

外腔全固态连续波 PPMgLN 光学参量振荡器与受激拉曼散射

姚文明^{1,2,3} 檀慧明^{1,3} 王帆³ 田玉冰³ 崔锦江³ 董宁宁³

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
²中国科学院大学, 北京 100049
³中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

摘要 利用 1064 nm 波长的全固态连续 Nd:YVO₄ 激光器作为抽运源, 采用周期调谐技术, 对 PPMgLN 晶体准相位匹配的全固态连续波光学参量振荡器(CW OPO)宽波段连续调谐输出特性和伴随输出的受激拉曼(Raman)散射进行研究。实验在多周期 PPMgLN 晶体的基础上, 采用连续工作模式、单谐振和外腔结构。实验结果表明, 全固态 CW OPO 实现了信号光在 1435.9~1670.2 nm 近红外波段和闲频光在 4185.0~2970.4 nm 中红外波段连续调谐输出; 在 30.5 μm 周期处, 抽运功率达到 11.79 W 时, 获得最大总输出功率 4.29 W, 光光转换效率达到 36.4%; 在 28.5、30.0、30.5 μm 处同时有受激 Raman 散射光伴随输出; 增加 Raman 散射的损耗, 可以提高 CW OPO 闲频光的输出功率, 在 3451 nm 处获得最大输出功率 1.98 W, 光光转换效率达到 16.8%。实现了外腔式全固态 CW PPMgLN OPO 在信号光和闲频光波段的高功率连续调谐输出, 伴随输出的 Raman 散射对 CW OPO 的闲频光有重要影响。

关键词 激光器; 光学参量振荡器; PPMgLN 晶体; 受激拉曼散射; 连续调谐输出

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202008

Extra-Cavity, All-Solid-State Continuous Wave Optical Parametric Oscillator and Stimulated Raman Scattering in PPMgLN

Yao Wenming^{1,2,3} Tan Huiming^{1,3} Wang Fan³ Tian Yubing³
Cui Jinjiang³ Dong Ningning³

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China
²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China
³Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract The output characteristics and coexistent stimulated Raman scattering of a multi-wavelength tunable optical parametric oscillator (OPO), which is pumped by an all-solid-state Nd:YVO₄ laser with the 1064 nm wavelength, are investigated by quasi-phase-matching period tuning technology. An experiment using the continuous wave (CW) operation mode, single resonant optical parametric oscillator and external cavity structure is carried out based on the PPMgLN crystal. Experimental results indicate that the widely tunable near-infrared spectrum from 1435.9 to 1670.2 nm and mid-infrared spectrum from 4185.0 to 2970.4 nm are obtained. The maximum total signal and idler output power at 30.5 μm poling period is 4.29 W when pump power is 11.79 W, which corresponds to an

收稿日期: 2012-07-13; **收到修改稿日期**: 2012-08-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61007063)和苏州市科技计划应用基础类项目(SYG201022)资助课题。

作者简介: 姚文明(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光与非线性光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: wmyciomp6@yahoo.cn

导师简介: 檀慧明(1954—), 男, 研究员, 主要从事全固态激光器和非线性光学等方面的研究。

E-mail: hmtan2223@yahoo.com.cn(通信联系人)

optical-optical efficiency of 36.4%. Coexistent CW OPO and stimulated Raman scattering (SRS) are demonstrated with 28.5, 30.0 and 30.5 μm poling periods. With the loss of SRS increasing, 1.98 W of the maximum idler output power at 3451 nm is obtained, corresponding to an optical-optical efficiency of 16.8%. An extra-cavity, widely tunable, high power and continuous wave singly resonant CW-PPMgLN-OPO at the signal and idler wavelength is realized, and the coexistent Raman scattering has an important effect on the output of the idler.

