

PPMgLN中红外宽调谐脉冲光参变振荡器

林洪沂^{1,2} 黄晓桦^{1,2} 许英朝^{1,2} 朱文章^{1,2}

¹厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024

²福建省高校光电技术重点实验室, 福建 厦门 361024

摘要 采用半导体激光器(LD)端面抽运声光调Q的Nd:YVO₄激光器做为抽运源,选用周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体(PPMgLN),通过优化抽运光光束质量和模式匹配,获得了中红外光参变振荡器。实验发现,对于确定的LD抽运功率,当重复频率较小,输出功率随着重复频率的增加而增加,但是达到某一重复频率时,输出功率便随着重复频率的增加而减少。改变PPMgLN晶体的周期,实现了中红外2.95~4.16 μm宽带调谐。

关键词 激光器;光参变振荡器;中红外激光;可调谐激光器;PPMgLN晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021402

Mid-infrared Tunable Pulsed Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN

Lin Hongyi^{1,2} Huang Xiaohua^{1,2} Xu Yingchao^{1,2} Zhu Wenzhang^{1,2}

¹*School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Fujian Province University, Xiamen, Fujian 361024, China*

Abstract An acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser end-pumped by laser diode (LD) is used as the pump source, and a MgO-doped PPLN (PPMgLN) is chosen as nonlinear crystal. By optimizing the pump beam quality and mode matching, a mid-infrared pulsed optical parametric oscillator (OPO) is realized. In the experiment, if laser diode (LD) pump power is determined, mid-infrared laser output power is changed by the repetition frequency of the acousto-optic switch. When the repetition rate is small, the output power increases as the repetition rate increases. But when the repetition rate reaches a certain value, output power decreases as the repetition frequency increases. The optical parametric oscillator could be tuned from 2.95~4.16 μm by changing the period of PPMgLN.

Key words lasers; optical parametric oscillator; mid-infrared laser; tunable laser; PPMgLN crystal.

OCIS codes 140.3580; 140.3600; 190.4360

1 引言

光参变振荡器(OPO)是利用晶体(如双折射晶体KTA、LBO、KTP,周期性极化晶体PPLN、PPKTA等)的非线性效应来实现频率变换的重要方法。相对于其他的可调谐激光器(如染料激光器、Ar³⁺激光器、钛蓝宝石激光器、Tm:YAG激光器等),OPO在调谐范围、效率和性能结构等方面,都有很强的竞争力,可以广泛地应用于遥感、差分吸收雷达、光电对抗、光谱分析各个领域^[1-4]。

近几年,准相位匹配非线性晶体的出现极大地推动了OPO技术的发展^[5-6]。准相位匹配技术可以利用晶体最大非线性系数,消除光束间的走离效应,极大地降低了OPO阈值,提高了输出功率和转化效率。目前,实现中红外激光输出最常见晶体为PPLN、PPLT、PPRTA、PPKTP、PPMgLN等。与PPLN相比,PPMgLN

收稿日期: 2014-08-21; 收到修改稿日期: 2014-09-13; 网络出版日期: 2015-01-15

基金项目: 福建省教育厅A类科技项目(JA12248, JA13231)、国家自然科学基金(111304259)

作者简介: 林洪沂(1982—),男,博士,副教授,主要从事全固态激光与非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: linyi0714@163.com

有更强的抗光折变损伤能力,在室温即可实现高效率激光输出^[7-9]。2011年,夏林中等^[7]以1.064 μm声光调Q的Nd:YAG激光器作为抽运源,获得了输出功率约1 W的3.365 μm闲频光输出,光-光转换效率达27%,其重复频率为10 kHz。2012年,吴羽等^[8]采用声光调Q的Nd:YVO₄激光作为抽运源,获得了3.2 W的2 μm中红外激光输出,但是其重复频率仅仅限制在20 kHz。2013年,彭珏等^[9]采用重复频率为8 kHz的声光调Q的Nd:YAG激光器抽运PPMgLN晶体,获得了5 W的2.765 μm中红外激光。本文采用PPMgLN晶体实现了中红外脉冲激光输出,并重点研究了不同重复频率的输出特性。

