

文章编号: 1672-8785(2015)02-0019-06

基于 PPMgLN 晶体的高功率可调谐 中红外光学参量振荡器

李晓芹 张 兵 曹祥杰 郭占斌 冯 光

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘 要: 报道了一种基于周期极化掺氧化镁铌酸锂 (MgO-doped Lithium Niobate, PP-MgLN) 晶体的高效可调谐中红外光学参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO)。采用自行设计的激光二极管 (Laser Diode, LD) 双端泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器作为 OPO 的泵浦源来泵浦 PPMgLN 晶体, 实现了准相位匹配 (Quasi-Phase Matching, QPM) 单谐振中红外激光输出。当泵浦功率为 14.37 W 时, 获得了平均功率为 2.39 W 的闲频光输出, 其转换效率为 16.63%。通过调节 PPMgLN 晶体的极化周期, 可以实现闲频光在 3.41 ~ 3.97 μm 内的波长调谐。

关键词: 中红外激光器; 光学参量振荡; PPMgLN 晶体; 可调谐

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.02.004

Tunable High-power Mid-infrared Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN Crystal

LI Xiao-qin, ZHANG Bing, CAO Xiang-jie, GUO Zhan-bin, FENG Guang

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology
Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: A high efficient tunable mid-infrared Optical Parametric Oscillator (OPO) based on a periodically poled MgO-doped lithium niobate (PPMgLN) crystal is reported. By using a self-designed Laser Diode (LD) double-end-pumped optoacoustic Q-switched Nd:YVO₄ laser as the pumping source of the OPO, the quasi-phase matched single resonant mid-infrared laser output is achieved. When the pumping source has its power of 14.37 W, the idler light output with an average power of 2.39 W is obtained. Its conversion efficiency is 16.63%. By adjusting the period of the PPMgLN crystal, the wavelength of the idler light can be tuned in the range from 3.41 μm to 3.97 μm .

Key words: mid-infrared laser; optical parametric oscillator; PPMgLN crystal; tunable

0 引言

中红外激光波长处于大气窗口内, 在环境监测、遥感、激光雷达、光谱分析以及光电对抗等领域具有广泛的应用前景^[1]。中红外激光的

获取手段主要有传统的铅盐半导体激光器、CO₂ 气体激光器倍频、量子级联半导体激光器、差频产生 (Difference Frequency Generation, DFG) 技术以及光参量振荡技术。其中, 铅盐半导体激光器

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 李晓芹 (1982-), 女, 河南许昌人, 硕士, 工程师, 主要从事激光技术和光电对抗等方面的研究。

E-mail: lizi0911@163.com

需要在液氮下工作; CO_2 气体激光器倍频体积大; 量子级联半导体激光器和 DFG 输出的激光功率较低。而基于非线性光学转换的 OPO 可以在室温下实现中红外波段的大功率全固态激光输出, 具有调谐范围宽、转换效率高、结构简单紧凑等优点^[2-4], 现已成为国内外研究的热点。

光学参量振荡的相位匹配方包括双折射相位匹配 (Birefringent Phase Matching, BPM) 和 QPM 两种。与 BPM 相比, QPM 可利用晶体材料较大的非线性系数, 且没有光走离效应和匹配角限制, 参量光的相互作用距离长, 具有阈值低、转换效率高等优点, 非常有利于 OPO 的运行。QPM 是通过非线性晶体极化率的周期性调制来补偿光参量过程中由于折射率色散造成的抽运光与参量光之间的位相失配的。因此可以人为地根据晶体的折射率色散来设计极化周期, 并采用一块晶体即实现多个准相位匹配过程, 从而完成多个波长的调谐输出。

本文采用自行设计的 LD 双端泵浦 Nd:YVO_4 声光调 Q 激光器作为泵浦源来泵浦 PPMgLN 晶体, 并在室温下利用单谐振腔型结构实现了中红外激光输出。当泵浦功率为 14.37 W 时, 我们获得了平均功率为 2.39 W 的闲频光输出; 闲频光的波长为 $3.41 \mu\text{m}$, 转换效率为 16.63%。通过调节 PPMgLN 晶体的极化周期, 可以实现闲频光在 $3.41 \sim 3.97 \mu\text{m}$ 内的波长调谐。