Key words lasers; optical parametric oscillator; PPMgLN crystal; stimulated Raman scattering; continuously tunable wavelength

OCIS codes 140.3550; 190.4970; 190.5650

1 引 言

光学参量振荡器是目前产生可调谐激光的重要手段^[1~3], 输出激光波长覆盖可见光到中红外波段, 是光谱测量和光电对抗等领域的重要光源。采用半导体激光抽运的固体激光器作为抽运源的全固态光学参量振荡器(OPO)具有效率高、稳定性高、结构紧凑、体积小和寿命长等优点, 因此, 全固态OPO一直是激光技术的重要研究对象。利用周期极化晶体, 制成准相位匹配的全固态OPO, 通过改变抽运光波长、极化晶体的极化周期、温度以及角度等, 可以实现多波段的可调谐输出, 满足不同的使用需求^[4,5]。连续波光学参量振荡器(CW OPO)由于非线性增益非常低, 对抽运源、谐振腔和非线性晶体要求高, 因此实验中多采用高功率抽运和单谐振结构(SRO)^[6]。2003年 Carleton^[7]报道了一种全固态Nd:YVO₄激光器抽运, 结构紧凑的内腔CW OPO。该系统利用PPRTA作为参量晶体, 获得最高65 mW的3.52 μm 的连续中红外激光输出。2006年 Henderson^[8]采用1083 nm光纤激光器作为抽运源, 实现低阈值、窄线宽、单频的CW OPO运转。在2.8 W的抽运下获得最高750 mW闲频光2.6~3.2 μm 调谐输出。2007年 Samanta等^[9]利用532 nm的Nd:YVO₄激光抽运MgO:sPPLT晶体, 采用环形腔结构, 获得单频、连续波闲频光1140~1417 nm可调谐瓦级输出。2009年 Liu等^[10]采用内腔结构, 利用808 nm激光二极管(LD)抽运Nd:YVO₄作为抽运源和PPLN晶体作为非线性晶体, 实现了Nd:YVO₄/PPLN CW OPO在1.57 μm 处310 mW的信号光输出。2012年 Sheng等^[11]利用880 nm LD抽运, 采用内腔结构, 当抽运功率为21.9 W时, 使CW OPO在3.66 μm 处实现了1.54 W的闲频光输出, 转换效率达到7.0%。同时由于高功率抽运和晶体较高的非线性系数, 一些其他伴随输出的非线性光学现象也逐渐在OPO中被发现。2003年 Pasiskevicius等^[12]在PPKTP OPO中发现受激拉曼(Raman)散射。2005年

McConnell等^[13]在PPLN晶体的倍频实验中发现了受激Raman散射。2009年 My等^[14]在PPSLT OPO中发现了受激Raman散射。2011年 Zhai等^[15]在光纤抽运OPO中发现了反斯托克斯拉曼现象。

本文采用全固态连续Nd:YVO₄激光器的1064 nm波长作为抽运源, 采用键合激光晶体、光学参量变换、准相位匹配(QPM)以及周期调谐技术, 实现了连续模式下外腔单谐振结构的全固态CW PPMgLN OPO, 同时对伴随输出的受激拉曼散射进行了分析。获得了信号光1435.9~1670.2 nm和闲频光4185.0~2970.4 nm波段的宽波段高功率连续调谐输出。同时, 当抽运功率达到一定程度时, 发现了伴随OPO输出受激拉曼散射现象。实验过程中发现拉曼散射对OPO闲频光输出功率有重要影响。通过增加受激拉曼散射在OPO谐振腔内的损耗, 提高受激拉曼散射的振荡阈值, 使OPO闲频光在3451 nm处功率达到1.98 W, 光-光转换效率达到16.8%。

2 实验装置

实验装置如图1所示。将半导体激光器阵列(LDA)输出的808 nm激光通过双平凸镜的光学耦合系统聚焦到Nd:YVO₄晶体内部, 进而使其输出波长为1064 nm的激光作为OPO的抽运源。为了尽量减小热透镜效应, 实验采用离子键合的YVO₄/Nd:YVO₄晶体作为激光晶体^[16]。Nd³⁺掺杂原子分数为0.5%, 尺寸为3 mm×3 mm×10 mm, 其中2 mm未掺杂Nd³⁺, 8 mm掺杂Nd³⁺, 用铝箔包裹后安装在铜基座上, 利用半导体制冷器制冷, 使Nd:YVO₄晶体具有良好的散热和温度控制。晶体左端镀有808 nm增透和1064 nm高反的多层介质膜作为激光器谐振腔的输入镜M1, 另一端镀1064 nm的增透膜, 激光器谐振腔的输出镜M2采用的是1064 nm部分反射的平面镜。Nd:YVO₄激光器的1064 nm输出光经焦距为50 mm的耦合透镜耦合进OPO系统, 实现抽运光与振荡光的模式匹配。