2 实验设计

要想实现OPO的低阈值和高效率运转,必须精心设计优化实验装置。

2.1 采用键合晶体改善抽运源光束质量

本实验采用两端键合的激光晶体,可以有效地缓解热透镜效应。相对于传统的均匀掺杂激光介质,键合晶体的两端部分没有掺杂Nd³⁺,减弱了原端面因为吸热而产生的热透镜效应。据Lucianetti报道,采用键合晶体,热应力和峰值温度可以减少近70%。

2.2 聚焦参数的选择

谐振腔的共焦参数 b 对于优化光束聚焦,抽运光束和输出光空间模式的模式重叠有重要作用,共焦参数严重影响光参变增益和振荡阈值^[4]。

对于双镜对称腔,若腔镜的曲率半径为 r ,谐振腔有效长度为 L_{eff} ,则共焦参数 b 为

$$b = \sqrt{2L_{\text{eff}}(2r - L_{\text{eff}})}, \quad (1)$$

式中 $L_{\text{eff}} = L_{\text{geo}} - L_c + \frac{L_c}{n}$, L_{geo} 为谐振腔几何长度, L_c 、 n 分别为PPMgLN晶体长度与折射率。

聚焦参数为 $\xi = L_c/b$ 。增加 ξ 值,可以有效地减少阈值,但是会引起输出功率的不稳定性。由(1)式可知,减小OPO谐振腔腔镜的曲率半径 r 可以增加聚焦参数的值。本实验采用 $\xi = 0.3$ 。

2.3 模式匹配

要想降低阈值提高效率,必须要满足抽运光和谐振光之间的模式匹配^[6]。通过聚焦参数 b ,可以计算出信号光的光腰尺寸为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b\lambda}{2\pi}}. \quad (2)$$

1064 nm抽运光经焦距为 f 聚焦镜聚焦后,焦点处抽运光的光斑尺寸为

$$\omega_p = \frac{f\lambda_p}{D}, \quad (3)$$

式中 D 为聚焦镜处的光斑大小, λ_p 为抽运光波长,通过调整耦合镜的位置,可以改变抽运光斑的大小。

3 实验装置

根据理论分析,如图1所示采用外腔单谐振结构。OPO抽运源为半导体激光器(LD)端面抽运1064 nm声光调Q的Nd:YVO₄激光器。LD中心波长为809.1 nm。激光介质的掺杂原子数分数为0.5%、切割方向为 α 、键合晶体为YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄(3 mm×4 mm×3 mm)。声光Q开关重复频率4~50 kHz可调。

