

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0168-04

掺镱脉冲光纤激光器抽运的 高功率 PPMgLN 光参变振荡器

姜培培^{1,2} 蔡双双^{1,2} 沈永行^{1,2} 吴波^{1,2}

(¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; ²浙江大学信息科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要 报道了研制主振-放大(MOPA)结构的高功率保偏掺镱脉冲光纤激光器并用其抽运光参变振荡器(OPO)的研究工作。掺镱脉冲光纤激光器以声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器作为种子源, Liekki 的大直径双包层保偏光纤作为放大介质, 得到接近基模的 1064 nm 波长激光输出, 最大线偏振输出功率 17 W, 偏振消光比优于 10 dB, 重复频率 50 kHz, 脉冲宽度 60 ns。利用该光纤激光作为抽运光, 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, 实现了高效参量转换。在信号光 1518 nm 通道, 以 16.2 W 功率抽运, 获得最大参变输出功率 9 W, 其中 3.5 μm 波长功率为 2.4 W。OPO 的能量转换效率为 58%, 斜效率为 68%。在信号光 1491 nm 通道, 以 14 W 功率抽运, 获得最大参变输出 6.6 W, 其中 3.7 μm 波长功率超过 2 W。

关键词 激光器; 脉冲光纤激光器; PPMgLN; 光参变振荡器

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0168

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

Jiang Peipei^{1,2} Cai Shuangshuang^{1,2} Shen Yonghang^{1,2} Wu Bo^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; ² College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The work on the development of a high power linearly polarized pulsed Yb fiber laser and a PPMgLN-based optical parametric oscillator (OPO) pumped by the fiber laser is introduced. The fiber laser was set as a MOPA structure which used an acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser as the seed and a Liekki large diameter PM double clad fiber as the gain medium. A near fundamental mode laser emission at 1064 nm was obtained from the fiber laser, which delivers a maximum power output of about 17 W at a repetition rate of 50 kHz, with duration of 60 ns, polarization extinction ratio of greater than 10 dB. Using this fiber laser as the pump source to pump a PPMgLN-based OPO, high parametric conversion was achieved in the OPO. At the signal wavelength of 1518 nm, the maximum parametric output was over 9 W with 2.4 W at 3.5 micron when pumped under 16.2 W. The conversion efficiency of the OPO was 58% with a slope efficiency of 68%. At the wavelength of 1491 nm, the maximum parametric output was over 6.6 W with over 2 W at 3.7 micron when pumped under 14 W.

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

1 引言

3~5 μm 波段的中红外激光器是激光雷达、红外干扰、光电对抗等许多领域的重要光源。由于热

激励引起的荧光寿命问题, 使用传统增益介质的固体中红外激光器, 在常温下难以产生大功率激光输出。基于非线性光学转换技术的光参变振荡器

基金项目: 国家自然科学基金(60778001)资助项目。

作者简介: 姜培培(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和中红外光参变振荡器方面的研究。

E-mail: feiafei@126.com

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

(OPO)和光参变放大器(OPA)是目前实现大功率中红外固体激光输出的主要手段。实现非线性光学转换的晶体主要有周期性畴极化反转的铌酸锂(PPLN)^[1]、钽酸锂(PPLT)、磷酸氧钛钾(PPKTP)^[2],以及周期性畴极化反转的氧化镁掺杂的铌酸锂(PPMgLN)等。其中 PPMgLN 晶体具有非线性转换系数大、抗光损伤阈值高、通光光谱范围大等优点,是近红外和中红外 OPO 中使用较多的非线性晶体。几十年来,基于 PPMgLN 晶体的 OPO 获得了很快的发展^[3~5]。

随着最近几年高功率光纤激光器技术的逐渐成熟^[6~8],使用光纤激光器作为高功率光参变振荡器的泵源引起了越来越多的兴趣。高功率脉冲光纤激光器采用大直径双包层单模光纤作为增益介质,在不需要对热效应过程进行特别处理的情况下,可以得到高光束质量的激光输出,有利于获得高的参变转换效率和高功率的参变激光输出。近几年里,已经有若干研究小组报道了利用光纤激光器抽运 PPMgLN 光参变振荡器的工作^[9~11]。2005 年,Chen 等人使用 50 W 输出的掺镱连续光纤激光器作为抽运源,抽运一个基于 PPMgLN 晶体的 OPO,

