

紧凑型 MgO:PPLN 宽波段可调谐连续光参量振荡器

张永昶, 朱海永, 张 静, 郭俊宏, 张 栋, 段延敏

(温州大学 物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 报道了基于掺 MgO 周期极化铌酸锂(MgO:PPLN)晶体的可调谐连续光参量振荡器。该光参量振荡激光器采用了多周期可调谐的 MgO:PPLN 作为非线性光学晶体, Nd:YVO₄ 为激光晶体的紧凑型半导体激光端面抽运直线腔系统。实验中采用的 MgO:PPLN 晶体包含 28.5~31.5 μm 之间的 7 个极化周期, 相邻极化周期的间隔为 0.5 μm。通过调节 7 个极化周期实现信号光波长 1.43~1.67 μm 和闲频光波长 2.93~4.16 μm 的激光调谐输出。对同一温度下不同极化周期对应的输出波长进行理论计算, 与实验结果符合较好。对比分析了输出功率随着不同极化周期和抽运功率的变化关系。当半导体激光入射抽运功率为 15.4 W, 在 31 μm 极化周期和 35 °C 的控制温度下, 最高获得了 2.94 W 的 1 595 nm 信号光和 1.45 W 的 3 190 nm 闲频光, 对应的光光转换效率达 28.5 %。

关键词: 光参量振荡器; MgO:PPLN 晶体; 准相位匹配; 中红外激光

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105008

Compact widely tunable continuous-wave MgO:PPLN optical parametric oscillator

Zhang Yongchang, Zhu Haiyong, Zhang Jing, Guo Junhong, Zhang Dong, Duan Yanmin

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: A compact, intra-cavity widely tunable continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator (SR-OPO) was reported based on a MgO-doped periodically poled lithium niobate (MgO:PPLN). A diode-pumped Nd:YVO₄ laser at 1 064 nm was employed as the pump source of this SR-OPO with a compact linear cavity. The MgO:PPLN crystal used contained seven different periodically poled gratings from 28.5 to 31.5 μm with a step of 0.5 μm between the neighbor periods. The output wavelenghtes at the different grating periods of MgO:PPLN crystal was measured, which was well matched with the theoretical value. The widely tunable SR-OPO output signal wavelength range from 1.43 to 1.67 μm and idler wavelength range from 2.93 to 4.16 μm were achieved. The output power as the function of grating periods and pump power was investigated. Under an incident pump power of 14.5 W, a maximum signal output power of 2.94 W at 1 595 nm and an idler output power of 1.45 W at 3 190 nm were obtained with the temperature controlled at 35 °C and the period set at 31 μm. The diode to OPO total output conversion efficiency reached 28.5%.

Key words: optical parametric oscillator; MgO:PPLN crystal; quasi-phase-matching; mid-infrared laser

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61505147); 浙江省公益技术应用研究计划(2015C34017, 2017C3400); 温州大学研究生创新基金(3162016030)

作者简介: 张永昶(1993-), 男, 硕士生, 主要从事新型固体激光器方面的研究。Email: yczhang@stu.wzu.edu.cn

导师简介: 朱海永(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事固体激光及非线性光学方面的研究。Email: hyzhu@wzu.edu.cn

0 引言

光参量振荡(OPO)是获得普通固体激光器难以实现的特殊波长和可调谐激光的重要技术手段^[1]。其中,基于周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)的准相位匹配 OPO 是获得中红外波段可调谐激光的主要途径。基于 PPLN 的 OPO 利用准相位匹配技术,经过周期性地改变铌酸锂晶体的二阶非线性极化率方向,补偿了相位失配,有效地避免了空间走离效应^[2-3]。20 世纪 90 年代,PPLN 晶体被成功制作出来,其性能表明该晶体具有透射范围宽,非线性系数高等优点^[4]。根据共线准相位匹配应满足的动量守恒条件和能量守恒条件可以得出,通过改变极化周期和温度等条件,可获得参量光的调谐输出^[5]。但由于铌酸锂晶体的损伤阈值较低,对热效应敏感,在室温下很难实现高功率运转。 Mg^{2+} 的掺入有效地克服了 PPLN 晶体抗光折变损伤阈值低的缺点,因此,掺 MgO 周期极化铌酸锂(MgO:PPLN)能够在常温下实现高功率连续可调谐激光的输出。目前,MgO:PPLN 已成为应用最广泛、发展最成熟的理想准相位匹配周期极化非线性晶体^[6]。基于 MgO:PPLN 的 OPO 可产生位于大气传输窗口的高功率中红外波段连续可调谐激光输出,因此被广泛应用于环境监测、红外遥感、医疗诊断和自由空间光通信等领域^[7-8]。

