

# 基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的中红外同步抽运皮秒光参量振荡器

刘 通 汪晓波 刘 磊 李 霄 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 采用全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构皮秒脉冲激光器作为抽运源,搭建同步抽运光参量振荡器(OPO),实现了中红外波段的皮秒脉冲激光输出。光纤激光器输出脉冲重复频率为 52 MHz,脉宽约 20 ps,中心波长 1064 nm。使用一块长 50 mm、极化光栅周期为 30.5  $\mu\text{m}$  的周期极化掺镁铌酸锂(PPMgLN)作为非线性频率转换晶体,采用信号光单谐振腔结构,在抽运功率 5.2 W 时获得了平均功率为 0.67 W 的闲频光输出,中红外参量转换效率为 12.9%,斜率效率达 14.5%。通过改变晶体温度的方式实现了输出波长在 1.544~1.608  $\mu\text{m}$ (信号光)和 3.15~3.42  $\mu\text{m}$ (闲频光)范围内的调谐。从腔长同步匹配的角度讨论了该 OPO 系统的输出稳定性。

**关键词** 非线性光学;光参量振荡器;周期极化掺镁铌酸锂;中红外;皮秒;光纤激光器

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1202003

## Mid-Infrared Synchronously Pumped Picosecond Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN Crystal

Liu Tong Wang Xiaobo Liu Lei Li Xiao Hou Jing

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A picosecond mid-infrared optical parametric oscillator (OPO) synchronously pumped by an Yb-doped fiber laser is reported. The OPO is pumped by an all fiber master oscillator power amplifier (MOPA) centered at 1064 nm picosecond pulses with duration of 20 ps at a repetition rate of 52 MHz. A 50 mm periodically poled MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) with a poled grating period of 30.5  $\mu\text{m}$  is used as the nonlinear crystal and a single resonant cavity is adopted. At room temperature, 0.67 W average idler is obtained at pump power of 5.2 W with the conversion efficiency from pump to idler being 12.9% and the slope efficiency being 14.5%. By controlling the temperature of PPMgLN crystal, the wavelength tuning range can cover 1.544~1.608  $\mu\text{m}$  (signal) and 3.15~3.43  $\mu\text{m}$  (idler). Additionally, the stability of this OPO system is discussed.

**Key words** nonlinear optics; optical parametric oscillator; PPMgLN; mid-infrared; picosecond; fiber laser

**OCIS codes** 190.4410; 190.4970; 130.3060; 140.7090

### 1 引 言

同步抽运光参量振荡器(OPO)是产生可调谐超短激光脉冲的重要方法,能够达到传统锁模激光器无法覆盖的光谱范围。利用同步抽运 OPO 产生中红外波段宽调谐范围的皮秒和飞秒脉冲,在非线

性光谱学、气体监测、材料表征和处理等领域有广泛的应用前景<sup>[1~3]</sup>。与飞秒 OPO 相比,皮秒光参量振荡器不仅能在短脉冲宽度和窄谱线宽度之间取得平衡,而且具有实现高平均功率输出的潜力,因此在很多应用中占有优势。

收稿日期: 2011-07-30; 收到修改稿日期: 2011-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61077076,61007037,10904173)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-142)资助课题。

作者简介: 刘 通(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光与非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: liutong719@163.com

导师简介: 侯 静(1975—),女,博士,研究员,主要从事光纤激光相干合成技术、光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: houjing25@sina.com