1 理论分析

光学参量振荡属于典型的非线性三波混频过程, 其能量交换只发生在相互作用的光波之间。其中非线性介质的作用仅是促成光场之间的相互作用, 而介质本身则不参加能量交换。PPMgLN 晶体是光学参量振荡中最常用的一种非线性晶体^[5], 其透光波段为 $330 \sim 5500 \text{ nm}$, 抗损伤阈值比未掺 MgO 的铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体约高 2 个数量级。该晶体的二阶非线性系数 d_{33} 为 27.4 pm/V 。在 QPM-OPO 过程中, 3 束激光光束以 $e \rightarrow e+e$ 的匹配方式相互作用。光学参

量振荡的三波相互作用过程满足能量守恒和动量守恒公式:

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

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\Lambda} \quad (2)$$

式中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 分别为泵浦光、信号光和闲频光的波长; n_p 、 n_s 和 n_i 分别为泵浦光、信号光和闲频光的折射率; Λ 为光栅周期; PPMgLN 晶体 e 光的塞耳迈耶尔方程满足:

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (3)$$

式中, $f = (T - 24.5^\circ\text{C}) \cdot (T + 570.82^\circ\text{C})$; a_i 和 b_i 的取值可参考文献 [6-7]。 λ_p 取 1064 nm , 在室温条件下, 由式 (1) ~ 式 (3) 可以拟合出输出波长与晶体极化周期的关系曲线 (见图 1)。

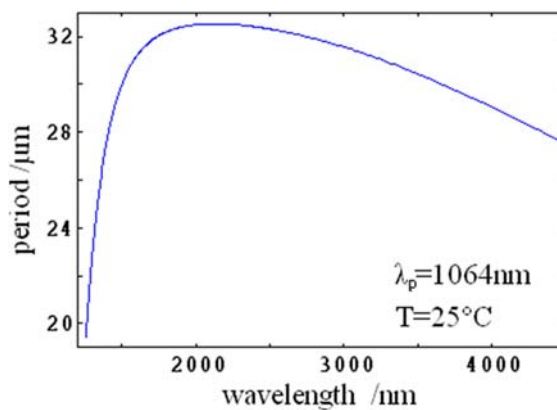


图 1 OPO 的输出波长与晶体极化周期的关系曲线

2 实验装置

OPO 的泵浦源采用自行设计的声光调 Q Nd:YVO_4 激光器, 其实验装置见图 2。该激光器采用双端泵浦的 U 型腔结构, 其中 LD1 和 LD2 为光纤耦合输出, 光纤的芯径直径为 $400 \mu\text{m}$, 数值孔径 NA 为 0.22, 中心波长为 878.6 nm , 最高输出功率为 50 W。光纤耦合输出的泵浦光经过两个平凸透镜 (L1 和 L4 的焦距为 36 mm , L2 和 L3 的焦距为 75 mm) 整形后, 注入到 Nd:YVO_4 晶体中。为减小热效应, Nd:YVO_4 采用键合晶体,

其尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times (2+16+2)\text{ mm}$ 。M1 和 M2 为 45° 二色镜, 镀有在 878.6 nm 处高透而在 1064 nm 处高反的膜; M3 为平凸镜, 其曲率半径 R 为 3 m , 镀有在 1064 nm 处高反的膜; M4 为输出平镜, 镀有在 1064 nm 处部分透射的膜; M1、M2、M3 和 M4 构成激光谐振腔; 声光调 Q 晶体的型号为 QS41-7, 驱动频率为 41 MHz , 最大驱动功率为 20 W ; Nd:YVO_4 和声光调 Q 晶体采用 TEC 制冷。