2004 年,美国宇航局 Langley 研究中心的 Yu 等通过 Nd:YAG 激光抽运 PPLN 实现腔内单谐振 OPO,获得了调谐范围为 2.3~3.9 μm 的闲频光输出^[9]。2009 年,天津大学丁欣等设计了一种 V 型腔,实现了 1.406~1.513 μm 可调谐信号光输出。当抽运功率为 10.9 W 时,获得了 820 mW 的信号光输出^[10]。2013 年,中国科学院福建物质结构研究所李志平等报道了基于 Nd:YVO₄/MgO:PPLN 连续单谐振 OPO,在腔内引入一个双面凸透镜对基频光进行聚焦提高基频光功率密度。在 11.5 W 抽运功率下,获得 2.48 W 的 1 586 nm 信号光和 1.1 W 的 3 232 nm 闲频光输出^[11]。此外,掺铋光纤激光器抽运的 PPLN-OPO 也可以获得较高的输出功率^[12]。最近,印度 Homi Bhabha 国家研究所的 Shukla 等报道了一种掺铋光纤激光器抽运 PPLN 实现单谐振 OPO。基于一种四镜环形腔结构,在抽运功率为 16 W 时,获得

了最高 4 W 的 1 464 nm 信号光和 2 W 的 3 895 nm 闲频光输出^[13]。

文中采用半导体激光 (LD) 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体产生的 1 064 nm 激光作为 OPO 的基频光,多极化周期可调谐的 MgO:PPLN 为非线性光学晶体,并采用结构简单紧凑的直线腔结构,实现了高效的可调谐连续光参量振荡激光输出。通过改变 MgO:PPLN 的极化周期,实现了 1.43~1.67 μm 信号光和 2.93~4.16 μm 闲频光宽波段可调谐的激光输出。当入射抽运功率为 15.4 W 时,1 595 nm 的信号光和 3 190 nm 的闲频光输出功率分别为 2.94 W 和 1.45 W,总转换效率为 28.5 %。

1 实验设计

图 1 为 LD 端面抽运 Nd:YVO₄/MgO:PPLN 的连续内腔式 OPO 可调谐激光实验装置图。抽运源采用芯径为 100 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤耦合 808 nm 波长半导体激光器。抽运光经过一对焦距为 30 mm 和 100 mm 的透镜组成的耦合系统聚焦在 Nd:YVO₄ 晶体上,聚焦后的束腰半径约为 330 μm 。实验中所采用的 Nd:YVO₄ 晶体为尺寸 3 mm×3 mm×10 mm、掺钕浓度 0.3 % 的 a 切晶体。晶体的输入端面(S1)镀有对抽运光的增透膜和对基频光的全反膜。在实验过程中,利用控制在 18 $^{\circ}C$ 的循环水对 Nd:YVO₄ 晶体进行冷却。实验中所采用的 MgO:PPLN 晶体的掺镁浓度为 5 mol%,尺寸为 50 mm×8.6 mm×1 mm,具有 7 个不同的极化周期:28.5、29、29.5、30、30.5、31、31.5 μm 。MgO:PPLN 晶体的两个通光端面上均镀有对基频光、信号光和闲频光的增透膜。将 MgO:PPLN 放置在一个温度控制在 35 $^{\circ}C$ 的温控炉上,通过调节温控炉的位置实现周期调谐。

