

高功率窄线宽 2.1 μm 光学参量振荡器

郭靖, 何广源, 焦中兴*, 王彪*

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:报道了一种基于氧化镁掺杂的周期性极化铌酸锂的高功率、窄线宽的 2.1 μm 近简并单谐振光学参量振荡器. 该光学参量振荡器使用一台自行搭建的近基模调 Q 线偏振 Nd: YAG 激光器作为抽运源, 抽运光经过聚焦后二次抽运四镜驻波腔结构的周期性极化铌酸锂光学参量振荡器, 实现了稳定的高功率和高光束质量 2.1 μm 激光输出. 利用体光栅作为输出镜, 在重复频率为 10 kHz 时, 产生的 2.1 μm 激光线宽小于 2 nm, 最高功率为 8.4 W, 水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为 3.8 和 4.1.

关键词:光参量振荡器; 2.1 μm 激光; 线宽窄化; 体光栅

中图分类号: O437.4 文献标识码: A

2.1 μm optical parametric oscillator with high average power and narrow linewidth

GUO Jing, HE Guang-Yuan, JIAO Zhong-Xing*, WANG Biao*

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A high-power and narrow-linewidth MgO-doped periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator was reported, which is based on a volume Bragg grating output coupler pumped by a linearly polarized Q-switched Nd: YAG laser. Maximum output power of 8.4 W at a wavelength of 2.1 μm with beam quality factor M^2 of 3.8 and 4.1 in horizontal and vertical directions was obtained using a double-pass pump four-mirror standing-wave geometry. The spectral bandwidths are 0.41 nm and 0.53 nm for signal and idler waves, respectively, which are confined within 2 nm.

Key words: OPO, 2.1 μm laser, linewidth narrowing, VBG

PACS: 42.55. Xi, 42.60. Da, 42.60. Gd, 42.65. -k

引言

2 μm 激光在遥感、光通信、雷达和医疗等方面有重要的应用价值, 并可以用于抽运磷锗锌 (ZGP) 光学参量振荡器 (OPO) 产生 3 ~ 5 μm 波段的中红外激光^[1,2], 得到更广泛的应用. 目前通过固体激光技术得到 2 μm 波段激光输出的主要方法有两种, 一种是利用激光二极管直接抽运 Tm, Ho 双掺晶体直接获得 2 μm 激光输出; 或抽运单掺 Tm 晶体获得 1.9 μm 激光, 再抽运掺 Ho 晶体得到 2 μm 激光输出. 但由于掺 Tm 和 Ho 激光晶体为准三能级, 阈值较高, 致使转换效率低, 并且成本较为昂贵. 另一种

简单、高效产生 2 μm 激光的方法是利用工艺成熟的 1 μm 固体激光器抽运工作于简并状态的 OPO. 其中基于准相位匹配 (QPM) 晶体的简并 OPO 可以获得更高的效率, 此类 QPM 晶体包括周期极化铌酸锂 (PPLN) 和周期极化磷酸氧钛钾 (PPKTP) 等^[3-6]. 相比基于双折射相位匹配的 (如磷酸氧钛钾) OPO, QPM OPO 可以利用晶体的最大非线性系数并且避免走离效应, 从而得到更高的转换效率和光束质量^[7]. 但是, 工作于简并点附近的 QPM OPO 的线宽 (~60 nm) 远大于大部分应用的线宽要求, 必须采用一定的技术将其线宽控制在几个纳米或者更小范围之内. 目前, 最有效的手段是利用体光栅 (VBG)

收稿日期: 2013-09-17, 修回日期: 2014-09-28

Received date: 2013-09-17, revised date: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61008025, 11232015, 11072271); 广东省自然科学基金 (S2012010010172)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61008025, 11232015, 11072271), and Guangdong Natural Science Foundation (S2012010010172)

作者简介 (Biography): 郭靖 (1988-), 男, 新疆石河子人, 博士研究生, 主要研究领域为基于光学参量振荡器的红外激光器. E-mail: ryan-guo333@gmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jiaozhx@mail.sysu.edu.cn, wangbiao@mail.sysu.edu.cn