皮秒 OPO 的发展主要依赖两个方面的因素：高质量的非线性频率转换晶体和性能优良的激光器抽运源。近年来，准相位匹配技术得到迅速发展，周期极化掺镁铌酸锂晶体 (PPMgLN) 因具有大的非线性系数和高损伤阈值等优良特性成为最常用的中红外准相位匹配晶体，基于 PPMgLN 晶体的 OPO 已经有很多报道<sup>[4~8]</sup>。另一方面，皮秒 OPO 的发展还依赖于高功率的锁模激光器抽运源。以前的皮秒 OPO 系统大多用锁模钛宝石激光器等块状固体激光器作为抽运源，但它们普遍具有体积大、结构复杂、稳定性差等缺点<sup>[9~11]</sup>。光纤激光器具有结构紧凑和效率高等优点，而且能够在高功率输出的同时保持高光束质量，用光纤激光器作为抽运源将使 OPO 的效率和输出稳定性得到很大提高。随着高功率光纤激光器的发展，近年来已有不少基于光纤激光器抽运源的 OPO 系统的报道<sup>[12~14]</sup>。2010 年，Kokabee 等<sup>[15]</sup>报道了一个高功率同步抽运皮秒 OPO，抽运源为掺镱光纤激光器，抽运波长 1064 nm，获得了总平均功率达 11.7 W 的近中红外输出，在 3.1  $\mu\text{m}$  处闲频光功率最高可达 4.9 W。国内对于中红外参量振荡器的研究很多，但大多关注连续和纳秒脉冲 OPO，对于超短脉冲同步抽运参量振荡的相关报道较少<sup>[6~8]</sup>。1991 年，张家奎等<sup>[16]</sup>采用锁模 YAG 激光器的二次谐波 532 nm 光脉冲序列作为同步抽运参量振荡器的抽运源，抽运两块 BBO 晶体，实现了调谐范围 650~2506 nm 的皮秒参量振荡。2007 年，Zhu 等<sup>[17]</sup>报道了一个同步抽运飞秒 OPO，用锁模钛宝石激光器抽运 PPMgLN 实现，信号光和闲频光调谐范围分别为 1100~1300 nm 和 2080~2930 nm。

本文报道了使用主振荡功率放大 (MOPA) 结构皮秒掺镱光纤激光器抽运 PPMgLN 实现的同步抽运 OPO。光纤激光器输出中心波长为 1064 nm 的皮秒脉冲，脉冲宽度约 20 ps，重复频率为 52 MHz。使用该激光器抽运一块周期为 30.5  $\mu\text{m}$  的 PPMgLN 晶体，通过温度调谐获得了波长范围 3.15~3.42  $\mu\text{m}$  的皮秒中红外输出，在室温条件下 3.42  $\mu\text{m}$  闲频光平均功率达 670 mW。据我们所知，这是国内首次采用光纤激光抽运 OPO 的方法产生该波段的皮秒脉冲激光。

## 2 实验装置

OPO 实验装置如图 1 所示。抽运源为前期搭建的全光纤 MOPA 结构皮秒脉冲光纤激光器<sup>[18]</sup>，输出光中心波长为 1064 nm，脉冲宽度约 20 ps，重

复频率为 52 MHz。用一个聚焦透镜将抽运光束聚焦到晶体中心，实际测量焦点处光斑半径约 50  $\mu\text{m}$ 。实验中使用的 PPMgLN 晶体长度为 50 mm，厚度 1 mm，极化周期为 30.5  $\mu\text{m}$ ，两端面抛光后均镀有对抽运光 (1064 nm)、信号光 (1.4~1.7  $\mu\text{m}$ ) 和闲频光 (3~4  $\mu\text{m}$ ) 的增透膜，晶体置于一个温控炉内，使用该温控炉可以对晶体实现精度为 0.1  $^{\circ}\text{C}$  的温度控制。谐振腔为四镜线型腔结构，由两个凹面镜 (M1、M2) 和两个平面镜 (M3、M4) 组成。凹面镜曲率半径为 100 mm，由于普通玻璃材料对中红外闲频光有强烈吸收，使用  $\text{CaF}_2$  作为其基质材料。该 OPO 采用信号光单谐振结构，各腔镜表面镀膜对信号光高反、对闲频光和抽运光高透。其中 M2 为输出耦合镜，输出的参量激光中包含信号光、闲频光和未经消耗的剩余抽运光，经  $\text{CaF}_2$  镜片分光后分别对闲频光的功率和信号光的光谱进行测量。在设计谐振腔时，除了要考虑稳腔条件和相位匹配外，还要满足同步抽运条件，才能保证参量光持续得到增益<sup>[19]</sup>，因此需要合理确定 OPO 谐振腔的长度，使参量振荡器的腔长与抽运激光器腔长一致或成倍数关系。为了兼顾以上条件，选取 OPO 的腔长为抽运源腔长的 1/5，因此得到的信号光脉冲重复频率是抽运光重复频率的 5 倍，而闲频光脉冲重复频率仍与抽运光相同。实验中，腔长的同步匹配通过精细调节高反镜 M4 的位置实现。

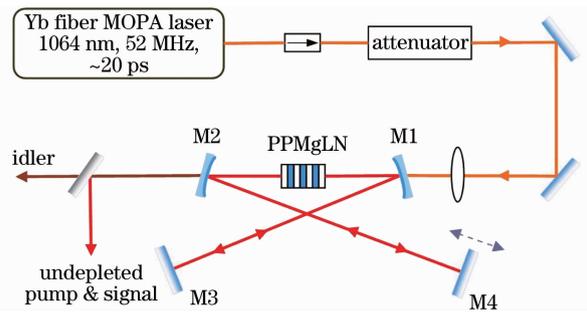


图 1 皮秒 OPO 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the picosecond OPO