OPO 采用单谐振双程泵浦结构。如图 2 所示, 波长为 1064 nm 的输出激光经 45° 平面反射镜 M5 反射后被输入到 PPMgLN 晶体中; PPMgLN 晶体中 MgO 的摩尔掺杂浓度为 5% , 其尺寸为 $10\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ (通光方向长度为 50 mm), 且有 4 个极化周期, 分别为 $29\text{ }\mu\text{m}$ 、 $29.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30.5\text{ }\mu\text{m}$; 每个周期的宽度为 2 mm ; 晶体两端面镀有 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.4 \sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 增

透膜; 晶体固定在紫铜热沉上; 紫铜热沉置于光学调整架上, 便于光路调节和晶体极化周期位置的调整。PPMgLN 晶体在室温下工作; M6 和 M7 构成 OPO 谐振腔, 采用平-平腔结构; M6 镀有在 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 处高透而在 $1.4 \sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 处高反的膜; M7 镀有在 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.4 \sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 处高反而在 $3 \sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 处高透的介质膜。

3 实验结果与分析

本文首先研究了 LD 双端泵浦 Nd:YVO_4 声光调 Q 激光器的输出特性, 然后用图 2 所示的实验装置将声光晶体的重复频率设定为 40 kHz , 并将 Nd:YVO_4 晶体和声光晶体的温度控制在 20°C , 同时调节 LD1 和 LD2 的工作电流。实验发现, 激光器的阈值功率为 6.3 W ; 随着双端 LD 工作电流的不断增加, 激光输出功率逐渐增大, 其输出特性曲线见图 3。其中, 图 3(a) 所示为

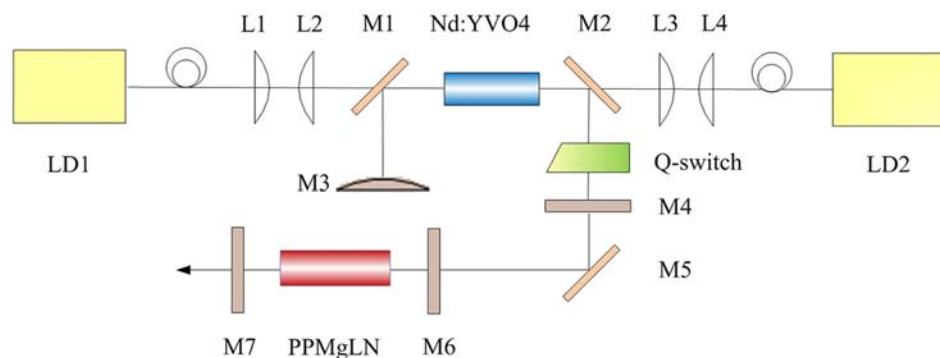
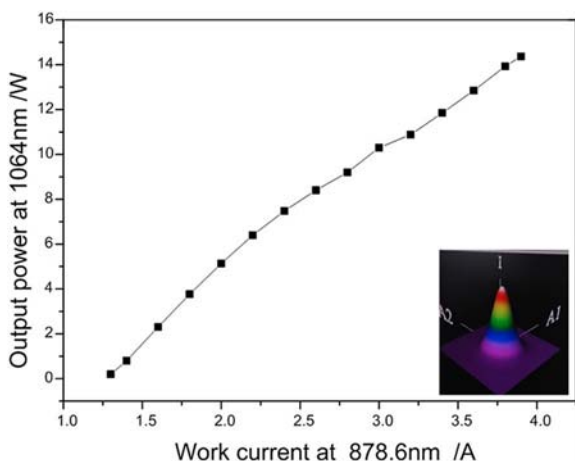
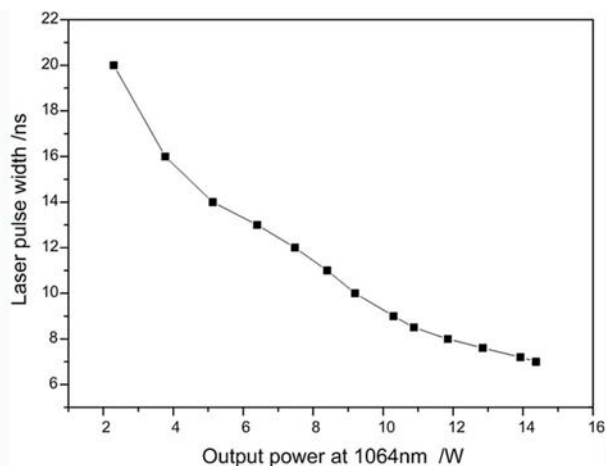


