

文章编号: 0258-7025(2010)01-0034-04

# 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

杨丁中 姜培培 陈滔 吴波 孔剑 沈永行

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江大学光电系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 报道了研制高功率全光纤化线偏振掺铌脉冲激光器,并用其抽运光参量振荡器(OPO)的研究工作。激光器以光纤化的声光调 Q 掺铌光纤激光器作为种子源,用大直径双包层保偏光纤作为增益放大介质。在 40 kHz 重复频率下,得到 1064.2 nm 处最大 23.5 W 的线偏振脉冲激光输出,脉冲宽度约 46 ns,偏振消光比(PER)优于 10 dB,光束质量因子( $M^2$ )约为 1.3。利用该全光纤激光器抽运基于周期性畴极化反转掺镁铌酸锂(PPMgLN)晶体的宽带可调谐 OPO,在信号光 1602 nm 通道,获得 11.05 W 最大光参量输出,其中 3168 nm 处闲散光功率为 3.01 W。OPO 能量转换效率为 56%,斜率效率为 63%。在信号光 1508 nm 通道,获得 9.87 W 最大光参量输出,其中 3614 nm 波长功率为 2.75 W。

**关键词** 激光器;脉冲光纤激光器;光参量振荡器;周期性畴极化反转掺镁铌酸锂晶体

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0034

## PPMgLN-Based High Power Optical Parametric Oscillator Pumped by a Pulsed Fiber Laser

Yang Dingzhong Jiang Peipei Chen Tao Wu Bo Kong Jian Shen Yonghang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** This paper reports the development of our recent work on an all-fiberized high power linearly polarized pulsed Yb fiber laser and using the fiber laser to pump a PPMgLN-based optical parametric oscillator (OPO). The pulsed fiber laser used a fiberized acousto-optic (AO) Q-switched Yb doped fiber laser as a seed and a large mode area double cladding polarization-maintaining fiber as the gain medium. It delivered a linearly polarized pulsed laser output working at 1064.2 nm with an average power of 23.5 W at a repetition rate of 40 kHz. The polarization extinction ratio (PER) of the emission was better than 10 dB. The pulse duration was about 46 ns and the beam quality factor ( $M^2$ ) was about 1.3. Using this all-fiberized laser as a pump source to pump a PPMgLN-based OPO, we obtained a maximum parametric output power of 11.05 W at signal wavelength of 1602 nm with 3.01 W of idler power at 3168 nm. The total conversion efficiency and the slope efficiency was 56% and 63% respectively. At signal wavelength of 1508 nm, a maximum parametric output power of 9.87 W was obtained with 2.75 W idler power at 3614 nm.

**Key words** lasers; pulsed fiber laser; optical parametric oscillator; PPMgLN crystal

### 1 引言

中红外波段的激光光源在医学、生物、工业以及国防领域都有重要的作用,基于非线性光学转换的光

参量振荡器(OPO)可以实现大功率中红外波段的激光输出。实现非线性光学转换的晶体主要有周期性畴极化的铌酸锂(PPLN)<sup>[1]</sup>晶体、磷酸钛氧钾

收稿日期: 2009-03-01; 收到修改稿日期: 2009-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(60778001)和浙江省重大科技专项(2008C01052-4)资助项目。

作者简介: 杨丁中(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器和中红外光参量振荡器等方面的研究。

E-mail: yangdingzhongok@163.com

导师简介: 沈永行(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤激光器、中红外光参量振荡器、光纤传感和光纤光谱仪等方面的研究。E-mail: physyh@zju.edu.cn(通信联系人)