## 3 实验结果和讨论

图 2 所示为光纤激光器在输出平均功率为 10.5 W 时的光谱。谱线中心位于 1064 nm，光谱形状大致为双峰结构，两峰相距 4 nm，每个峰的宽度 (半峰全宽, FWHM) 约 1 nm。由于搭建的光纤激光器不具有保偏特性，而高效的参量转换要求入射抽运光为线偏振光，在实验中通过偏振分光元件选择特定的偏振方向对 OPO 进行抽运，因此 OPO 实际利

用的抽运光功率约为光纤激光器输出功率的一半。通过仔细调整各腔镜的位置,实现了腔长同步匹配,在室温下获得了参量振荡输出。中红外闲频光输出功率随入射抽运光功率的变化曲线如图 3 所示, $\eta_{\text{slope}}$ 为 OPO 闲频光输出的斜率效率。图中的实线是根据实验数据点进行直线拟合得到的。该图显示,参量振荡的阈值约为 0.5 W,抽运光功率超过阈值后,闲频光输出功率随抽运光功率提高而线性增加。在入射抽运光功率为 5.2 W 时,得到了 0.67 W 的中红外闲频光,从抽运光到闲频光的转换效率为 12.9%,斜率效率约为 14.5%。从输出曲线中没有观察到功率饱和现象,说明输出功率还有进一步提升的空间。

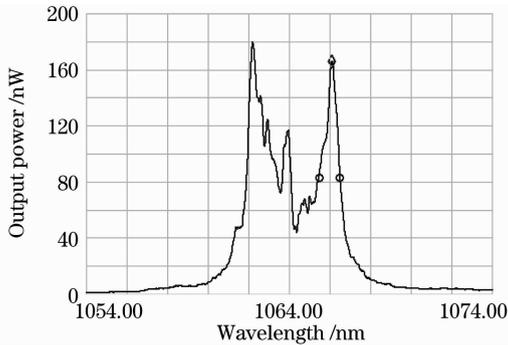


图 2 光纤激光器输出平均功率 10.5 W 时的光谱  
Fig. 2 Spectrum of the fiber laser output at 10.5 W average power

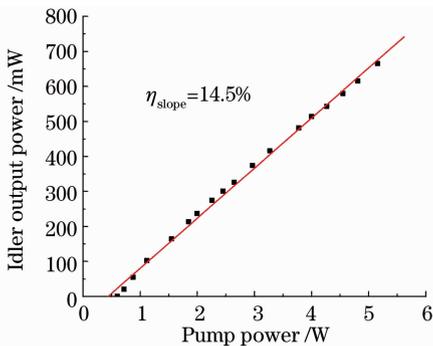


图 3 闲频光输出功率随入射抽运光功率的变化曲线  
Fig. 3 Idler output power versus incident pump power

实验中观察到光纤激光器在高功率下出现比较严重的光谱展宽,这主要是由于光纤激光器峰值功率很高而且放大级所用光纤较长,在高功率下光纤中的非线性效应显著。由于 OPO 具有一定的允许带宽,抽运光谱宽度超出允许带宽会导致 OPO 参量转换效率的下降,为了保证 OPO 的效率,抽运功率被限制在 5 W 左右,从而限制了最终输出功率的提升。可行的改进方案为:1)光纤激光器放大级采用长度较短且芯径较大的增益光纤,以抑制非线性

效应;2)提高光纤激光器种子源的脉冲重复频率,从而在相同的平均功率下降低峰值功率,抑制非线性效应。采用以上方法可以在保证光谱质量的前提下增加可用的抽运功率,从而使 OPO 的输出功率得到明显提高。

使用光谱仪(OSA, Agilent 86142B)测量信号光的光谱,如图 4 所示。信号光中心波长为 1544 nm,通过能量守恒关系( $1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i$ )可以计算得到闲频光中心波长为 3.42  $\mu\text{m}$ 。信号光光谱呈稳定的单峰形状,谱线宽度(FWHM)约为 0.3 nm,远小于抽运光谱线宽度。经计算,长度为 50 mm 的 PPMgLN 晶体的光谱允许带宽为 0.33 nm,正是由于晶体具有较窄的参量带宽,导致了从抽运光双峰谱到信号光单峰谱的“光谱净化”和谱宽压窄效应<sup>[15]</sup>。

