

内腔连续波 1.9 μm 和 2.4 μm 双波长输出 光参量振荡器

孙鑫^{1,2} 毕勇¹ 颜博霞¹ 郑光¹ 王栋栋³ 王皓^{1,2} 亓岩¹ 房涛¹

1 中国科学院光电研究院, 北京 100094
2 中国科学院大学, 北京 100049
3 北京中视中科光电技术有限公司, 北京 100086

摘要 报道了一个内腔式连续波、单谐振 1.9 μm 和 2.4 μm 双波长激光输出的光参量振荡器(OPO)。实验采用单管半导体激光二极管(LD)抽运掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)晶体,腔内抽运掺氧化镁的周期性极化铌酸锂(PPMgLN)晶体,得到 1.9 μm 和 2.4 μm 双波长连续激光输出。在室温下,当 LD 功率为 5.5 W 时,同时获得了 750 mW、1.9 μm 波长的信号光和 370 mW、2.4 μm 波长的闲频光输出,光-光转换效率分别为 13.6% 和 6.7%,总的转换效率达到了 20% 以上。测试 5 h,功率不稳定性小于 1.8%。另外还对不同长度的 PPMgLN 晶体进行了阈值和转换效率的特性分析。通过输出波长稳定性测试发现,对晶体的温度进行更好地控制,可以改善波长漂移的现象。

关键词 非线性光学;光参量振荡器;双波长激光器;连续波;准相位匹配;掺氧化镁的周期性极化铌酸锂晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0302009

Intracavity Continuous-Wave Optical Parametric Oscillator with 1.9 μm and 2.4 μm Dual-Wavelength Output

Sun Xin^{1,2} Bi Yong¹ Yan Boxia¹ Zheng Guang¹ Wang Dongdong³
Wang Hao^{1,2} Qi Yan¹ Fang Tao¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Phoebus Vision Opto-Electronics Technology Ltd., Beijing 100086, China

Abstract An intracavity continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator (OPO) with wavelengths of 1.9 μm and 2.4 μm is demonstrated. The 1.9 μm and 2.4 μm dual-wavelength continuous lasers are obtained through intracavity pumping the MgO-doped periodically poled LiNbO₃ (PPMgLN) and yttrium vanadate (Nd:YVO₄) crystal with a single semiconductor laser diode (LD). 750 mW signal wave at 1.9 μm and 370 mW idler wave at 2.4 μm , are simultaneously obtained when the LD power is 5.5 W at room temperature. The corresponding conversion efficiencies are 13.6% and 6.7% respectively, so the whole efficiency is more than 20%. The output power instability is no more than 1.8% over a measurement period of 5 h. Additionally, the threshold characteristics and conversion efficiency of PPMgLN crystal with different lengths are analyzed. By output wavelength stability test, it is found that better control of the temperature of crystal can improve the phenomenon of wavelength drift.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; dual-wavelength laser; continuous-wave; quasi-phase-matching; periodically poled MgO:LiNbO₃ crystal

OCIS codes 190.4970; 140.3070; 140.3580

收稿日期: 2012-10-09; 收到修改稿日期: 2012-12-08

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701, 2009AA032706)资助课题。

作者简介: 孙鑫(1987—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光器及非线性频率变换方面的研究。

E-mail: sunxin@aoe.ac.cn

导师简介: 毕勇(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事大功率全固态激光器系统技术与应用、非线性光学频率变换技术和全色激光显示技术等方面的研究。E-mail: biyong@aoe.ac.cn(通信联系人)

1 引言

波长为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的可调谐激光在空间红外遥感、特种夜视、光谱测量、温度传感及气体测量等方面都有重要的应用^[1,2]。基于周期性极化晶体的光参量振荡器(OPO),以其调谐范围宽、转换效率高、结构简单紧凑、可实现全固化、易维护等诸多优点^[3,4]而成为获得近、中红外激光光源最有效的方式之一。