图 2 OPO 实验装置的示意图



(a) P-I 曲线



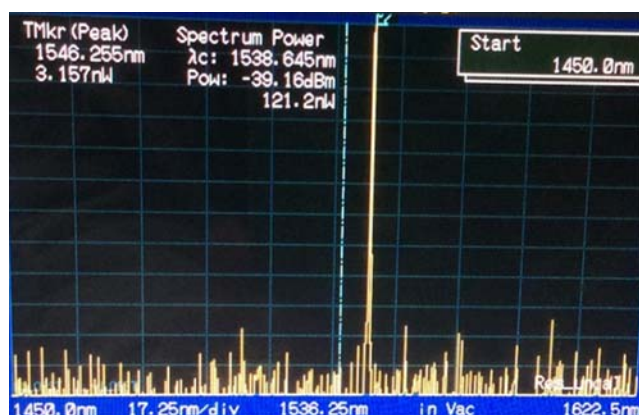
(b) 激光脉宽与输出功率关系曲线

图 3 双端泵浦 Nd:YVO_4 激光器的输出特性曲线

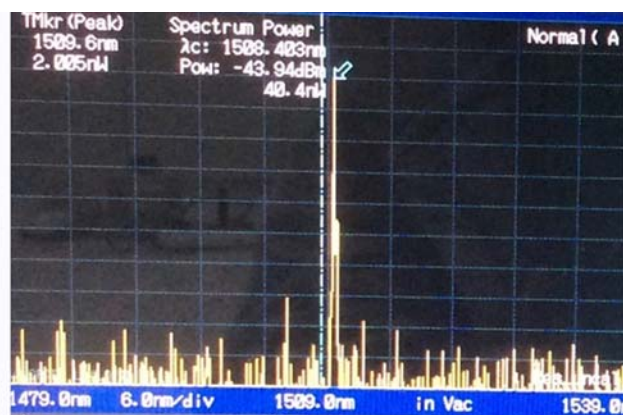
1064 nm 激光输出功率与双端泵浦 LD 工作电流的关系曲线。可以看出, 当双端 LD 电流为 3.9 A 时, 实现了 1064 nm 激光的最大输出 14.37 W。此时, 光-光效率为 33.4%, 输出光斑的直径为 $0.67 \mu\text{m}$ 。图中光斑为采用光束质量分析仪测得的三维光斑分布图。图 3(b) 所示为 1064 nm 激光脉宽与输出功率的关系曲线。当输出功率较小时, 脉宽较宽; 随着激光功率的不断增大, 脉宽逐渐变窄; 当激光功率为 14.37 W 时, 激光脉宽为 7 ns。

在 LD 双端泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器的输出特性的基础上, 本文开展了单谐振 OPO 研究。如图 2 所示, 我们在 45° 反射镜 M5 后插入了 OPO 模块。为了避免 1064 nm 激光返回并对系统产生影响, 调节 OPO 的输出腔镜 M7, 使其与泵浦光路之间存在一个微小夹角; 并在腔镜 M7 的后面添加一片 $1.064 \mu\text{m}$ 、 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$