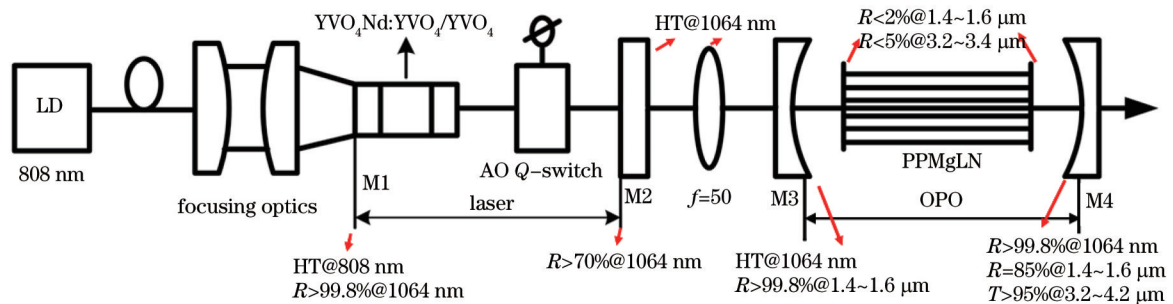


图1 基于PPMgLN脉冲OPO示意图

Fig.1 Setup of the pulsed OPO based on PPMgLN

OPO谐振腔是由平凹镜 M3(K9玻璃, 曲率半径 200 mm)和平凹镜 M4(CaF₂衬底, 曲率半径 200 mm)构成, 腔长为 60 mm。PPMgLN 晶体厚度为 10 mm, 长度为 45 mm, 在 28.5~31.5 μm 共有 7 个极化周期, 间隔为 0.5 μm。PPMgLN 晶体固定在平移平台上, 通过平台的移动, 可以改变晶体周期, 以实现闲频光调谐。经计算信号光 1.5 μm 的谐振腔光腰尺寸为 196 μm。将透镜放置在 D 大约为 0.3 mm 处, 经计算 $\omega_p = 178 \mu\text{m}$ 。OPO 输入镜 M3 为平凹镜, 对抽运光有一定的扩散作用, 可以实现模式匹配。非线性晶体也会改变光腰的位置, 但不会改变光斑大小。

4 OPO 的输出特性

4.1 1064 nm 抽运光的输出特性

图 2 给出了 1064 nm 抽运光输出功率与单脉冲能量同重复频率的变化关系, 在 LD 抽运功率相同(8、10、16 W)时, 1064 nm 抽运光的输出功率随着重复频率的增加而增加, 最后逐渐趋于饱和; 单脉冲能量随着重复频率的增加而减少, 最后逐渐趋于饱和。

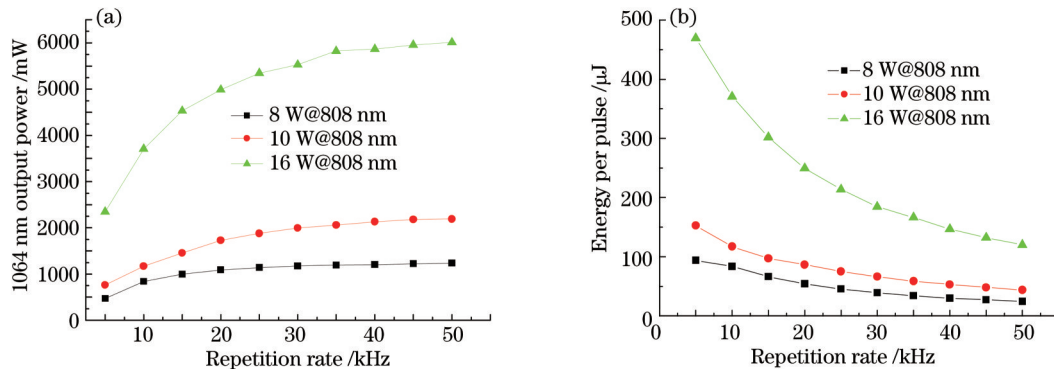


图 2 (a) 1064 nm 平均输出功率与重复频率的关系; (b) 单脉冲能量与重复频率的关系

Fig.2 (a) Output power at 1064 nm versus the repetition frequency; (b) energy per pulse versus the repetition frequency

4.2 OPO 输出功率

当 LD 功率分别为 8、10、16 W, PPMgLN 极化周期为 30 μm 时, 分别测量了不同重复频率下闲频光(3.61 μm)的输出功率。

如图 3 所示, 对于确定的抽运功率, 中红外激光的输出功率与重复频率有很大关系。开始时, 输出功率随着重复频率的增加而增加, 达到某一重复频率时, 输出功率便随着重复频率的增加而减少。即对于一确定抽运功率, 声光 Q 开关存在一最佳重复频率。这主要是声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 抽运源决定的^[11]。当重复频率过低, 1064 nm 基频激光的平均输出功率下降, 导致光参变转换效率下降, 闲频光输出平均功率下降; 而重复频率过高时, 1064 nm 基频激光的单脉冲能量和峰值功率下降, 又会导致光参变转化效率下降, 闲频光输出功率降低。

当 LD 抽运功率为 8 W、单脉冲能量为 66.5 μJ、重复频率为 15 kHz 时, 可以获得 207.2 mW 中红外激光, 单脉冲能量为 13.8 μJ; LD 抽运功率为 10 W、单脉冲能量为 75.2 μJ、重复频率为 25 kHz 时, 可以获得 321.9 mW 中