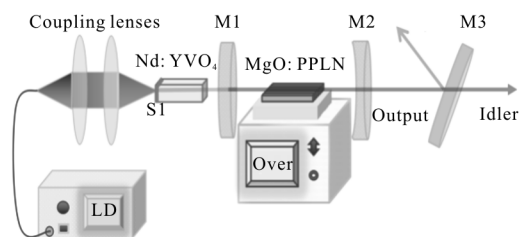


图 1 腔内抽运的 MgO:PPLN OPO 实验装置图
Fig.1 Schematic diagram of the intra-cavity MgO:PPLN OPO

Nd:YVO₄ 晶体的输入端面 S1 和曲率半径为 500 mm 的平凹镜 M2 组成 1 064 nm 基频光谱振荡腔,平平镜 M1 和 M2 组成光参量振荡腔。为了减小腔内损耗,尽可能缩短腔长,基频光谱振荡腔和 OPO 腔的腔长分别为 98 mm 和 83 mm。图 2 为 M1 和 M2 两个镜片的透过率曲线,其中镜片 M1 镀有对基频光的增透膜 ($R < 0.2\%$),对闲频光和部分信号光 1.4~1.63 μm 的高反膜 ($R > 99\%$)。镜片 M2 镀有对基频光高反 ($R > 99.8\%$)、闲频光高透 ($T > 87\%$)、1.43~1.63 μm 信号光部分透过 ($T \approx 7\%$)的膜系。当信号光波长大于 1.63 μm 时,镜片 M1 和 M2 对信号光的透过率开始逐渐增大。

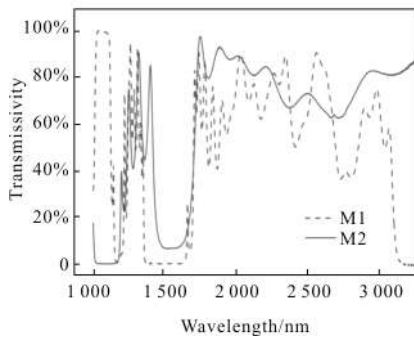


图 2 OPO 谐振腔镜 M1 和 M2 的透过率曲线
Fig.2 Transmissivity curves for the OPO cavity mirrors M1 and M2

2 结果分析及讨论

通过改变 MgO:PPLN 的极化周期可实现信号光和闲频光的调谐输出。根据 Lin 等所提供的色散方程^[14],可计算出 MgO:PPLN 周期调谐的理论波长。图 3 给出了以 1 064 nm 激光作为基频光时,

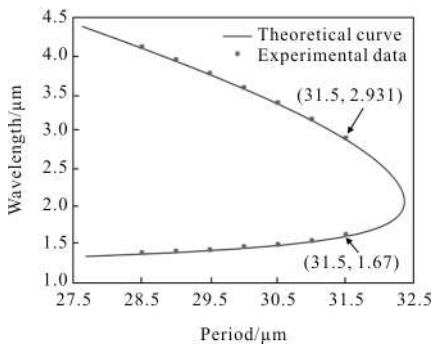


图 3 1 064 nm 激光作为基频光时的不同极化周期调谐的 MgO:PPLN 晶体的理论波长和实验波长图
Fig.3 Theoretical and experimental wavelengthes of different periods of MgO:PPLN crystal pumped by the fundamental laser at 1 064 nm

MgO:PPLN 晶体温度控制在 35 $^{\circ}\text{C}$ 下的不同极化周期调谐的理论波长和实验波长。通过调节从 28.5 μm 到 31.5 μm 的 7 个极化周期,获得了信号光波长 1.43~1.67 μm 和闲频光波长 2.93~4.16 μm 的可调谐激光输出。