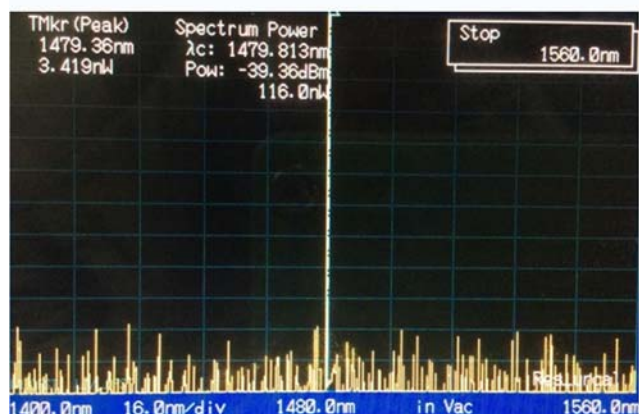
高反滤光片。声光晶体的重频设定为 40 kHz, PPMgLN 晶体的极化周期设定为 $30.5 \mu\text{m}$ 。调节双端 LD 的工作电流, 并通过功率计测试中红外激光的输出功率。当泵浦功率为 3.77 W 时, 输出激光的功率为 0.119 W; 若增加泵浦功率, 当中红外激光的输出功率为 0.5 W 时, 测试中红外激光波长; 移开滤光片, 并通过光纤将输出激光耦合到光纤光谱仪 (型号为 MS9710C, 响应波段为 $0.6 \mu\text{m} \sim 1.75 \mu\text{m}$) 中, 最后测得输出激光光谱的中心波长为 1546.255 nm, 如图 4(a) 所示。该波长为 OPO 产生的信号光波长。根据式 (1) 可以计算出对应的闲频光波长为 $3.41 \mu\text{m}$ 。随后通过调节 PPMgLN 晶体的极化周期, 并采用光纤光谱仪测得了 1509.6 nm、1479.36 nm 和 1453.36 nm 三个波长的信号光输出。如图 4(b)、图 4(c) 和图 4(d) 所示, 其对应的闲频光波长分别为 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $3.79 \mu\text{m}$ 和 $3.97 \mu\text{m}$ 。



(a) OPO 的输出信号光波长 1



(b) OPO 的输出信号光波长 2



(c) OPO 的输出信号光波长 3



(d) OPO 的输出信号光波长 4

图 4 OPO 输出信号光的光谱图

本文分别在 $3.41\ \mu\text{m}$ 、 $3.6\ \mu\text{m}$ 、 $3.79\ \mu\text{m}$ 和 $3.97\ \mu\text{m}$ 四个波长处测试了中红外激光的输出特性。在 OPO 模块后端添加 $1.064\ \mu\text{m}$ 、 $1.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 高反滤光片, 并逐步调节双端 LD 的工作电流。当 PPMgLN 晶体的极化周期分别为 $30.5\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $29.5\ \mu\text{m}$ 、 $29\ \mu\text{m}$ 时, 测试了 OPO 的闲频光输出功率随 $1064\ \text{nm}$ 泵浦激光的变化曲线。如图 5 所示, 当泵浦功率为 $14.37\ \text{W}$ 时, $3.41\ \mu\text{m}$ 处的输出功率最大 ($2.39\ \text{W}$), 此时闲频光的转换效率为 16.63% ; $3.97\ \mu\text{m}$ 处的输出功率最小 ($1.74\ \text{W}$)。从图 5 中可以看出, $3.41\ \mu\text{m}$ 和 $3.6\ \mu\text{m}$ 处的工作区域未达到饱和, 因此随着泵浦光功率的不断提高, 中红外激光的输出功率也将会有所提高。