获得在 2.94 μm 米波段的激光输出超过 10 W^[10]。与此相比较,采用脉冲工作的 OPO 可以获得更高的峰值功率,在某些研究领域具有特定的价值,但受限于线偏振脉冲光纤激光器的功率,OPO 的输出功率相对较小,如 Avila 等人使用脉冲光纤激光器作为抽运源,在 3~4 μm 波段激光输出功率只有 1 W 左右^[11]。其主要原因是因为高功率脉冲光纤激光器的峰值功率很高,光纤中如受激布里渊散射和受激喇曼散射等非线性光学现象比较严重,容易损坏光纤,使光纤激光器的输出功率受到限制^[12]。

本文报道了研制 MOPA 结构的高功率保偏掺镱脉冲光纤激光器以及用其作为抽运源抽运以 PPMgLN 为非线性晶体的 OPO 的研究工作。光纤激光器以声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器作为种子源,Liekki 的大直径双包层保偏光纤作为放大介质,得到高光束质量的 1064 nm 波长的高功率激光输出。利用该光纤激光器作为抽运源,抽运一基于 PPMgLN 晶体的宽带可调谐 OPO,在 1518 nm 和 1491 nm 的信号光通道分别获得了高效的参变转换和较高的激光功率输出,为进一步的实验工作奠定了基础。

2 实验装置

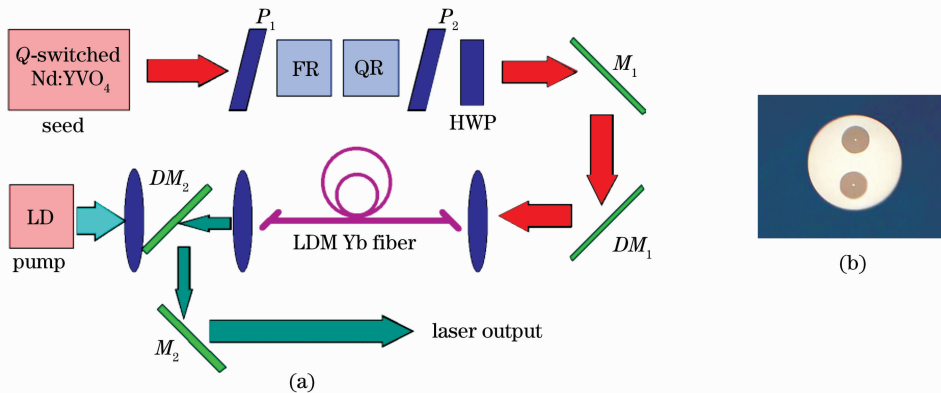


图 1 Yb 脉冲光纤激光器结构示意图。(a)光纤激光器原理图;(b)光纤端面照片

Fig.1 Schematic diagram of the pulsed Yb fiber laser. (a)Schematic diagram of the fiber laser;

(b)Image of the cross-section of the PM fiber

所研制的光纤激光器采用 MOPA 结构,其系统结构如图 1(a)所示,其中 P₁、P₂ 为偏振片,FR 为法拉第旋光器,QR 为石英旋转片,HWP 为二分之一波片,M₁、M₂ 为 1064 nm 全反镜,DM₁、DM₂ 为双色镜。在实验中,抽运源采用 Limo 公司的 976 nm 半导体激光器,由 200 μm 直径的光纤输出,最大输

输出功率可达 50 W。使用了 Liekki 公司的长度为 5 m 的大直径双包层熊猫型保偏光纤。光纤芯径 30 μm,数值孔径 0.07,内包层直径 250 μm,数值孔径 0.46。光纤的端面图片如图 1(b)所示。光纤在 976 nm 波长处小信号吸收约为 16 dB/m。为了防止发生端面反射引起的寄生振荡,光纤两端按斜面

抛光,角度约为 8° 。将光纤绕成直径为 100 mm 左右的圆,抑制高阶模,使激光输出模式接近基模。

种子源采用声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器,输出功率最大可达 5 W,重复频率在 5 kHz 至 50 kHz 之间可调。采用法拉第旋光器、石英旋转片和两个偏振片构成隔离器,防止光纤放大器的后向光进入种子源。二分之一玻片用以调整种子源的偏振方向,使其与保偏光纤的慢轴一致,使得经光纤放大器输出的激光偏振消光比最优。双色镜 DM₁ 和 DM₂ 在 1064 nm 处高反,在 976 nm 处高透。DM₁ 反射种子源激光进入光纤,而使未完全吸收的抽运光漏出,DM₂ 的作用为分离抽运光和输出激光。

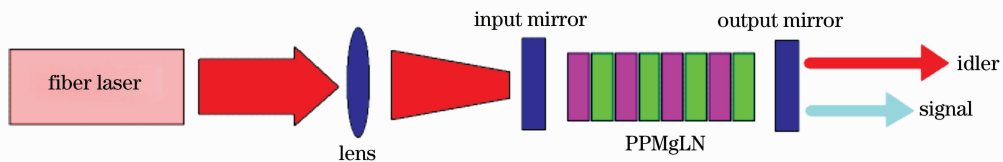


图 2 光参变振荡器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical parametric oscillator