在 12.4 W 入射抽运功率下,对 MgO:PPLN 晶体不同极化周期下的 OPO 输出总功率输出进行优化,结果如图 4 所示。当极化周期从 28.5 μm 变化到 31 μm 时,输出总功率逐渐增加,并在 31 μm 周期时达到最大值。这是由于随着晶体极化周期的增加,闲频光波长缩短,使得铌酸锂晶体对闲频光的吸收逐渐减小^[15]。当极化周期为 31.5 μm 时,由于腔内信号光透射损耗过大,导致输出功率明显降低。由图 3 可知,当极化周期为 31.5 μm 时,参量振荡器输出的信号光和闲频光波长分别为 1.67 μm 和 2.93 μm 。镜片 M1 在 1.67 μm 波长处的透过率为 6%,M2 对 1.67 μm 波长的透过率高达 21%。这就使得参量振荡腔内的信号光透射损耗过大,在相同情况下极化周期为 31.5 μm 时的输出功率明显低于其他周期。

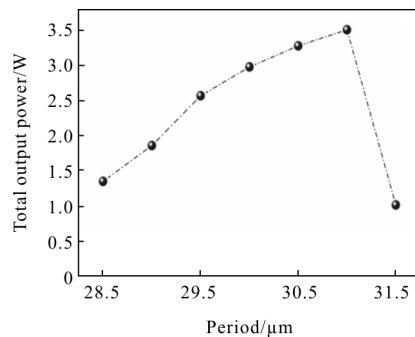


图 4 抽运功率为 12.4 W 时,不同极化周期对应的输出总功率
Fig.4 Total output power versus the period of the MgO:PPLN crystal under the pump power of 12.4 W

对比不同极化周期下的激光输出功率,31 μm 极化周期时具有最高的输出功率。因此,笔者进一步对该周期的 OPO 激光输出特性进行优化。并利用一个对信号光高反、闲频光高透的镜片 M3 将信号光和闲频光分离,再测量功率。图 5 给出了 OPO 输出的总功率,以及其信号光和闲频光功率随抽运功率的变化关系。在 15.4 W 的抽运功率下最高获得了 4.39 W 的总输出功率,对应光光转换效率为 28.5%。其中信号光和闲频光功率分别为 2.94 W 和 1.45 W。实验中所使用的 MgO:PPLN 薄片厚度为 1 mm,较

厚的 OPO 晶体使得信号光和闲频光在腔内往返振荡时的衍射损耗较小,提高了激光输出功率。从图 5 可以看出:在抽运功率增加的过程中,输出功率并未出现饱和现象。如果继续升高抽运功率,OPO 的输出功率将会进一步提高。利用型号为 Omni-λ500 的光栅单色仪(分辨率 0.05 nm)对 OPO 激光输出谱线进行测量。图 6 为 31 μm 周期激光的闲频光和信号光谱线图。从图中可以得到信号光和闲频光的中心波长分别为 1 595 nm 和 3 190 nm,对应的线宽分别为 0.2 nm 和 2 nm。

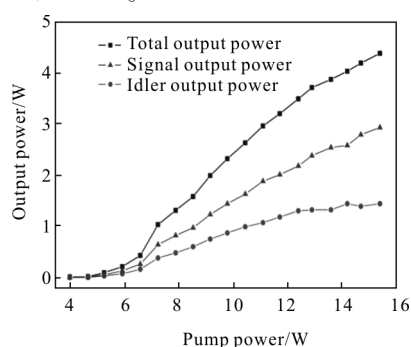


图 5 极化周期为 31 μm 时,输出功率与抽运功率关系曲线
Fig.5 Idler power, signal power and the total power versus the pump power at a grating period of 31 μm

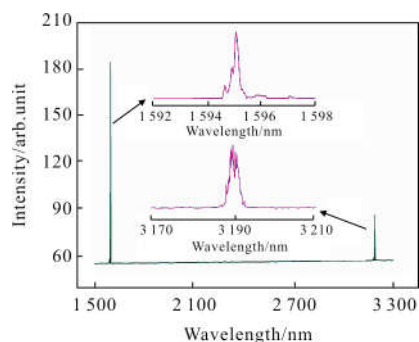


图 6 极化周期为 31 μm 时,信号光和闲频光谱线图
Fig.6 Measured spectra of signal light and idler light at the period of 31 μm