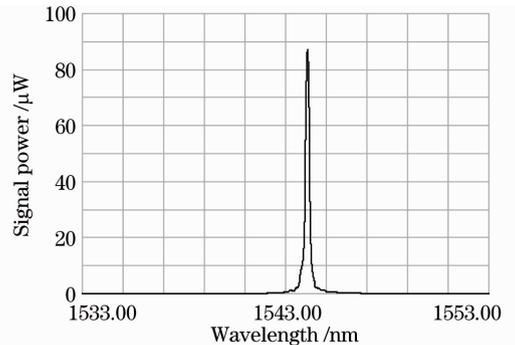


图 4 室温下 OPO 信号光光谱  
Fig. 4 Signal spectrum of the picosecond OPO at room temperature

灵活方便的波长调谐方式是准相位匹配 OPO 的优势之一,通常采用的调谐方式有晶体极化周期调谐、温度调谐和角度调谐。本实验采用极化周期为 30.5  $\mu\text{m}$  的 PPMgLN 晶体,通过控制晶体的温度,实现了 1.544~1.608  $\mu\text{m}$ (信号光)和 3.15~3.42  $\mu\text{m}$ (闲频光)的温度调谐输出。图 5 给出了实验测量得到的温度调谐曲线,用温控炉调节晶体的温度,在 30  $^{\circ}\text{C}$ ~190  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内每隔 20  $^{\circ}\text{C}$  分别测量信号光波长,并计算出相应的闲频光中心波长。图中实线是根据 PPMgLN 晶体的 Sellmeier 方程计算得到的温度调谐曲线,实验结果与理论计算的调谐曲线吻合。温度调谐具有操作方便、可实现连续调谐的优点,但是调谐范围较小,如果使用包含多个极化周期的 PPMgLN 晶体,通过改变晶体的极化周期可以实现更大范围的波长调谐。

在自由运转条件下考察了整个系统的输出稳定性。室温下连续记录闲频光输出功率随运转时间的变化情况,发现输出功率波动较小(1 h 小于 3%)。

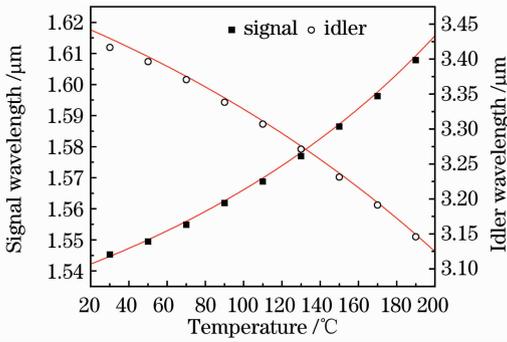


图 5 OPO 输出波长的温度调谐曲线

Fig. 5 Temperature tuning characteristics of the picosecond OPO

长时间运行的稳定性主要和外界环境的影响有关：温度变化会导致光纤放大器的激光二极管(LD)抽运的发射波长发生漂移，从而使光纤激光器输出功率发生变化，因此需要对 LD 采取制冷措施。另外，由于同步抽运条件对腔长的稳定度要求较高，环境温度变化和机械振动引入的微小位移长时间累积导致 OPO 腔长偏离最佳同步匹配值，也会引起输出功率的下降。

将中红外闲频光输出功率最大时所对应的 OPO 腔长定义为腔长的最佳同步匹配值，输出功率随 OPO 腔长失配量的典型变化曲线如图 6 所示。如果认为输出功率下降到最大值的 90% 是可以接受的最大失配量，可以看到，该同步抽运 OPO 的可接受腔长失配量约为 0.45 mm，超出该范围就会导致输出功率迅速下降。因此，进一步提高系统稳定性可以从以下方面着手：尽量减少环境温度和振动等因素的影响，采用主动反馈手段控制 OPO 腔长。