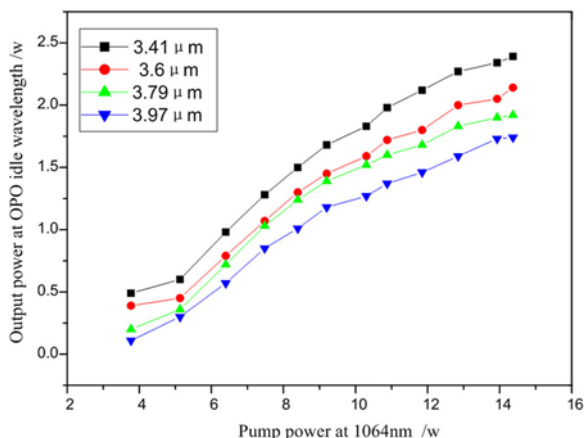


图 5 OPO 闲频光的输出特征曲线

此外, 本文还研究了重频对中红外激光输出功率的影响。设定双端 LD 的工作电流为 $3\ \text{A}$, PPMgLN 晶体的极化周期为 $30.5\ \mu\text{m}$ 。然后改变声光晶体的重频, 并记录不同重频下中红外激光的输出功率, 其特征曲线见图 6。可以看出, 随着重频的不断增加, 闲频光输出功率呈线性增加; 但在 $90\ \text{kHz}$ 之后, 输出功率下降。因为在 LD 电流不变时, $1064\ \text{nm}$ 激光输出功率会随重频的增加而增加; 在 $90\ \text{kHz}$ 之后, 功率的增加幅度减小, 同时激光脉宽会随重频的增加而变宽, 所以泵浦激光的峰值功率在 $90\ \text{kHz}$ 之后会变小。这会影响 OPO 的转换效率, 因此闲频光的输出功率也会随之减小。

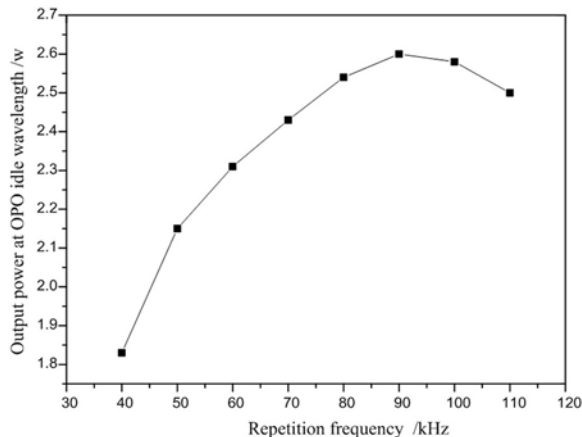


图 6 OPO 的闲频光输出功率与重频的关系曲线

最后, 我们测试了中红外激光输出功率的不稳定度。设定 LD 的工作电流为 $3\ \text{A}$, 重复频率为 $40\ \text{kHz}$, PPMgLN 晶体的极化周期为 $30.5\ \mu\text{m}$ 。在 $40\ \text{min}$ 内每隔 $1\ \text{min}$ 记录 1 个功率值, 如图 7 所示。其中, 最大功率为 $1.552\ \text{W}$, 最小功率为 $1.47\ \text{W}$, 平均功率为 $1.5267\ \text{W}$, 闲频光的输出功率变化了 $0.082\ \text{W}$, 功率不稳定度为 $\pm 2.69\%$ 。图 7 所示为在距腔镜 M7 约 $85\ \text{mm}$ 处采用光束质量分析仪测得的闲频光光斑形状。可以看出, 中红外激光的近场能量分布较好。

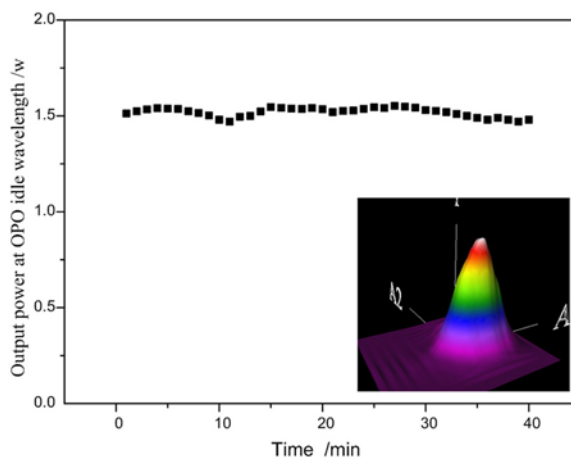


图 7 中红外激光在 $40\ \text{min}$ 内的功率稳定性和光斑分布图

4 结束语

通过用自行设计的 LD 双端泵浦 Nd:YVO_4 调 Q 激光器作为泵浦源对 PPMgLN 晶体进行泵浦, 实现了 QPM 单谐振光学参量振荡器的输出。当泵浦功率为 $14.37\ \text{W}$ 、重频为 $40\ \text{kHz}$ 时,