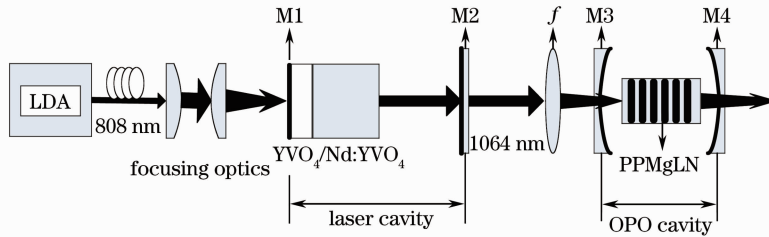


图 1 CW PPMgLN OPO 实验装置图

Fig. 1 Experimental configuration of CW PPMgLN OPO

实验中 CW OPO 采用的是单谐振(SRO)和双程抽运的双凹谐振腔结构。OPO 谐振腔由两个平凹镜 M3、M4 组成,其曲率半径均为 100 mm。其中输入镜 M3 镀有对抽运光 1064 nm 高透,信号光 1400~1700 nm 和闲频光 3100~4200 nm 高反的多层介质膜;输出镜 M4 镀有抽运光高反,信号光反射率约为 90%,闲频光高透的多层介质膜。有研究发现,通过在 PPLN 中掺入适量 MgO 可以极大地降低晶体的矫顽电场,同时抗光损伤阈值提高了 100 倍,有效提高了晶体材料的抗光损伤能力,实现了在常温条件下的非线性光学频率变换^[17,18]。台湾 HC PHOTONICS 公司提供的 PPMgLN 晶体的尺寸为 40 mm×8.2 mm×1 mm,掺杂了原子数分数 5% 的 MgO,沿 Z 轴方向极化。晶体两端镀有 1064/1400~1700/3200~4300 nm 增透膜,极化周期为 28.5~31.5 μm,相邻周期间距为 0.5 μm。在实验中,将 PPMgLN 晶体用铝箔包裹后安装到铜基座上,然后把铜基座固定在平移平台上进行平移控制,实现 CW PPMgLN OPO 的宽波段可调谐输出。实验中未对 PPMgLN 晶体进行精确温度控制。采用 OPHIR 公司生产的 L50(300)A-ROHS 功率计测量 OPO 输出功率。采用 OCEAN OPTICS 公司生产的 NIRQUEST512 型近红外光纤光谱仪对输出光谱进行测量。

3 实验结果和分析

3.1 OPO 的输出特性

采用 808 nm 半导体激光器阵列抽运的 Nd:YVO₄ 激光器的输出特性如图 2 所示。Nd:YVO₄ 激光器斜率效率达到 56.4%。图 3 是在抽运功率为 8.27 W,室温为 22.4 °C 时测得的信号光实验数据及对应的闲频光计算数据与相应的准相位匹配周期调谐理论计算结果比较图,结果显示二者相符。从图中可以看出,此 OPO 系统可以实现近红外 1435.9~1670.2 nm 和中红外 4185.0~2970.4 nm

宽波段连续调谐输出。

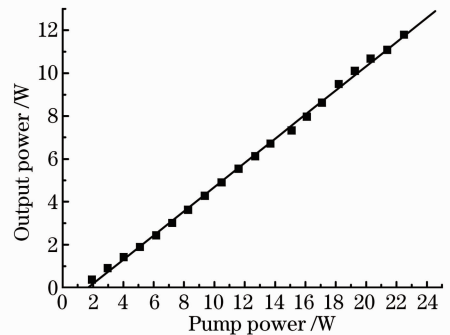


图 2 1064 nm 波长输出功率

Fig. 2 Output power of 1064 nm

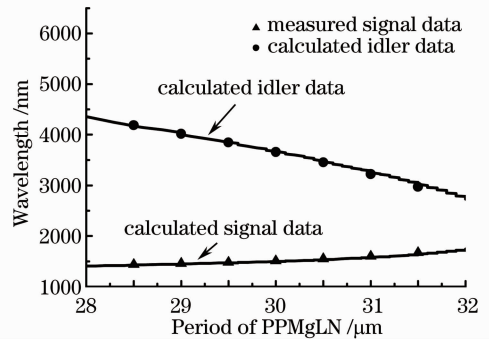


图 3 工作温度为 22.4 °C 时,OPO 调谐曲线随周期的变化

Fig. 3 Tuning curves of OPO system versus period of PPMgLN crystal at temperature of 22.4 °C