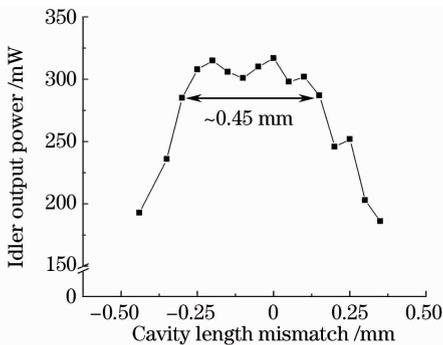


图 6 闲频输出功率随 OPO 腔长失配的变化曲线

Fig. 6 Idler output power versus OPO cavity length mismatch

## 4 结 论

搭建了基于全光纤 MOPA 结构皮秒脉冲激光器抽运 PPMgLN 实现的中红外同步抽运皮秒

OPO, 在室温下获得了平均功率 0.67 W 的 3.42 μm 中红外激光输出, 从抽运光到闲频光的转换效率为 12.9%, 斜率效率为 14.5%。采用控制晶体温度的方法实现了 1.544~1.608 μm(信号光)和 3.15~3.42 μm(闲频光)的输出波长调谐范围。全光纤结构提升了抽运源的紧凑性和稳定性, 另外, MOPA 结构的光纤激光器具有模块化和便于功率提升的内在优势, 是高功率 OPO 抽运源的理想选择, 用该方案获得高平均功率、高重复频率、宽调谐范围的超短脉冲激光将具有很大的发展潜力。

## 参 考 文 献

- 1 F. Kienle, P. S. Teh, S. Alam *et al.*. Compact, high-power energy, picosecond optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3580~3582
- 2 G. T. Kennedy, D. T. Reid, A. Miller *et al.*. Near- to mid-infrared picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled RbTiOAsO<sub>4</sub> [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 503~505
- 3 K. Finsterbusch, R. Urschel, H. Zacharias. Fourier-transform-limited, high-power picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(6): 741~746
- 4 R. Das, S. C. Kumar, G. K. Samanta *et al.*. Broadband, high-power, continuous-wave, mid-infrared source using extended phase-matching bandwidth in MgO:PPLN[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(24): 3836~3838
- 5 Yonghang Shen, Shaif-ul Alam, Kang Kang Chen *et al.*. PPMgLN-based high-power optical parametric oscillator pumped by Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier incorporates active pulse shaping [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 385~392
- 6 Yang Dingzhong, Jiang Peipei, Chen Tao *et al.*. PPMgLN-based high power optical parametric oscillator pumped by a pulsed fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 34~37
- 杨丁中, 姜培培, 陈滔等. 基于周期性畴极化反转掺镁铌酸锂晶体的脉冲光纤激光器抽运的高功率光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 34~37
- 7 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1447~1450
- 魏星斌, 彭跃峰, 王卫民等. 高功率 MgO:PPLN 光参量振荡器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1447~1450
- 8 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 檀慧明, 林洪沂, 张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 9 H. M. van Driel. Synchronously pumped optical parametric oscillators[J]. *Appl. Phys. B*, 1995, **60**(5): 411~420
- 10 A. A. Mani, L. Dreesen, Ph. Hollander *et al.*. Pumping picosecond optical parametric oscillators by a pulsed Nd:YAG laser mode locked using a nonlinear mirror[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(13): 1945~1947
- 11 A. Zavadilová, V. Kubeek, J.-C. Diels. Picosecond optical parametric oscillator pumped synchronously, intracavity, by a mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(2): 103~108
- 12 M. V. O' Connor, M. A. Watson, D. P. Shepherd *et al.*

- Synchronously pumped optical parametric oscillator driven by a femtosecond mode-locked fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(12): 1052~1054
- 13 M. W. Haakestad, H. Fonnum, G. Arisholm *et al.*. Mid-infrared optical parametric oscillator synchronously pumped by an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(24): 25379~25388
- 14 F. Kienle, K. K. Chen, S. Alam *et al.*. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 7602~7610
- 15 O. Kokabee, A. E. Martin, M. E. Zadeh. Efficient, high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(19): 3210~3212
- 16 Zhang Jiakui, Wang Peilin, Yue Guming *et al.*. Synchronously double-pass-pumped optical parametric oscillator in two-crystal BBO [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1991, **8**(4): 391~395
- 张家奎, 王佩林, 岳古明 等. 同步双向抽运双晶体 BBO 光学参量振荡器 [J]. *量子电子学报*, 1991, **8**(4): 391~395
- 17 Zhu Jiangfeng, Zhong Xin, Teng Hao *et al.*. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(9): 2603~2605
- 18 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24008~24012
- 19 Zhong Xin, Zhu Jiangfeng, Zhou Binbin *et al.*. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator at 1053 nm [J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009, **39**(4): 537~540
- 钟 欣, 朱江峰, 周斌斌 等. 1053 nm 同步抽运飞秒光参量振荡器 [J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, **39**(4): 537~540

栏目编辑: 宋梅梅