3 实验结果与分析

光纤激光器输出激光基本为线偏振光,经过偏振分光棱镜(PBS)之后,得到最大线偏振输出为 17 W,偏振消光比大于 10 dB。图 3 为光纤激光器输出功率与抽运功率的关系曲线,可以计算其激光斜效率约 56.7%。使用焦距为 250 mm 的透镜对光束进行聚焦后,利用刀口法测量光束质量,计算 M^2 小于 1.2,激光输出接近于基模。光纤激光器的输出光谱如图 4 所示,其中心波长为 1064.57 nm。种子光经过增益光纤功率放大之后,光谱呈现一定的展宽现象,光谱带宽由 0.05 nm 增加到 0.07 nm 左右。

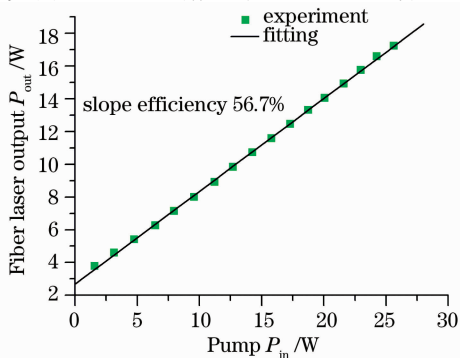


图 3 光纤激光器输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 3 Output power of the fiber laser as a function of pump power

光纤激光器输出的激光经过一个焦距为 300 mm 的聚焦透镜,直接用来抽运基于 PPMgLN 晶体的光参变振荡器。光参变振荡器采用线性腔结构,如图 2 所示。输入镜在 1064 nm 波段高透,在 1400 ~ 1600 nm 波段高反,输出镜在 1064 nm 波段高反,在 3.5 ~ 4.0 μm 波段高透。输出镜在 1520 nm 和 1492 nm 的反射率分别为 70% 和 95%。非线性晶体采用的是实验室自制的 PPMgLN 晶体^[13],其尺寸为 50 mm × 10 mm × 1 mm,具有均匀的畴极化反转结构。晶体的两个端面进行抛光,均镀有对 1064 nm、1400 nm 至 1600 nm、3500 ~ 4000 nm 的增透膜,整个光参变振荡器的腔长约为 65 mm。

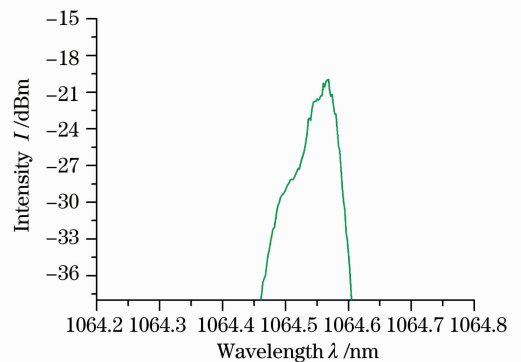


图 4 光纤激光器的输出光谱图

Fig. 4 Output spectrum of the fiber laser

实验中,将种子光源的重复频率设置在 50 kHz,使用快速 InGaAs 探测器和 500 MHz 的示波器测量脉冲形状,发现脉冲宽度约为 60 ns。在后向散射光中,可以观测到有一定程度的受激布里渊现象出现。通过调整种子光的脉冲宽度以及功率大小,可以有效减少非线性现象,防止光纤激光器在高功率工作状态下发生损坏。

以光纤激光器作为 OPO 的抽运源,成功地获得了各个通道的参变振荡。在信号光分别为 1518 nm 和 1491 nm,对应于闲散光分别为 3557 nm 和 3715 nm 的两个通道(共有 20 个通道可以选择),可以获得较高的光参变转换效率。图 5 为光参变振荡器输出功率随抽运源光纤激光器输入功率的关系图,其中图

5(a)为 1518 nm 信号光通道,图 5(b)为 1491 nm 信号光通道。在 1518 nm 的信号光通道,当抽运源输入为 16.3 W 时,获得最大参变输出为 9 W,其中 3.5 μm 波段的功率为 2.43 W,相应的参变转换效率为 58%,光参变振荡器的斜效率为 68%。在这个通道,没有发现有任何饱和现象。信号光 1491nm 通道,当抽运源输入为 14 W 时,获得最大参变输出为 6.6 W,3.7 μm 波段处的闲散光功率超过 2 W。从图 5(b)中可以看到,随着抽运源功率增加,信号光波段有饱和现象出现,而闲散光波段持续线性增长,这可能与光参变振荡器的输出腔镜在 1491 nm 的较高反射率有关。由于实验中关心的是闲散光,也就是中红外波段激光的输出情况,所以这种饱和现象是可以接受的。