图 4 是各周期在室温 22.4 °C 时 OPO 总的最大输出功率曲线,不同周期对应的输出功率有很大区别,最大可达 4.29 W,而最小仅为 0.99 W。图 5 是当室温为 22.4 °C 时,在 30.5 μm 周期处测得的功率输出特性曲线。数据显示抽运功率为 11.79 W 时输出总功率最大达到 4.29 W,光-光转换效率达到 36.4%。信号光 1548 nm 和闲频光 3451 nm 处的功率分别为 3.14 W 和 1.15 W。

3.2 受激 Raman 散射及其对 OPO 的影响

图 6 是抽运功率为 10.1 W 时记录的各个周期的输出光谱曲线,从图中可以看出在 28.5、30.0 和

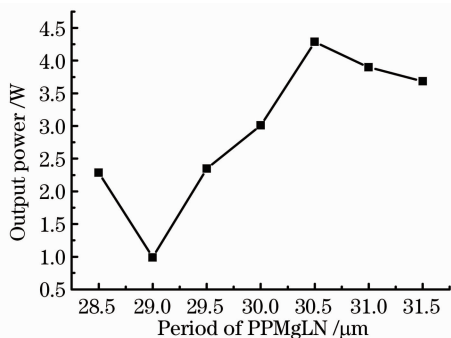


图 4 当抽运功率为 11.79 W 时 PPMgLN 晶体各个周期对应的输出功率

Fig. 4 Output power versus period of PPMgLN crystal with pump power of 11.79 W

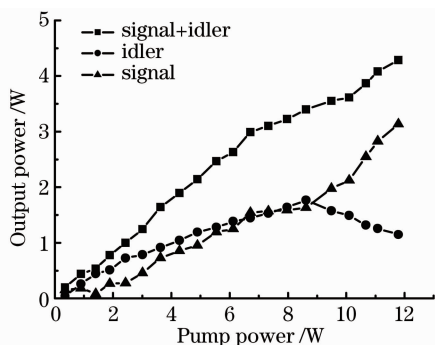


图 5 极化周期为 30.5 μm, 工作温度为 22.4 °C 时 OPO 的输出功率曲线

Fig. 5 Output powers of CW PPMgLN OPO with temperature of 22.4 °C and poling period of 30.5 μm

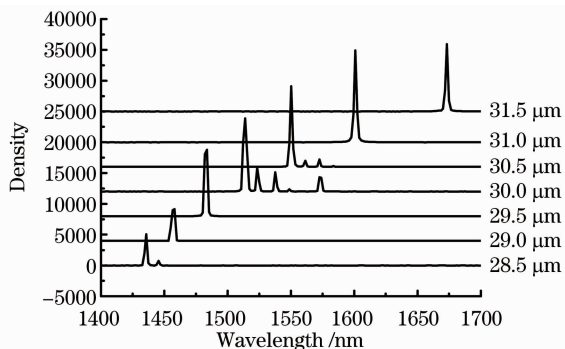


图 6 抽运功率为 10.1 W, 工作温度为 22.4 °C 时 OPO 的 7 个极化周期的输出光谱曲线

Fig. 6 Spectra of CW PPMgLN OPO's seven different poling periods with pump power of 10.1 W, and temperature of 22.4 °C

30.5 μm 这 3 个周期存在明显的拉曼散射现象, 未观察到反斯托克斯现象。为了深入研究受激拉曼散射对 OPO 的影响, 对输出功率最高的 30.5 μm 周期做了进一步实验研究。