作为输出耦合镜(OC)对 $2\ \mu\text{m}$ QPM OPO 进行线宽窄化^[8-11]. 相关研究表明,与其它线宽窄化元件相比,VBG 不会引入额外的损耗,在保证转换效率不降低的同时,实现了线宽的窄化. 2007 年,Henriksson 等人首次报道了 $1\ \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光器抽运的体光栅作输出镜的 $2\ \mu\text{m}$ PPLN OPO,得到了 $1.56\ \text{W}$ 的 $2.008\ \mu\text{m}$ 和 $2.264\ \mu\text{m}$ 激光输出,斜效率为 47% ^[8]. 在后续实验中,他们使用 PPKTP 作参量晶体,在近简并状态把功率提高到了 $7.9\ \text{W}$,光光转换效率为 30% ^[9]. Koch 等人用 Nd:YVO₄ 激光器产生的 $1\ \mu\text{m}$ 激光抽运掺氧化镁的 PPLN (PPMgLN) OPO 在简并状态得到了 $1.7\ \text{W}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出,光光转换效率为 21.3% ,线宽小于 $0.7\ \text{nm}$,水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为 2.75 和 3.12 ^[10]. 当偏离简并状态时,他们得到了最大功率为 $2.15\ \text{W}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 输出,此时光光转换效率为 26.8% .

在前期工作中,报道了 $1.064\ \mu\text{m}$ Nd:YVO₄ 激光器抽运的平平腔结构的 VBG PPMgLN OPO,得到了 $4.3\ \text{W}$ 的 $2.1\ \mu\text{m}$ 输出,总的线宽小于 $2.5\ \text{nm}$,水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为 3.2 和 4.2 ^[11]. 此 OPO 的输出功率仅受限于可用的最大泵浦功率. 本文使用高功率 $1.064\ \mu\text{m}$ 调 Q 线偏振 Nd:YAG 激光器做抽运源,通过二次抽运以 VBG 作为输出耦合镜的 PPMgLN OPO,在近简并状态实现了 $8.4\ \text{W}$ 的 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光输出,光光转换效率为 48% ,总的线宽小于 $2\ \text{nm}$. 我们利用四镜驻波结构实现了对 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光参数的灵活调控,在保证线

宽窄化和光束质量较好的同时,将 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光的输出功率提高了近一倍.

1 实验装置及分析

实验中,VBG PPMgLN OPO 选用如图 1 所示的四镜驻波腔结构,可以通过优化凹面腔镜 M_4 和 VBG 的位置,实现参量光和抽运光的最佳匹配,得到最佳的输出功率和光束质量. OPO 由凹面腔镜 M_4 ,一对 45° 双色平面镜,一个 VBG OC 和一个长 $26\ \text{mm}$ 截面 $3.4\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 的 PPMgLN 晶体组成. 其中凹面腔镜 M_4 的曲率半径为 $225\ \text{mm}$,该镜对 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光有高反射率 ($R > 99.8\%$). 一对 45° 双色平面镜对 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光高反 ($R > 99.7\%$),对 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光高透 ($T > 99\%$). PPMgLN 晶体位于 45° 双色平面镜的中间,两个端面镀有增透膜,对 $1.064\ \mu\text{m}$ 和 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光具有高透射率 ($T > 99\%$). 为了恒定晶体的工作温度,PPMgLN 被置于一个温控炉上. 该温控炉的控温精确度为 $0.1\ ^\circ\text{C}$,温度调节范围为 $0 \sim 200\ ^\circ\text{C}$. PPMgLN 晶体的极化周期为 $32.1\ \mu\text{m}$,当抽运波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 时,其近简并状态的工作温度为 $111.5\ ^\circ\text{C}$. VBG OC 的反射中心波长为 $2129.6\ \text{nm}$,衍射效率为 70% ,衍射带宽为 $0.8\ \text{nm}$. 该 VBG 的厚度为 $3.5\ \text{mm}$,截面为 $5\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$,其表面镀有宽带增透膜. VBG 表面与光栅平面夹角为 5° ,可以有效地避免寄生振荡. 曲面镜 M_3 用于将抽运光反射使其两次通过晶体, M_3 的曲率半径为 $150\ \text{mm}$,对 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光有高反射率 ($R > 99.8\%$).