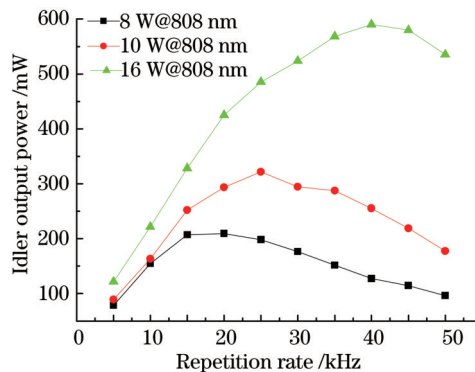


图 3 闲频光输出功率与重复频率的关系

Fig.3 Idler output power versus the repetition frequency

红外激光,单脉冲能量为 12.9 μJ ;LD 抽运功率为 16 W、单脉冲能量为 146.8 μJ 、重复频率为 40 kHz 时,可以获得 590.0 mW 中红外激光,单脉冲能量为 14.8 μJ 。

在重复频率为 20 kHz、极化周期为 30 μm 时,测量了闲频光与抽运光的关系,OPO 阈值为 4 W。在抽运光为 20 W 时,可以获得 537 mW 中红外脉冲激光输出,如图 4 所示。

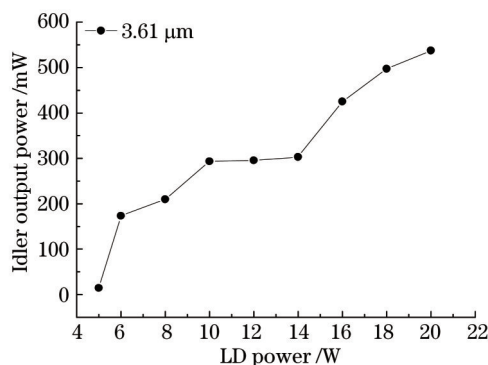


图 4 OPO 闲频光输出功率与 LD 抽运光功率关系

Fig.4 OPO idler output power versus the LD pump power

4.3 OPO 输出波长

通过改变 PPMgLN 晶体的周期,室温下可以实现 2.95~4.16 μm 中红外激光宽带调谐。如图 5 所示,实际测量与理论非常吻合。

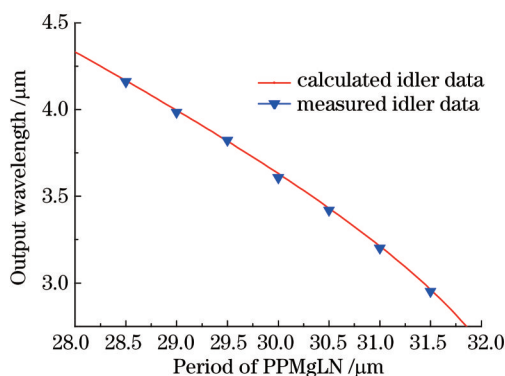


图 5 闲频光的波长与 PPMgLN 晶体极化周期的关系

Fig.5 Idler output wavelength versus the polarization period of the PPMgLN crystal

当 PPMgLN 周期为 30 μm 时,闲频光 3.61 μm 的光谱宽度约为 19 nm,根据信号光与抽运光的和频光光谱宽度可以近似计算出信号光的光谱宽度小于 5 nm。

4.4 OPO 输出脉宽

由于没有高速响应的中红外探测器,只能通过检测 1.064 μm 抽运光和 1.51 μm 信号光的脉冲宽度来分析中红外波段的脉冲宽度。在重复频率为 20 kHz 和抽运光为 20 W 时,测量了 1.064 μm 抽运光和 1.51 μm 信号光的脉冲宽度。抽运光脉宽为 24 ns,信号光脉宽为 10.6 ns。