图 7 记录的是抽运功率分别为 2.43、9.49 和

11.79 W 时, OPO 在 30.5 μm 周期下输出的信号光光谱。从图中可以看出在 2.43 W 时出现一阶斯托克斯频移 39.3 cm⁻¹, 随着抽运功率增加到 9.49 W 时出现二阶斯托克斯频移 90.7 cm⁻¹。这些频移量与文献[19]中报道的 LiNbO₃ 晶体中的数值大致相同但仍有区别, 分析认为这与在制作 PPMgLN 晶体时加入 MgO 和一些其他人为因素有关。在抽运功率达到 11.79 W 时未观察到更高阶斯托克斯频移, 但一阶和二阶斯托克斯线的相对强度都有很大提高。以上现象说明, 随着抽运功率的提高, OPO 中伴随出现的受激拉曼散射也达到振荡阈值形成一阶斯托克斯线。随着抽运功率进一步增加, 一阶斯托克斯线的功率增大到最大值, 在稳定后将能量向二阶斯托克斯线转移形成二阶斯托克斯线在 OPO 谐振腔中的振荡并输出。从图 5 中的闲频光输出特性可以发现, 闲频光在初期阶段随着抽运光的功率的提高, 输出功率增长很快, 当抽运功率达到 2.43 W 后, 一阶斯托克斯线形成振荡输出, 此时闲频光功率仍然在逐渐提高, 但增幅放缓。当抽运光功率达到 9.49 W 后, 二阶斯托克斯线形成振荡输出, 而闲频光功率开始逐渐下降。同时发现随着抽运功率的增加, 信号光的输出波长也略有增加, 分析认为这是由于晶体吸收闲频光导致温度升高而引起的。由于介质的能级跃迁、分子振动、转动和各类元激发的微观运动都可能会对介质的拉曼散射起作用, 因此分析认为, OPO 的这种输出特性与材料本身的特性有关, 即与实验采用的 PPMgLN 晶体对 3451~3657 nm 和 4185 nm 附近波段闲频光的吸收而相应产生的光学分支声子有关; 同时也与 OPO 谐振腔对拉曼散射相关波长的响应有关。

图 8 为实验中通过调节 OPO 输出镜 M4 增大受激拉曼散射在 OPO 谐振腔中的损耗, 提高受激拉曼散射振荡阈值后测得的 OPO 输出功率曲线。实验中发现拉曼散射一阶斯托克斯线阈值提高到 4.9 W, 并且随着抽运功率增加到 11.79 W, 只观察到一阶斯托克斯谱线相对强度的增强, 没有再发现二阶斯托克斯线, 如图 9 所示。相应的闲频光功率在抽运功率达到 4.9 W 后一直缓慢增加, 达到一定值后下降的情况没有再次发生。此时, 总输出功率达到 4.18 W, 信号光在 1548 nm 处功率达到 2.2 W, 闲频光在 3451 nm 处功率增加到 1.98 W, 闲频光输出功率及转换效率相对文献[11]均有较大提高。