随着 OPO 的发展,准相位匹配(QPM)技术被提出^[5],并以其独特的优势而被广泛应用。同双折射相位匹配相比,准相位匹配通过对晶体非线性极化率的周期性调制来补偿光参量过程中由于折射率色散造成的抽运光和参量光之间的相位失配,可以利用晶体的最大非线性系数,且没有波矢方向和偏振方向的限制,理论上能够利用晶体的整个透光范围实现相位匹配^[6,7]。目前,实现准相位匹配的光学参量振荡最常见的铁电材料是周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)和掺氧化镁的周期性极化铌酸锂(PPMgLN),同 PPLN 相比,加入 MgO 的 PPMgLN 具有更高的光损伤阈值,且在室温下就可以实现高效率的激光输出。

按 OPO 谐振腔与产生抽运光的激光谐振腔的关系可分为外腔式 OPO 和内腔式 OPO。同外腔式 OPO 相比,内腔式 OPO 可以充分利用抽运光腔内的高功率密度,降低激光抽运阈值,提高转换效率,而且结构紧凑,易于实现小型化。连续波可调谐 OPO 在医药卫生、微量物质检测、红外晶体材料研究中有重要应用。1997 年,Colville 等^[8]首次实现了内腔连续波单共振振荡器(SRO),采用钛宝石激光器作为抽运源,KTP 晶体为非线性晶体,在抽运功率为 10 W 时,获得了 400 mW 的闲频光输出。国内对内腔式连续 OPO 的研究较少。2008 年,丁欣等^[9]报道了一种连续中红外内腔 SRO,采用半导

体激光器(LD)端面抽运的连续 Nd:YVO₄激光器抽运极化周期为 $28.5\ \mu\text{m}$ 的 PPLN 晶体,晶体温度为 $140\ ^\circ\text{C}$, $3.86\ \mu\text{m}$ 闲频光输出功率为 155 mW,光-光转换效率为 1.82%。2010 年,颜博霞等^[10]以单谐振内腔式结构,采用 15.6 W 的 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体,将 40 mm 的 PPLN 晶体放入腔内,实现了 $3.19\ \mu\text{m}$ 处 1.9 W 的连续中红外激光输出。2011 年,林洪沂等^[11]同样采用内腔连续单谐振结构,在 5 W 半导体激光器(LD)抽运功率下获得了 370 mW 的闲频光和 540 mW 信号光输出。

此外,近年来学者们研究的红外光参量振荡器输出波长多集中在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $1.4\sim 1.6\ \mu\text{m}$,对 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的近红外光研究较少。本文利用小功率单管 LD 端面抽运掺钕钒酸铌(Nd:YVO₄)和 PPMgLN 晶体,实现了 $1.9\ \mu\text{m}$ 和 $2.4\ \mu\text{m}$ 双波长输出的近红外连续波单谐振 OPO。PPMgLN 晶体的周期为 $32.2\ \mu\text{m}$,分别对长度为 40、50、60 mm 的晶体进行实验。在室温下,选择 60 mm 长的晶体,当 LD 功率为 5.5 W 时,同时获得了 370 mW 的 $2.4\ \mu\text{m}$ 闲频光和 750 mW 的 $1.9\ \mu\text{m}$ 信号光输出,光-光转换效率分别为 13.6% 和 6.7%。

2 实验研究

2.1 晶体

PPMgLN 晶体由本课题组自行研制,MgO 的掺杂浓度为 5%(摩尔分数), z 轴方向极化,极化周期为 $32.2\ \mu\text{m}$ 。采用外加电场极化法使 1 mm 厚度的 PPMgLN 晶体实现了正负 z 面的大面积均匀反转。如图 1 所示,使用氟化氢(HF)酸腐蚀可以清晰地看到周期极化反转条纹,占空比接近 50%,极化效果良好。PPMgLN 晶体的尺寸为 $6\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$,两端镀有对抽运光 1064 nm、信号光和 $1.6\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 闲频光的多层增透膜。