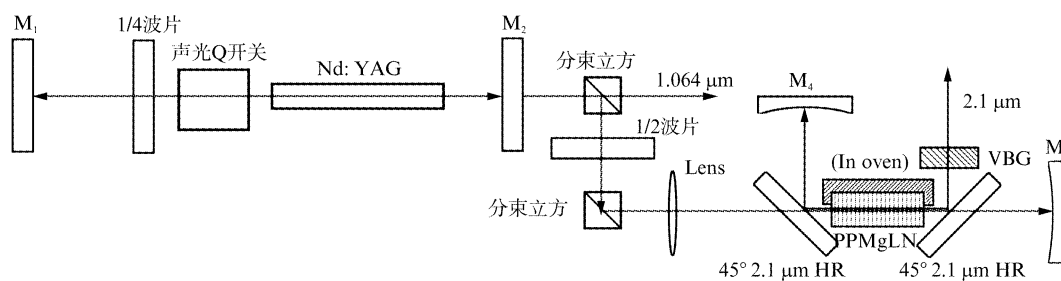


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Layout of experimental setup

抽运源采用自行搭建的 $1.064\ \mu\text{m}$ 声光调 Q Nd:YAG 激光器,重复频率为 $10\ \text{kHz}$. 该激光器由一个 Nd:YAG 抽运模块,一个声光 Q 开关,一个四分之一波片和两个平面腔镜 M_1, M_2 组成. Nd:YAG 抽运模块采用五组激光二极管侧面对称抽运结构,中心水冷的 Nd:YAG 棒长度为 $110\ \text{mm}$,直径为 $4\ \text{mm}$. 在工作电流为 $25\ \text{A}$ 时,二极管最大抽运功率为

$500\ \text{W}$. 该 Nd:YAG 棒的两个端面镀有增透膜,对 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光具有高透射率 ($T > 99\%$). 四分之一波片被置于腔镜 M_1 和 Q 开关之间,用于对 Nd:YAG 棒的热效应作补偿,提高输出功率的稳定性^[12]. 腔镜 M_1 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光有高反射率 ($R > 99.8\%$). 输出耦合镜 M_2 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 反射率为 80% . 利用 Magni 等人报道的谐振腔设计方法^[13] 以

及工作腔热透镜模型^[14],设计了大基模体积和低失调灵敏度的1.064 μm 激光谐振腔.我们用刀口法测量了1.064 μm 激光的光束质量,水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为1.3和1.4,输出激光模式接近基模.1.064 μm 抽运光依次经过第一分束立方,二分之一波片,第二分束立方,得到了垂直偏振状态的抽运光,通过调节二分之一波片可以控制抽运光的功率大小.抽运光被焦距为150 mm的透镜聚焦后入射到PPMgLN晶体,晶体中部的光斑直径约为300 μm.当工作电流为22 A时,到达晶体的最高抽运光功率为17.5 W.

2 实验结果

首先进行了单次抽运(不加 M_3)OPO的实验.为了得到高光束质量和高效率的2.1 μm 激光,进行了系统的理论设计和实验优化工作,在 M_4 的曲率半径为225 mm,腔长为215 mm时,得到了最佳的光束质量和转换效率.此时,2.1 μm 激光输出功率和光光转换效率随抽运功率的变化如图2所示.

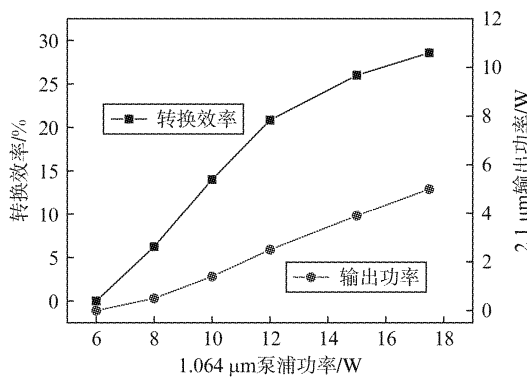


图2 单次抽运结构下,2.1 μm 输出功率和光光转换效率随抽运功率变化曲线

Fig.2 The output power and conversion efficiency of the PPMgLN OPO with single-pass pump geometry

从图2中可以看到,2.1 μm 激光的最高输出功率为5 W,相对于17.5 W的抽运光转换效率为28.6%,此时OPO工作在3倍阈值(阈值为6 W).用刀口法在最高功率处测量了2.1 μm 激光的光束质量,测得的水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为2.8和2.95.可以看出,垂直方向的光束质量因子比水平方向的大,其原因是由于晶体放置在温控炉上,晶体下表面直接接触温控炉的功能面,而上表面与空气接触,比下表面温度略低,这样就形成了垂直方向上的温度梯度,导致垂直方向上的相位匹配发生变化,因此垂直方向的光束质量比水平方向略差.