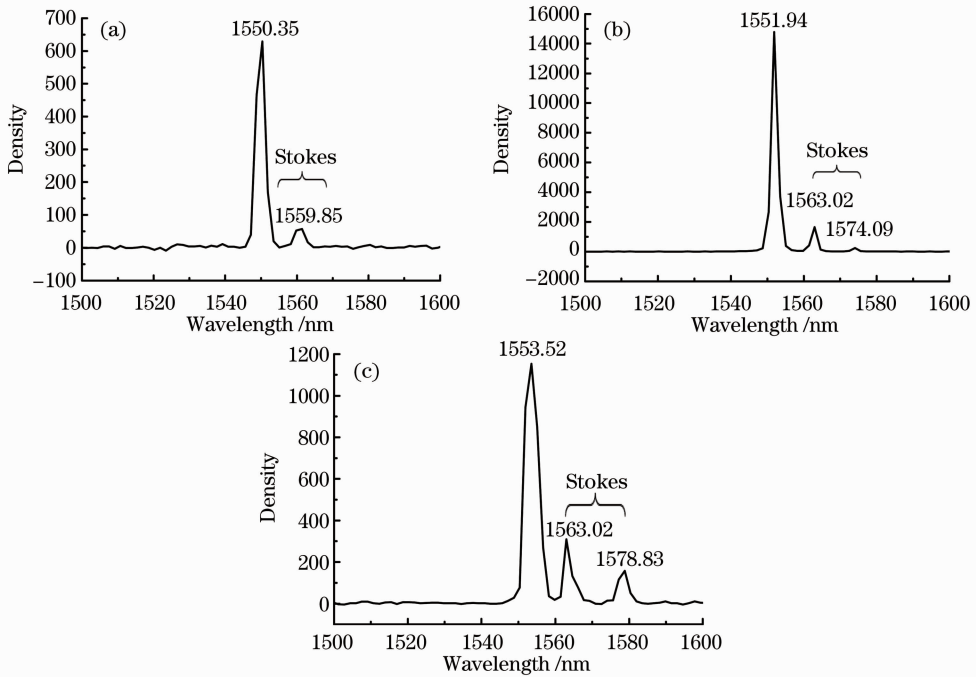


图 7 极化周期为 $30.5 \mu\text{m}$ 时,不同抽运功率下,OPO 和拉曼输出光谱。(a)抽运功率为 2.43 W ;
(b)抽运功率为 9.49 W ;(c)抽运功率为 11.79 W

Fig. 7 Spectra of combined OPO and Raman oscillation at different pump powers with a $30.5 \mu\text{m}$ poling period.

(a) Pump power of 2.43 W ; (b) pump power of 9.49 W ; (c) pump power of 11.79 W

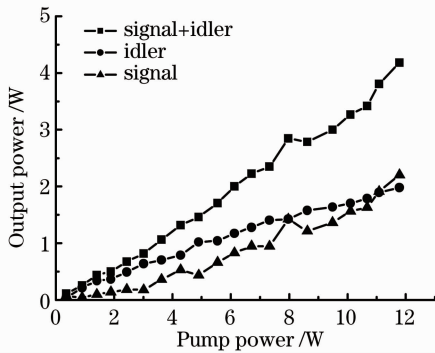


图 8 极化周期为 $30.5 \mu\text{m}$,工作温度为 $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,
调整 OPO 输出镜后的输出功率曲线

Fig. 8 Output powers of CW PPMgLN OPO by adjusting output coupler with temperature of $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ and poling period of $30.5 \mu\text{m}$

可以看出,受激拉曼散射的存在对单谐振 CW PPMgLN OPO 的输出特性有很大的影响。通过适当增加 OPO 谐振腔的腔长,提高输出镜 M4 对闲频光的透射率和微调输出镜 M4 的角度等方法,有利于提高受激拉曼散射在 OPO 谐振腔中的损耗,将有助于增加受激拉曼散射的振荡阈值,提高信号光向闲频光的转换效率而减少能量向受激拉曼散射的转移,从而可以进一步提高外腔式单谐振 CW PPMgLN OPO 在中红外波段的输出功率。

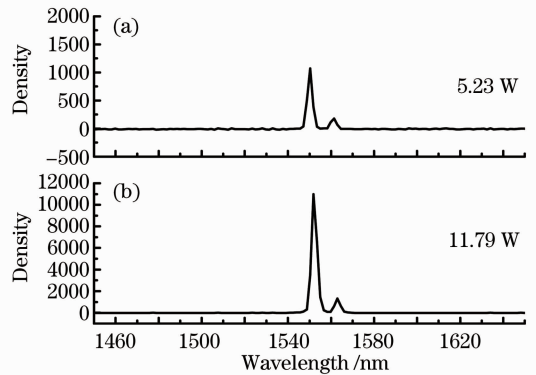


图 9 极化周期为 $30.5 \mu\text{m}$ 时,不同抽运功率下,OPO 和拉曼输出光谱。(a)抽运功率为 4.9 W ;(b)抽运功率为 11.79 W

Fig. 9 Spectra of combined OPO and 拉曼 oscillation at different pump powers with a $30.5 \mu\text{m}$ poling period by adjusting output coupler. (a) Pump power of 4.9 W ; (b) pump power of 11.79 W

4 结 论

实验表明,采用半导体激光器抽运的单谐振全固态 OPO,在连续模式和外腔结构的条件下,基于 PPMgLN 晶体的准相位匹配技术和周期调谐技术,同样可以使 CW OPO 在近红外和中红外波段实现宽波段高功率连续调谐输出。CW PPMgLN OPO