(KTA)<sup>[2,3]</sup>、磷酸钛氧钾(KTP)<sup>[4,5]</sup>、磷锆锌(ZnGeP<sub>2</sub>)<sup>[6]</sup>以及周期性畴极化反转的氧化镁掺杂的铈酸锂(PPMgLN)晶体<sup>[7]</sup>。由于PPMgLN晶体具有非线性系数大、抗损伤阈值高以及极化矫顽场低等优点<sup>[8,9]</sup>,因此基于PPMgLN晶体的OPO获得了较快的发展。OPO的抽运源较多采用Nd:YVO<sub>4</sub>激光器<sup>[10]</sup>,Nd:YLF激光器<sup>[11]</sup>,Nd:YAG激光器<sup>[12,13]</sup>,Ho:YAG激光器<sup>[14]</sup>和Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub>激光器<sup>[15]</sup>等。随着高功率光纤激光器的发展,最近几年,已有用光纤激光器作为OPO抽运源的报道<sup>[16~18]</sup>。2005年,Chen等<sup>[19]</sup>用连续的50 W掺镱光纤激光器抽运PPMgLN晶体,在2.94 μm获得了10 W以上的OPO激光输出。2008年姜培培等<sup>[20]</sup>用主振-放大(MOAP)结构的高功率保偏脉冲激光器抽运PPMgLN光参量振荡器,获得9 W的OPO输出,其中3.5 μm处闲散光功率达到2.43 W。

本文报道了研制全光纤化的高功率线偏振掺镱脉冲激光器,并用其抽运光参量振荡器的研究工作。激光器以光纤化的声光调Q掺镱光纤激光器作为种子源,用大直径双包层保偏光纤作为增益放大介质,在40 kHz重复频率下,得到平均功率为23.5 W,波长为1064.2 nm的线偏振脉冲激光输出,脉宽为46 ns,偏振消光比(PER)优于10 dB。利用该全光纤激光器抽运基于周期性畴极化反转掺镁铈酸锂晶体的宽带可调谐OPO,在信号光1508 nm和1602 nm通道实现了较高功率的激光输出。

## 2 实验装置

全光纤激光器系统原理图如图1所示,整个系统分为光纤激光种子源和光纤激光功率放大器两部分。在种子源部分,抽运源为915 nm波长工作的10 W输出的带尾纤半导体激光器(JDSU)。由两个1064 nm处反射率分别为99.9%和30%的光纤布

拉格光栅(FBG)构成激光谐振腔,增益光纤为Yb高掺杂的双包层光纤,长度为1 m。在增益光纤和输出端FBG之间熔接光纤化的声光调制器(AOM),得到平均功率为2 W的脉冲激光输出,重复频率从20~50 kHz可调。在40 kHz重复频率下,最高输出功率时脉冲宽度为36 ns。种子激光输出连接到一个偏振相关的保偏隔离器,保偏隔离器的作用是使随机偏振的种子源激光变为线偏振的激光,同时避免后级的放大级激光反馈回种子源损坏种子。在放大级部分,抽运源采用6个915 nm的半导体激光器,单个半导体激光器最大输出功率为10 W,输出光纤为105/125多模光纤。一个(6+1)×1的保偏光纤合束器将线偏振激光种子源和抽运源耦合到大直径双包层保偏增益光纤中。增益光纤采用Coractive公司的大直径双包层熊猫型保偏光纤,长度为5 m。光纤纤芯直径为29 μm,数值孔径(NA)为0.07;内包层直径为250 μm,数值孔径为0.47。光纤在915 nm波长处小信号吸收约为2.2 dB/m。为了防止输出端面反射引起寄生振荡,输出端光纤端面抛成8°。同时将光纤绕成直径为120 mm左右的圆,以抑制高阶模,使激光输出模式接近基模。图2所示为光纤激光器抽运OPO的原理图。其中法拉第旋转器(FR)、石英旋转片(QR)和两个偏振分光棱镜(PBS)组成了高功率的激光隔离器。两个λ/2波片(HWP)用于调节激光输出的偏振状态。一个焦距为150 mm的聚焦透镜把经过隔离器后的激光进行聚焦后直接抽运基于PPMgLN晶体的光参量振荡器。光参量振荡器采用线性腔结构。输入镜DM<sub>1</sub>在1064 nm处高透,在1400~1600 nm和3500~4000 nm波段高反。输出镜DM<sub>2</sub>在1064 nm处高反,3500~4000 nm波段高透,在1602 nm和1508 nm处的反射率分别为48%和50%。非线性晶体采用项目组自行制备的PPMgLN晶体,晶体尺寸为50 mm×10 mm×1 mm。晶体两个端面抛光后都镀有对1064 nm,1400~1600 nm以及3500~4000 nm波段的增透膜。