为了提高2.1 μm 激光输出功率以及光光转换效率,我们使用凹面镜 M_3 将剩余抽运光反射二次通过PPMgLN晶体,除此之外不做其他变动.此时,测得的2.1 μm 激光输出功率和光光转换效率随抽运功率的变化如图3所示.2.1 μm 激光最高输出功率为8.4 W,对应的光光转换效率为48%,OPO工作在4.5倍阈值(阈值为4 W).相比单次抽运OPO,二次抽运得到的2.1 μm 激光输出功率提高了68%.据报道,当抽运光功率为阈值10倍左右时光光转换效率达到最高^[15].因此在不超过PPMgLN晶体损伤阈值的前提下,提高抽运光的功率,或者降低阈值,还可以进一步提高输出功率以及光光转换效率.我们在最高功率时测量了2.1 μm 的光束质量,水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为3.8和4.1.驻波腔OPO工作在2倍阈值时光束质量达到最好,超过2倍阈值后光束质量会迅速变差^[16].本实验中,单次抽运OPO处于最高功率时工作在3倍阈值,二次抽运OPO工作在4.5倍阈值.得益于四镜驻波稳腔结构的良好模式匹配工作状态,二次抽运时依然获得了较好的光束质量,只比单次抽运稍有下降.

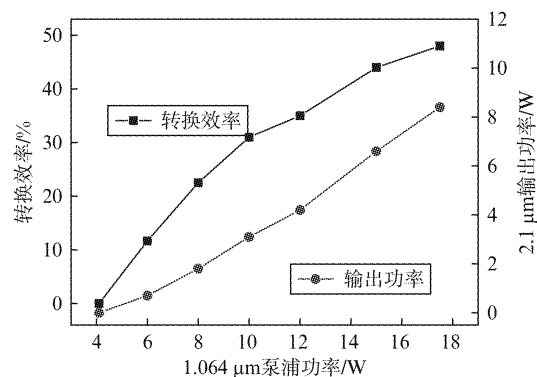


图3 二次抽运结构下,2.1 μm 输出功率和光光转换效率随抽运功率变化曲线

Fig.3 The output power and conversion efficiency of the PPMgLN OPO with double-pass pump geometry

图4显示了2.1 μm 的输出频谱,插图是步长为0.05 nm的大范围频谱的扫描结果.信号光和闲频光的线宽分别为0.41 nm和0.53 nm,总的线宽小于2 nm.因为信号光与闲频光之间仅有少部分重叠,闲频光波长被衍射带宽为0.8 nm的VBG锁定在2129.6 nm,所以该OPO是闲频光单振荡的近简并OPO.单谐振OPO可以有效的避免双谐振腔普遍存在的稳定性问题,输出功率更加稳定.在本文实验中,无论是单次抽运还是二次抽运,所得到的2.1 μm 输出功率都非常稳定,在1小时内功率波动

的标准偏差小于 1%。图 5 所示为二次抽运情况下 2.1 μm 输出功率稳定性的测量结果,其标准偏差为 0.2%。相比于远离简并状态的 OPO,近简并状态稳定工作的单谐振 OPO 产生的信号光和闲频光可以同时抽运串联的二级 ZGP OPO 产生宽带的中红外激光,转换效率得到了极大地提高。

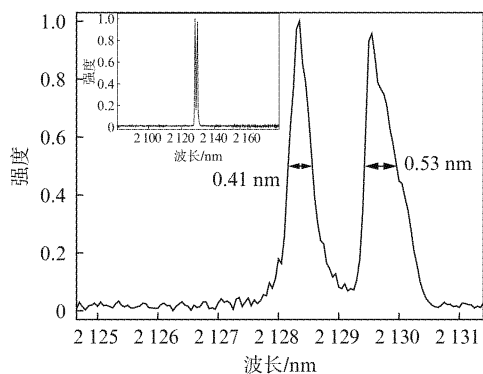


图 4 PPMgLN OPO 的输出频谱,插图为大范围扫描结果

Fig. 4 Output spectra from PPMgLN OPO, inset graph shows the large scale scanning spectrum