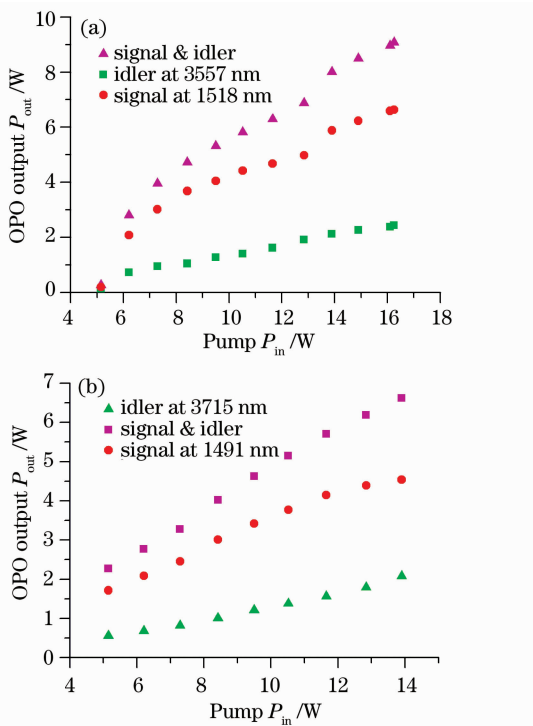


图 5 光参变振荡器输出功率与泵源输入功率关系图

Fig. 5 Output power of the OPO as a function of the pump power

4 结 论

介绍了研制 MOPA 结构的高功率保偏掺铋脉冲光纤激光器以及用其抽运光参变振荡器的初步研究工作。光纤激光器最大线偏振输出功率达到 17 W,偏振消光比优于 10 dB,重复频率 50 kHz,脉冲宽度为 60 ns。利用该光纤激光器作为抽运源,直

接抽运一个基于 PPMgLN 晶体的宽带可调谐光参变振荡器,获得了参变输出功率 9 W,其中 3.5 μm 波长功率为 2.4 W。可以预期,通过进一步提高光纤激光器输出功率和稳定性,将可以得到更高功率的中红外激光输出。

参 考 文 献

- Liang Xiaoyan, Hou Wei, LüJunhua *et al.*. All-solid-state pumped tunable PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1148~1149
梁晓燕,侯 玮,吕军华等. 全固态激光器抽运的 PPLN 光参变振荡[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1148~1149
- 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
- W. R. Bosenberg, A. Drobshoff, J. I. Alexander *et al.*. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1336~1338
- L. E. Myers, W. R. Bosenberg. Periodically poled lithium niobate and quasi-phase-matched optical parametric oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10):1663~1671
- M. Nakamura, S. Higuchi, S. Takekawa *et al.*. Optical damage resistance and refractive indices in near-stoichiometric MgO-doped LiNbO₃ [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41** (1AB): L49~L51
- A. Piper, A. Malinowski, K. Furusawa *et al.*. High-power, high-brightness, mJ Q-switched ytterbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Lett.*, 2004, **40**(15): 928~929
- K. T. Vu, A. Malinowski, F. G. D. J. Richardson *et al.*. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 10996~11001
- Wang Anting, Xu Lixin, Ming Hai *et al.*. Experimental study of single frequency Yb-doped fiber amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(9): 777~779
王安廷,许立新,明 海等. 掺铋光纤放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(9): 777~779
- P. E Britton, D. Taverner, K. Puech *et al.*. Optical parametric oscillation in periodically-poled lithium niobate driven by a diode pumped, Q-switched erbium fibre laser[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(8): 582~584
- D. W. Chen, T. S. Rose. Low noise 10-W cw OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2005, **1-3**: 1829~1831
- C. Avila, R. Burnham, Y. Chen *et al.*. Polarization maintaining master oscillator fiber amplifier (MOFA) for high repetition rate applications[J]. *SPIE*, 2005, **5335**: 24~32
- J. B. Spring, T. H. Russell, T. M. Shay *et al.*. Comparison of stimulated Brillouin scattering thresholds and spectra in non-polarization-maintaining and polarization-maintaining passive fibers[J]. *SPIE*, 2005, **5709**: 147~156
- B. Wu, Y. Shen, S. Cai. Widely tunable high power OPO based on a periodically poled MgO doped lithium niobate crystal [J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1115~1119