## 3 实验结果与分析

全光纤化的线偏振脉冲激光器的种子源在重复频率为40 kHz时,得到平均功率为2 W的随机偏振的激光输出。种子源激光经过保偏隔离器后得到0.6 W线偏振的激光输出。激光输出波长为1064 nm,光谱半峰全宽为0.4 nm,激光脉冲宽度为36 ns。

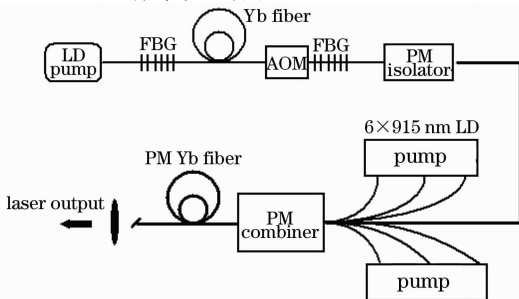


图1 全光纤线偏振脉冲激光系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of the all fiberized linearly polarized pulsed Yb fiber laser

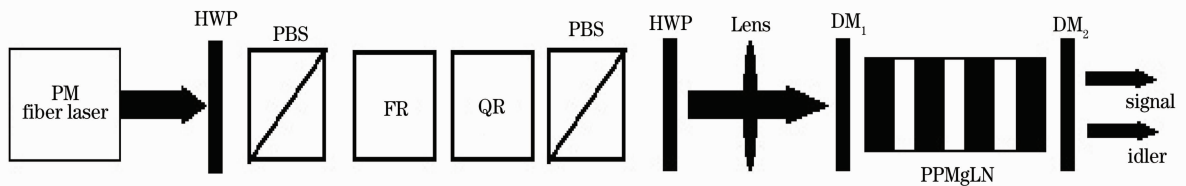


图2 光纤激光器抽运的光参量振荡器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the fiber laser pumped optical parametric oscillator

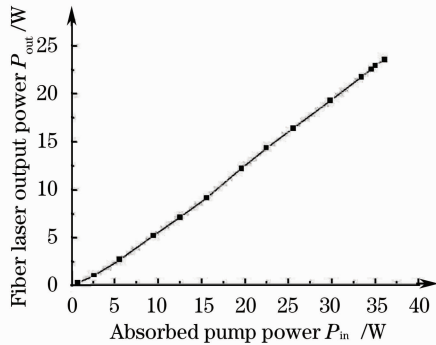


图3 在40 kHz重复频率下,全光纤线偏振激光输出功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 3 Output power of the all fiberized linearly polarized fiber laser as a function of absorbed pump power at repetition rate of 40 kHz

在放大级,合束器将经过保偏光纤隔离器导入的线偏振激光种子源和作为抽运源的半导体激光耦合到大直径保偏掺镱双包层增益光纤中。合束器需进行有效的风冷,以避免损坏。图3所示为在40 kHz重复频率下,种子源激光经过放大后,在1064 nm处线偏振激光输出功率与所吸收的抽运功率之间的关系。在吸收的抽运功率为36 W时,得到最大线偏振激光输出功率为23.5 W,斜率效率为67.6%,偏振消光比优于10 dB。测得的光束质量因子 $M^2$ 约为1.3,接近基模。

图4(a)为用光谱分析仪(OSA, Ando 6317C)测量的线偏振激光输出的光谱,波长为1064.2 nm,光谱半峰全宽(FWHM)为1.1 nm,与种子源相比光谱有所展宽。从光谱图中可以看出输出激光无受激拉曼散射(SRS)现象。图4(b)为用快速铟镓砷(InGaAs)光电探测器和500 MHz示波器测量的激光脉冲形状图,激光脉冲宽度为46 ns。与种子源相比,放大后的脉冲宽度亦有所展宽。

光纤激光器输出的线偏振激光经过隔离器后,得到最大功率为19.7 W线偏振激光。用该激光抽运PPMgLN晶体,成功获得了多个通道的光参量振荡输出。选择了信号光波长在1602 nm和1508 nm这两