输出波段覆盖 1435.9~1670.2 nm 和 4185.0~2970.4 nm, 输出总功率最高达到 4.29 W, 相应的光光转换效率达到 36.4%。不过, 当抽运功率达到一定程度时, 在 28.5、30.0 和 30.5 μm 3 个周期均发现伴随输出的受激拉曼散射现象, 受激拉曼散射对 OPO 光谱纯度和闲频光输出功率有重要影响。通过适当调整 OPO 输出镜, 可以有效提高受激拉曼散射的振荡阈值, 从而使闲频光在 3451 nm 处的输出功率增加到 1.98 W, 相应的光-光转换效率达到 16.8%。

致谢 感谢厦门理工学院林洪沂老师给予的热心帮助, 感谢中国科学院苏州生物医学工程技术研究所医用激光实验室高静、张龙及其课题组成员为本实验提供的光学检测仪器。

参 考 文 献

- 1 S. Bisson, K. Armstrong, T. J. Kulp *et al.*. Broadly tunable, mode-tuned CW optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40** (33): 6050~6054
- 2 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Multi-grating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO₃[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 591~593
- 3 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Tunability and tolerance of optical parametric oscillator in periodically poled lithium niobate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51** (11): 2528~2534
薛挺, 于建, 杨天新等. 周期极化铌酸锂晶体光参量振荡调谐与容差特性分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(11): 2528~2534
- 4 Ji Feng, Lu Rongsheng, Li Baosheng *et al.*. Angle-tuned dual signal quasi-phase matching optical parametric generator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 358~361
纪峰, 卢荣胜, 李保生等. 角度调谐双信号光运转准相位匹配光学参量的产生[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 358~361
- 5 Pu Zhao, Baigang Zhang, Enbang Li *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
- 6 S. E. Harris. Tunable optical parametric oscillators[C]. IEEE, 1969, **57**(12): 2096~2113
- 7 A. Carleton, D. J. M. Stothard, I. D. Lindsay *et al.*. Compact, continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled RbTiOAsO₄ in a Nd:YVO₄ laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(7): 555~557
- 8 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
- 9 G. K. Samanta, G. R. Fayaz, M. Ebrahim-Zadeh. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32** (17): 2623~2625
- 10 Jianli Liu, Yongmin Li, Qin Liu *et al.*. Continuous-wave, single-frequency intracavity singly resonant optical parametric oscillator at 1.5 μm wavelength [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7** (3): 244~245
- 11 Quan Sheng, Xin Ding, Chunpeng Shi *et al.*. Continuous-wave mid-infrared intra-cavity singly resonant PPLN-OPO under 880 nm in-band pumping [J]. *Opt. Express*, 2012, **20** (7): 8041~8046
- 12 V. Pasiskevicius, A. Fragemann, F. Laurell *et al.*. Enhanced stimulated Raman scattering in optical parametric oscillators from periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 325~327
- 13 G. Mcconnell, A. I. Ferguson. Simultaneous stimulated Raman scattering and second harmonic generation in periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2099~2104
- 14 T. H. My, O. Robin, O. Mhibik *et al.*. Stimulated Raman scattering in an optical parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped stoichiometric LiTaO₃ [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5912~5918
- 15 Yanhua Zhai, C. Goulart, J. E. Sharping *et al.*. Multimodal coherent anti-Stokes Raman spectroscopic imaging with a fiber optical parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(19): 1911061
- 16 Li Mingzhen, Zhu Zhanshou. Diode-end-pumped Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal lasers [J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2007, **14**(5): 33~36
李明真, 朱占收. 激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体激光器热效应研究[J]. *东莞理工学院学报*, 2007, **14**(5): 33~36
- 17 Yang Jian, Li Xiaoqin, Yao Jianquan *et al.*. High-power temperature-tunable periodically-poled lithium niobate optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (10): 1459~1462
杨剑, 李晓芹, 姚建铨等. 基于周期极化铌酸锂晶体的高功率可调谐光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1459~1462
- 18 Yao Jianghong, Xue Liangping, Yan Boxia *et al.*. Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO₃ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 209~213
姚江宏, 薛亮平, 颜博霞等. 周期极化铌酸锂掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 209~213
- 19 D. C. Deshpande, A. P. Malshe, E. A. Stach *et al.*. Investigation of femtosecond laser assisted nano and microscale modifications in lithium niobate [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(7): 074316

栏目编辑: 宋梅梅