3 结论

该实验采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体产生的 1 064 nm 激光作为基频光,1 mm 厚的 MgO:PPLN 晶体作为非线性光学晶体,实现了紧凑连续可调谐内腔式光参量振荡。在相同入射抽运功率下,对比了 MgO:PPLN 晶体不同极化周期的输出功率,实现了 1.43~1.67 μm 信号光和 2.93~4.16 μm 闲频光连续可调谐的激光输出。当入射抽运功率为 15.4 W

时,得到了 4.39 W 的最高输出功率,总的转换效率达 28.5 %。利用一个对信号光高反、闲频光高透的镜片将信号光和闲频光分离,测出信号光和闲频光的中心波长分别为 1 595 nm 和 3 190 nm,对应的输出功率分别为 2.94 W 和 1.45 W。该实验采用尺寸较大的 PPLN 晶体,获得了 PPLN 内腔式 OPO 同类腔型中较好的输出结果。在今后的实验研究中,会继续保持结构的紧凑性并进一步优化系统,使腔内模式更好地匹配,得到更好的结果。

参考文献:

- [1] Yao Baoquan, Wang Yuezhong, Wang Qi. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 217-220. (in Chinese)
姚宝权,王月珠,王骥. 中红外光参量振荡器发展状况分析 [J]. 激光技术, 2002, 26(3): 217-220.
- [2] Li Yuxin, Li Shifeng, Ju Panpan, et al. Highly stable compact intra-cavity continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406004. (in Chinese)
李宇昕,李世凤,居盼盼,等. 高稳定紧凑型内腔连续光参量振荡器 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0406004.
- [3] Li Bingxuan, Xu Shan, Wei Yong, et al. Tunable continuous wave Nd:YVO₄/MgO:PPLN optical parametric oscillator generating mid-infrared laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(10): 1152-1157.
- [4] Su Hui, Li Zhiping, Duan Yanmin, et al. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1404-1409. (in Chinese)
苏辉,李志平,段延敏,等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1404-1409.
- [5] Jundt D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n(e), in congruent lithium niobate. [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(20): 1553.
- [6] Zhang Baigang, Yao Jianquan, Lu Yang, et al. High average power nanosecond quasi phase matched single pass optical parametric generator in periodically poled lithium niobate [J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(7): 1691-1693.

- [7] Li Chong, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 0615. (in Chinese)
李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展 [J]. 中国光学, 2016, 9(6): 0615.
- [8] Sheng Wenyang, Li Jianjun, Xia Maopeng, et al. Investigation of 3.39 μm IR radiance calibration based on parametric down-conversion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1004001. (in Chinese)
盛文阳, 李健军, 夏茂鹏, 等. 基于参量下转换的 3.39 μm 中红外辐射源定标实验 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1004001.
- [9] Trieua B C, Leec H R, Yu J, et al. Intra-cavity pumped periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator with double ring configuration [C]//Advanced Solid-State Photonics, 2004.
- [10] Ding Xin, Sheng Quan, Chen Na, et al. High efficiency continuous-wave tunable signal output of an intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(10): 4314-4318.
- [11] Li Z P, Duan Y M, Wu K R, et al. A continuous-wave, widely tunable, intra-cavity, singly resonant, magnesium-doped, periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(5): 055006.
- [12] Liu Shande, Wang Zhaowei, Zhang Baitao, et al. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-Fiber laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2014, 31(2): 55-58.
- [13] Shukla M K, Das R. High-power single-frequency source in the mid-infrared using a singly resonant optical parametric oscillator pumped by Yb-Fiber laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 24(5): 1-6.
- [14] Lin H, Tan H, Miao J, et al. Extra-cavity, widely tunable, continuous wave MgO-doped PPLN optical parametric oscillator pumped with a Nd:YVO₄ laser [J]. *Optical Materials*, 2009, 32(1): 257-260.
- [15] Van Herpen M M J W, Bisson S E, Harren F J M. Continuous-wave operation of a single-frequency optical parametric oscillator at 4-5 microm based on periodically poled LiNbO₃ [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(24): 2497-2499.