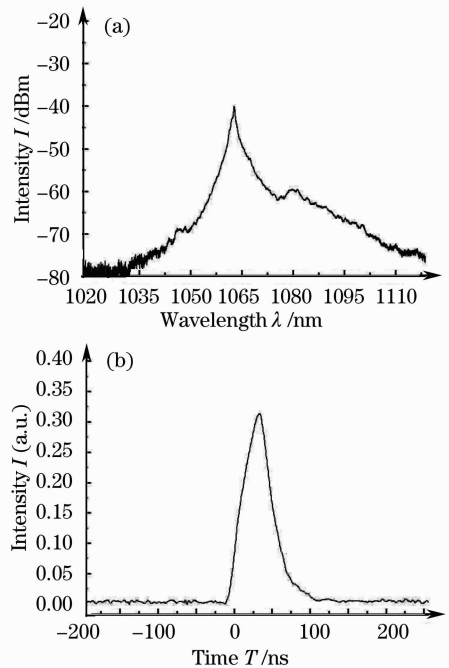


图4 抽运吸收功率为36 W,重复频率为40 kHz时,全光纤线偏振激光器输出的激光光谱(a)和激光脉冲波形(b)

Fig. 4 Emission spectrum (a) and pulse shape (b) of the fiber laser output at repetition rate of 40 kHz under absorbed pump power of 36 W

个通道,对应闲散光的波长分别为3168 nm和3614 nm。图5为光参量振荡器输出功率与作为抽运源的光纤激光器输入功率之间的关系图。图5(a)为在1602 nm信号光通道,光参量振荡器输出功率(包括总输出功率、信号光功率以及闲散光功率)与抽运源光纤激光器输入功率的关系图,在19.7 W抽运下,获得最大光参量输出功率为11.05 W,其中3168 nm波长处闲散光的功率为3.01 W,OPO能量转换效率为56%,斜率效率为63%。图5(b)为在1508 nm信号光通道,光参量振荡器输出功率与抽运源光纤激光器输入功率的关系图。在19.7 W抽运下,获得最大光参量输出为9.87 W,其中3614 nm波长处闲散光的功率为2.75 W。

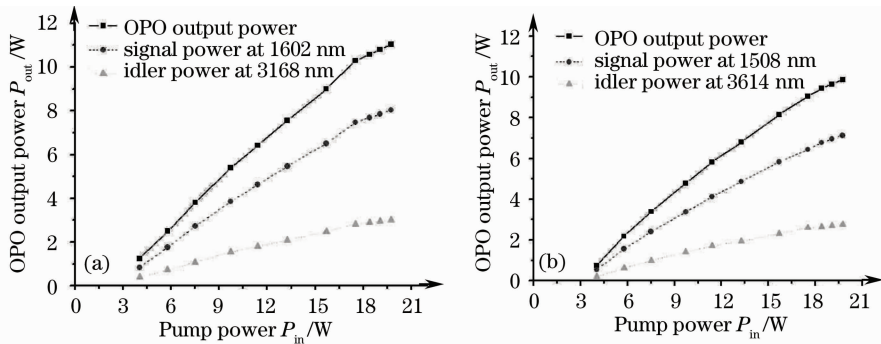


图5 光参量振荡器输出功率与抽运源光纤激光器功率的关系。(a)1602nm通道;(b)1508 nm通道

Fig.5 Output power of the OPO via fiber laser power (a) for 1602 nm channel;(b) for 1508 nm channel

## 4 结 论

介绍了研制全光纤化的线偏振高功率掺铽脉冲光纤激光器,以及用其抽运光参量振荡器的研究工作。光纤激光器最大输出线偏振功率达到 23.5 W,偏振消光比优于 10 dB,重复频率 40 kHz,脉冲宽度为 46 ns,光束质量因子  $M^2$  约为 1.3,接近基模。用该光纤激光器抽运基于 PPMgLN 晶体的宽带可调谐 OPO,实现了高效的参量转换输出。在 19.7 W 线偏振激光抽运下,在信号光 1602 nm 通道,获得最大光参量输出功率为 11.05 W,其中 3168 nm 处闲散光功率为 3.01 W,OPO 能量转换效率为 56%,斜率效率为 63%。在信号光 1508 nm 通道,获得最大光参量输出为 9.87 W,其中 3614 nm 处闲散光功率为 2.75 W。