输出中红外激光的功率为 2.39 W, 闲频光的转换效率为 16.63%。通过调节 PPMgLN 晶体的极化周期, 可以实现闲频光在 $3.41 \sim 3.97 \mu\text{m}$ 内的波长调谐。

参考文献

- [1] 卜进田, 聂劲松, 孙晓泉. 中红外激光技术及其进展 [J]. **红外与激光工程**, 2006, **35**(S3): 188–193.
- [2] Lin H Y, Tan H M, Miao J G, et al. Extra-cavity, Widely Tunable, Continuous Wave MgO-doped PPLN Optical Parametric Oscillator Pumped with a Nd:YVO₄ Laser [J]. *Optical Materials*, 2009, **32**: 257–260.
- [3] Gross P, Klein M E, Walde T, et al. Fiber-laser-pumped Continuous-wave Singly Resonant Optical Parametric Oscillator [J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(6): 418–420.

- [4] Zhao P, Zhang B G, Li E, et al. Experimental Study on a High Conversion Efficiency, Low Threshold, High-repetition-rate Periodically Poled Lithium Niobate Optical Parametric Generator [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(16): 7224–7229.
- [5] 林洪沂, 孟宪国, 黄晓桦, 等. 中红外宽调谐连续 Nd:YVO₄/PPMgLN 光参量振荡器研究 [J]. **红外**, 2013, **34**(4): 39–42.
- [6] Li B X, Xu S. Tunable Continuous-wave Nd:YVO₄/MgO:PPLN Optical Parametric Oscillator Generating Mid-infrared Laser [J]. *Acta Photonica*, 2013, **42**(10): 1152–1157.
- [7] Paul O, Quosig A, Bauer T, et al. Temperature Dependent Sellmeier Equation in the MIR for the Extraordinary Refractive Index n_e of 5% MgO Doped Congruent LiNbO₃ [J]. *Appl Phys B*, 2007, **86**(1): 111–115.

(上接第 12 页)

的增加会明显降低激光脉冲到达海平面的能量, 使角度分布产生弥散化, 且 FWHM 和光斑尺寸增大。但是当云达到一定厚度时, 角度分布和光斑尺寸趋于稳定; 云层厚度的继续增加对其没有明显影响。相比较而言, 云高度对光斑尺寸影响较大, 云厚度对能量和角度分布影响较大。

参考文献

- [1] Arnon S, Sadot D, Kopeika N S. Analysis of Optical Pulse Distortion through Clouds for Satellite to Earth Adaptive Optical Communication [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, **41**(8): 1591–1605.
- [2] Bucher E A. Computer-simulation of Light Pulse Propagation for Communication through Thick Clouds [J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(10): 2391–2400.
- [3] Bucher E A, Lerner R M. Experiments on Light Pulse Communication and Propagation through Atmospheric Clouds [J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(10): 2401–2414.
- [4] Mooradian G C, Geller M. Temporal and Angular Spreading of Blue-green Pulses in Clouds [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(9): 1572–1577.

- [5] Ciervo A P. Propagation through Optically Thick Media [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(30): 7137–7148.
- [6] 狄凌峰, 王沛, 鲁拥华, 等. 近地大气 532 nm 激光散射的实验与计算 [J]. **量子电子学报**, 2005, **22**(6): 960–964.
- [7] 甄洁, 刘维亭. 蓝绿激光下行通信云层信道特性研究 [J]. **华东船舶工业学院学报 (自然科学版)**, 2004, **18**(6): 47–50.
- [8] 詹恩奇. 光在大气和海水信道的传输性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [9] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(5): 831–844.
- [10] Hajjarian Z, Kavehrad M, Fadlullah J. Spatially Multiplexed Multi-input-multi-output Optical Imaging System in a Turbid, Turbulent Atmosphere [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(9): 1528–1538.
- [11] Toubanc D. Henyey-Greenstein and Mie Phase Functions in Monte Carlo Radiative Transfer Computations [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(18): 3270–3274.
- [12] Henyey L G, Greenstein J L. Diffuse Radiation in the Galaxy [J]. *Astrophysical Journal*, 1941, **93**(1): 70–83.