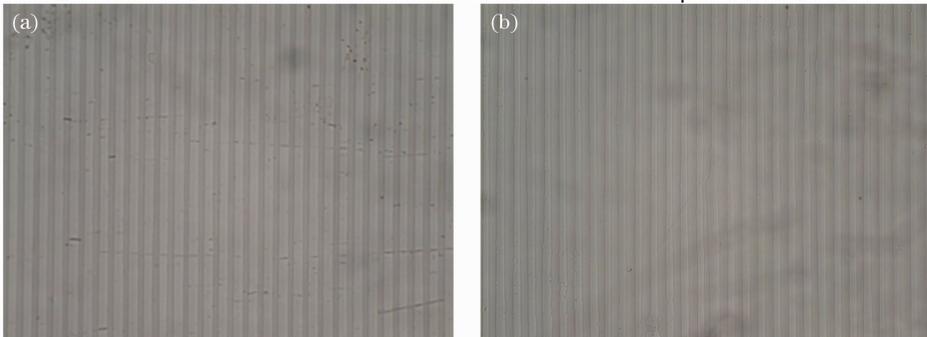


图 1 PPMgLN 的极化效果图。(a) $+z$; (b) $-z$

Fig. 1 Polarization effect pictures of PPMgLN. (a) $+z$; (b) $-z$

2.2 实验装置

实验装置如图 2 所示。元器件包括：单管 LD、激光晶体 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 、非线性晶体 PPMgLN 、两个腔镜 M1、M2 和 BS 分束镜。LD 的中心波长为 808 nm,最大输出功率为 5.5 W。激光晶体 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 的尺寸为 2 mm \times 2 mm \times 3 mm,其中钕离子的掺杂浓度为 0.4%,切割方式为 *a* 方向切割。靠近 LD 的端面镀有 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,另一端面镀有 1064 nm 增透膜。

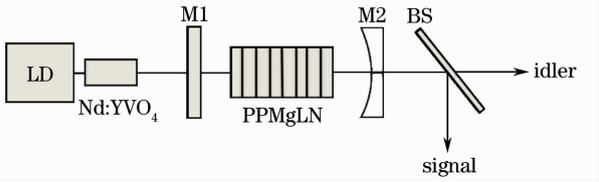


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

OPO 谐振腔采用闲频光单谱振荡方式。M1 为平面镜,两面镀有对抽运光 1064 nm 和信号光 1.9 μm 增透膜,对闲频光 2.4 μm 高反膜。M2 是曲率半径为 200 mm 的平凹镜,两面镀有对抽运光 1064 nm 高反、闲频光 2.4 μm 部分透射和信号光 1.9 μm 增透的多层介质膜。BS 是 45° 入射的介质膜分色片,靠近 M2 的一面镀有对信号光 1.9 μm 的高反膜和对闲频光 2.4 μm 增透膜,另一面镀有对闲频光 2.4 μm 增透膜。LD 紧靠激光晶体,未加任何透镜直接抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 。靠近 LD 的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的入射端面与 M2 镜构成 1064 nm 抽运谐振腔,腔长为 98 mm。OPO 谐振腔为平-凹腔,由 M1 镜和 M2 镜组成,腔长为 74 mm。实验中,LD 和激光晶体放置于紫铜基座上,采用半导体热电制冷(TEC),温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。PPMgLN 晶体放置于铝制调节架上,未采取任何控温措施。

2.3 实验结果与分析

2.3.1 OPO 阈值特性

当 LD 功率大于 1.09 W,用红外探片探测到有微弱的红外光输出,即 1064 nm 激光。用功率计测量,几乎没有示数。此时 1064 nm 激光起振。当 LD 功率大于 3.36 W 时,功率计有示数,此时腔内激光功率大于 OPO 的阈值,有参量光输出。

2.3.2 输出功率特性

实验中利用分束镜 BS 将信号光与闲频光分开。用北京物科光电技术有限公司生产的 LP-3B 型激光功率计分别测量其输出功率。晶体的周期为 32.2 μm ,长度为 60 mm 时,信号光和闲频光输出功