## 参 考 文 献

1. Elder, D. Legge, J. Beedell *et al.*. Nd:YVO<sub>4</sub> pumped degenerate PPLN OPO [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2006, MB: Page MB20
2. Y. Isyanova, E. Slobodtchikov, J. H. Flint. High repetition rate, rapidly tunable KTA OPO [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2005, MB: Page MB407
3. Zhu Yachen, Lan Ge, Li Tong *et al.*. 2  $\mu$ m KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2059~2063  
朱雅琛,兰戈,李彤等. 脉冲式 2  $\mu$ m KTiOAsO<sub>4</sub> 光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2059~2063
4. Y. Wang, D. Xu, Y. Yu *et al.*. High-peak-power, high-repetition-rate intracavity optical parametric oscillator at 1.57  $\mu$ m [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 93~95
5. Fu Weijia, Yu Jian, Kang Yuzhuo *et al.*. 13 mW-continuous-wave green light output by quasi-phase-matched frequency doubling in periodically poled KTP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1063~1066  
付伟佳,于建,康玉琢等. 准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1063~1066
6. K. Miyamoto, K. Suizu, J. Shikata *et al.*. Wavelength-agile 5~10  $\mu$ m generation by galvano-controlled double crystal KTP-OPO [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2006, CTuZ: Page CTuZ2
7. Yao Jianghong, Liu Zhiwei, Xue Liangping *et al.*. Low threshold and wide tunable optical parametrical oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) crystal [J].

*Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(2): 105~108  
姚江宏,刘志伟,薛亮平等. 基于 PPMgLN 晶体低阈值宽调谐红外光参量振荡研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(2): 105~108

8. Kong Yongfa, Li Bing, Chen Yunlin *et al.*. Study on the micro-mechanism of Mg-doped lithium niobate crystals against photorefractive [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2003, **22**(1): 40~44  
孔勇发,李兵,陈云琳等. 掺镁铌酸锂晶体抗光折变微观机理研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(1): 40~44
9. Yao Jianghong, Yan Boxia, Chen Yahui *et al.*. Periodically poled second harmonic green light generation in near-stoichiometric MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2): 141~143  
姚江宏,颜博霞,陈亚辉等. 周期极化近化学计量比掺镁铌酸锂晶体倍频研究 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(2): 141~143
10. B. Wu, Y. Shen, S. Cai *et al.*. Widely tunable high power OPO based on a periodically poled MgO doped lithium niobate crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1115~1119
11. Xingbao Zhang, Baoquan Yao, Yuezu Wang *et al.*. Middle-infrared intracavity periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 426~427
12. D. W. Chen, K. Masters. Continuous-wave 4.3- $\mu$ m intracavity difference frequency generation in an optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(1): 25~27
13. Yao Jianghong, Xue Liangping, Yan Boxia *et al.*. Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 209~213  
姚江宏,薛亮平,颜博霞等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 209~213
14. C. Kieleck, M. Eichhorn, A. Hirth *et al.*. High-efficiency 20-50 kHz mid-infrared orientation-patterned GaAs optical parametric oscillator pumped by a 2  $\mu$ m holmium laser [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 262~264
15. Zhu Guoli, Ju Youlun, Wang Tianheng *et al.*. A mid-IR 14.1 W ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(3): 034208
16. D. Creeden, P. A. Ketteridge, P. A. Budni *et al.*. Mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2  $\mu$ m Tm-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 315~317
17. D. Creeden, P. A. Ketteridge, P. A. Budni *et al.*. Multi-watt mid-IR fiber-pumped OPO [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2008, CTuII: Page CTuII2
18. A. Henderson, R. Stafford. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source [J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(2): 767~772
19. D. Chen, T. S. Rose. Low noise 10-W cw OPO generation near 3  $\mu$ m with MgO doped PPLN [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2005, CThQ: Page CThQ2
20. Jiang Peipei, Cai Shuangshuang, Shen Yongchang *et al.*. PPMgLN based high power optical parametric oscillator pumped by a pulsed Yb fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 168~171  
姜培培,蔡双双,沈永行等. 掺铽脉冲光纤激光器抽运的高功率 PPMgLN 光参变振荡器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 168~171