根据 OPO 理论,信号光子和闲频光子是成对产生的,即在有信号光子的地方就会有闲频光子存在。另一方面,Debuisschert^[12]指出,对于信号光单谐振 OPO,闲频光的输出特性完全由基频光场和信号光场决定。因此,可推知闲频光应该与信号光具有相同的脉冲特性,所以中红外激光的脉冲宽度为 10.6 ns,峰值功率为 2.5 kW。

5 结 论

采用 LD 端面抽运的声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器与 PPMgLN 非线性晶体,获得了中红外光参变激光输出。实验表明,对于确定的 LD 抽运功率,中红外激光的输出功率对应一最佳重复频率,且最佳频率会随着抽运功率的增加而增加。当 LD 抽运功率为 16 W,重复频率为 40 kHz 时,可以获得 590.0 mW 中红外脉冲激

光。改变 PPMgLN 晶体的周期,可以实现 2.95~4.16 μm 中红外激光宽带调谐。

通过简单改变重复频率、抽运功率和 PPMgLN 周期,即可改变脉冲激光器的输出特性(输出功率,脉冲宽度,峰值功率以及波长)以满足不同的实际需要。

参考文献

- 1 Lin Hongyi, Meng Xianguo, Huang Xiaohua, *et al.*. Realization of quasi-phase-matched tunable single-frequency optical parametric oscillator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060005.
林洪沂, 孟宪国, 黄晓桦, 等. 基于准相位匹配的可调谐单频光学参变振荡器的实现方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060005.
- 2 G K Samanta, M Ebrahim-Zadeh. Continuous-wave singly-resonant optical parametric oscillator with resonant wave coupling [J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 6883-6888.
- 3 Markku Vainio, Mikael Siltanen, Jari Peltola, *et al.*. Continuous-wave optical parametric oscillator tuned by a diffraction grating [J]. *Opt Express*, 2009, 17(9): 7702-7707.
- 4 Markku Vainio, Jari Peltola, Stefan Persijn, *et al.*. Singly resonant CW OPO with simple wavelength tuning [J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11141-11146.
- 5 Shoutai Lin, Yenyin Lin, T D Wang, *et al.*. Thermal waveguide OPO [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1323-1329.
- 6 Breunig I, Haertle D, Buse K. Continuous-wave optical parametric oscillators: recent developments and prospects [J]. *Appl Phys B*, 2011, 105(1): 99-111.
- 7 Xia Linzhong, Su Hong, Guan Mingxiang, *et al.*. Temperature tunable optical parametric oscillator based on MgO-doped PPLN [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2011, 28(5): 405-409.
夏林中, 苏红, 管明祥, 等. 温度调谐的周期极化掺氧化镁铌酸锂振荡器[J]. *深圳大学学报理工版*, 2011, 28(5): 405-409.
- 8 Wu Yu, Jiao Zhongxing, He Guangyuan. Near infrared optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO₃ [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 061403.
吴羽, 焦中兴, 何广源. 近红外掺镁周期极化铌酸锂光参变振荡器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 061403.
- 9 Peng Jue, Wang Weimin, Peng Yuefeng, *et al.*. Optical parametric amplifier based on PPMgO:CLN [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602004.
彭珏, 王卫民, 彭跃峰, 等. 基于 PPMgO:CLN 的光参量放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602004.
- 10 Antonio Lucianetti, Rudolf Weber, Walter Hodel, *et al.*. Beam-quality improvement of a passively Q-switched Nd:YAG laser with a core-doped rod [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(9): 1777-1783.
- 11 Chen Huibin, Zhu Haiyong, Zhang Ge, *et al.*. LD end-pumped Q-switched Nd:YVO₄/KTA optical parametric oscillator laser at 1.53 μm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 229-232.
陈慧彬, 朱海永, 张戈, 等. LD 端面泵浦声光调 Q Nd:YVO₄/KTA 1.53 μm 光学参量振荡激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(2): 229-232.
- 12 T Debuisschert, J Raffy, J P Pocholle, *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime [J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13(7): 1569-1587.

栏目编辑: 张雁