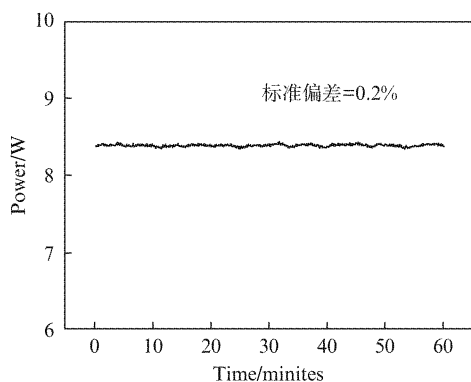


图 5 二次抽运下 2.1 μm 激光输出功率波动测量
Fig. 5 Fluctuations of the 2.1 μm output power in double-pass pump geometry

3 结论

利用线偏振高重复频率的全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源,通过透镜聚焦后抽运 PPMgLN OPO 产生 2.1 μm 激光。PPMgLN OPO 采用四镜驻波腔结构,有效避免了机械限制,实现了对输出参数的调控。最终在二次抽运结构近简并状态下得到最高为 8.4 W 的 2.1 μm 激光输出,转换效率为 48%,总的线宽小于 2 nm,水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 分别为 3.8 和 4.1。与前期报道的工作相比^[11],在保持较好光束质量的同时,功率提高了一倍。考虑到此时

转换效率还未达到最高,若能提高抽运功率或降低阈值,还可以获得更高的效率以及输出功率。

References

- [1] Phua P B, Tan B S, Wu R F, *et al.* High-average-power mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator with a wavelength-dependent polarization rotator [J]. *Opt. Lett.* 2006, **31**(4): 489.
- [2] Lancaster D G. Efficient Nd:YAG pumped mid-IR laser based on cascaded KTP and ZGP optical parametric oscillators and a ZGP parametric amplifier [J]. *Opt. Commun.* 2009, **282**: 272.
- [3] Hirano Y, Yamamoto S, Taniguchi H. Highly efficient and high power 2 μm generation with PPMgLN OPO [C]. CLEO, USA. Baltimore. 2001, **CFH2**: 579.
- [4] Bhushan R, Yoshida H, Tsubakimoto K, *et al.* High efficiency and high energy parametric wavelength conversion using a large aperture periodically poled MgO:LiNbO₃ [J]. *Opt. Commun.* 2008, **281**: 3902.
- [5] Elder I, Legge D, Beedell J, *et al.* Advanced Solid-State Photonics [C]. Optical Society of America, Nevada, 2006, MB20.
- [6] He G Y, Guo J, Jiao Z X, *et al.* Generation of high power and high stability azimuthally polarized beams in a Nd:YAG laser [J]. *Laser Phys.* 2012, **22**(8): 61.
- [7] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M, *et al.* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1995, **12**: 2102.
- [8] Henriksson M, Sjöqvist L, Pasiskevicius V, *et al.* Narrow linewidth 2 μm optical parametric oscillation in periodically poled LiNbO₃ with volume Bragg grating outcoupler [J]. *Appl. Phys. B.* 2007, **86**(3): 497.
- [9] Henriksson M, Sjöqvist L, Ströqvist L, *et al.* Technologies for Optical Countermeasures V [J]. *Proc. SPIE.* 2008, **7115**: 711500.
- [10] Koch P, Ruebel F, Nittman M, *et al.* Narrow-band, tunable 2 μm optical parametric oscillator based on MgO:PPLN at degeneracy with a volume Bragg grating output coupler [J]. *Appl. Phys. B.* 2011, **105**(4): 715.
- [11] He G Y, Guo J, Jiao Z X, *et al.* High-efficiency near-degenerate PPMgLN optical parametric oscillator with a volume Bragg grating [J]. *Opt. Lett.* 2012, **37**(8): 8.
- [12] Hua R Z, Wada S, Tashiro H. Principles and limitations of a quarter-wave plate for reducing the depolarization loss from thermally induced birefringence in Nd:YAG lasers [J]. *Opt. Commun.* 2000, **175**: 189.
- [13] Magni V. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability [J]. *Appl. Opt.* 1986, **25**: 107.
- [14] He G Y, Guo J, Wang B, *et al.* Generation of radially polarized beams based on thermal analysis of a working cavity [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18302.
- [15] Bjorkholm J E. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 1971, **QE-7**: 109.
- [16] Stoepler G, Thilmann N, Pasiskevicius V, *et al.* Tunable Mid-infrared ZnGeP₂ RISTRA OPO pumped by periodically-poled Rb:KTP optical parametric master-oscillator power amplifier [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(4): 4509-17.