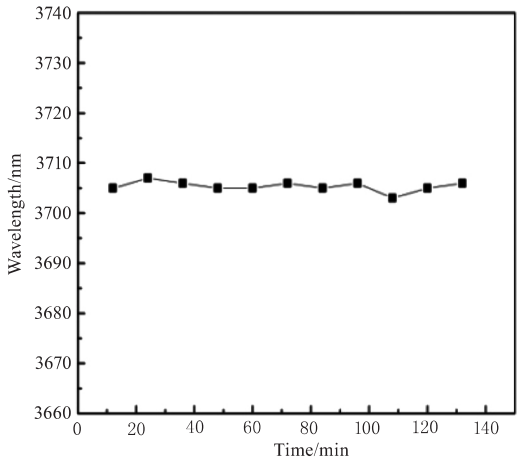
$$S = \pm \frac{\Delta P}{2P} \times 100\% \tag{2}$$



(a) 输出功率



(b) 重复频率



(c) 峰值波长波动曲线图

图 4 输出功率、重复频率、峰值波长波动曲线图

Fig. 4 Fluctuant curves of output power, repetition rate and peak wavelength

在 2 小时的时间间隔内，软件界面显示粘贴在激光箱体内部和 OPO 模块热沉底部的温度传感器一直维持在工作环境温度左右(22.1 ℃)和预设值 75 ℃，波动曲线如图 5 所示。综合系统输出功率、重复频率和峰值波长波动曲线以及温度传感器反馈的数据可知，系统采用多种散热技术相结合的方式能够实现对泵浦模块产生的废热的有效管理，同时实现对 PPMgLN 晶体的精确控温，从而获得性能稳定的中红外激光输出。

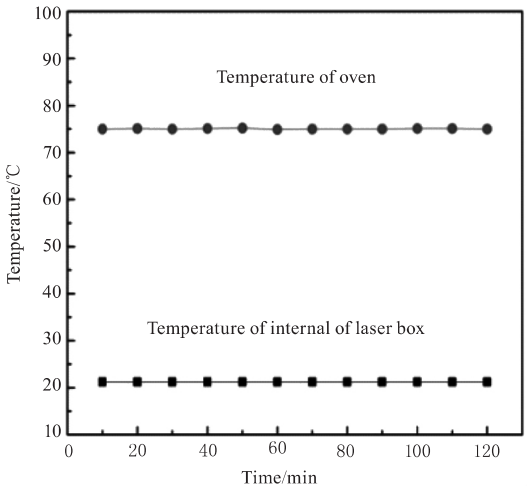


图 5 激光器箱体内部和恒温炉温度的波动曲线

Fig. 5 Temperature of internal of laser box and oven versus time

4 结 论

本文所报道的基于工程应用的紧凑型光参量振荡器，采用半导体制冷、强制气体对流冷却和热管导热技术相结合的方式，对泵浦模块泵浦过程中产生的废热进行管理，同时采用高精度恒温炉对 OPO 模块精确控温，最终监测系统输出中红外激光的峰值波长漂移量、输出功率和重复频率的不稳定度以及激光器箱体内和恒温炉的温度值表明，废热管理和温控的措施是有效且可靠的。随着控温系统精度、非线性晶体生长工艺和中红外镀膜等技术的提高，可以预见未来中红外激光器的整体性能会越来越好。

参考文献:

[1] SU Ning, ZHANG Mao, REN Gang, et al. Progress and applications of 3 ~ 5 μm optical parametric oscillator [J]. Optical Technique, 2013, 39(4): 359 – 364. (in Chinese)
苏宁，张茂，任钢，等. 3 ~ 5 μm 光参量振荡器研究进展及其应用 [J]. 光学技术，2013，39(4)：359 – 364.

[2] ZHAO Jiaqun. Study on mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator technique based on MgO: PPLN crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 1 – 4. (in Chinese)
赵家群. 基于 MgO: PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011：1 – 4.

[3] Dong Yantao, Zhang Xiang, Liu Chun, et al. High-repetition-rate mid-infrared optical oscillator based on PPMgOLN [J]. Solid State and Liquid Lasers, 2012, 22(10): 1459 – 1462.

[4] Peng Y, Wei X, Luo X, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN [J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 49 – 51.

[5] Saikawa J, Fujii M, Ishizuki H, et al. 52 mJ narrow-bandwidth degenerated optical parametric system with a large-aperture periodically poled MgO: $LiNbO_3$ device [J]. Optics Letters, 2006, 31(21): 3149 – 3151.

[6] Ishizuki H, Taira T. Half-joule output optical-parametric oscillation by using 10-mm-thick periodically poled Mg-doped congruent $LiNbO_3$ [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20002-20010.

[7] ZHANG Kuo, YU Deyang, HE Yang, et al. Analysis on cooling performance of compact mid-infrared solid state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 43(3): 20 – 25. (in Chinese)
张阔，于德洋，何洋，等. 紧凑型中红外固体激光器散热性能分析 [J]. 中国激光，2017，44(3)：20 – 25.

[8] CHEN Yong, GUO Yanlong, HE Zhizhu, et al. Application research of phase change material heat removal technology for compact high efficiency diode pumped laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102005. (in Chinese)
陈勇，郭延龙，何志祝，等. 相变散热技术在小型高效半导体抽运激光器中的应用研究 [J]. 中国激光，2016，43(1)：0102005.

[9] SU Hong, RUAN Shuangchen. Widely tunable mid-infrared generation in a quasi-phase matched optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33: 219 – 221. (in Chinese)
苏红，阮双琛. 准相位匹配光参量振荡器中宽调谐中红外光的产生 [J]. 中国激光，2006，33：219 – 221.