率及其各自转换效率随 LD 抽运功率的变化曲线如图 3 所示,LD 的抽运阈值为 3.3 W,随着 LD 电流的增加,信号光和闲频光功率都不断增加,当 LD 的电流为 6 A,即功率为 5.5 W 时,得到了 1.9 μm 的 750 mW 信号光和 2.4 μm 的 370 mW 闲频光输出,相对于 LD 的转换效率分别为 13.6% 和 6.7%,总转换效率超过了 20%。由于 M1 镜对信号光 1.9 μm 高透,使腔内一部分信号光到达 M1 镜时溢出腔外而造成损失,如果对 M1 镜镀 1.9 μm 高反膜,可有利于提高信号光的输出功率。由图 3 看出,抽运功率增至 4.4 W 之后,转换效率增长缓慢,可能是激光晶体的热透镜效应和 M2 镜的透射率较低造成。

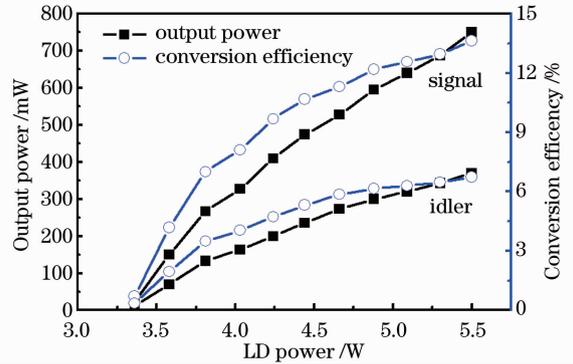


图 3 信号光和闲频光输出功率及其各自转换效率随 LD 抽运功率的变化

Fig. 3 Output power of signal and idler and their conversion efficiencies versus LD power

分别采用长度为 40、50、60 mm,周期均为 32.2 μm 的 PPMgLN 晶体进行实验,总的输出功率与 LD 功率的关系曲线如图 4 所示。可以看出,随着晶体长度的增加,OPO 的阈值降低,输出功率增大,即转换效率提高。

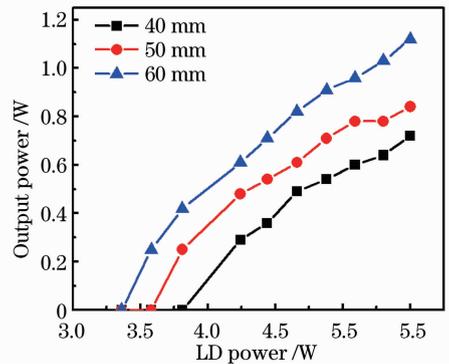


图 4 不同长度晶体的总输出功率随 LD 抽运功率的变化
Fig. 4 Whole output power of crystal with different lengths versus LD power

稳定性是衡量一台激光器的重要参数,实验中还对总的输出光功率的稳定性进行了测量。将 LD

的功率设置为 5.5 W,每隔 10 min 记录一次总功率输出值,如图 5 所示,5 h 内功率不稳定性小于 1.8%,1 h 20 min 后功率不稳定性小于 1%,稳定性较好。

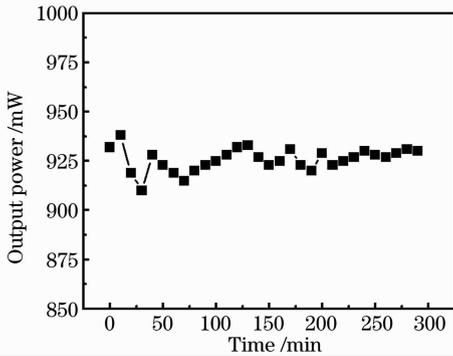


图 5 5 h 输出光功率的稳定性

Fig. 5 Output power stability in 5 h

2.3.3 波长特性

实验中采用美国海洋光学公司生产的 NIRQUEST 型近红外光谱仪对输出光波长进行测量。当 LD 功率为 5.5 W,PPMgLN 晶体长度为 60 mm 时,室温下测得输出的信号光中心波长为 1896.78 nm。3 h 后,再一次对 OPO 的输出波长进行测量,测量结果中心波长为 1903.42 nm。同之前相比,波长有漂移,图 6 为前后波长比较图。用热像仪对晶体的表面进行观察,发现晶体的温度升高了 3 °C。将晶体置于紫铜底座,并采用 TEC 进行控温。3 h 后,测量发现波长未发生变化。说明对晶体温度的控制可以更好地保证 OPO 输出波长的稳定性。

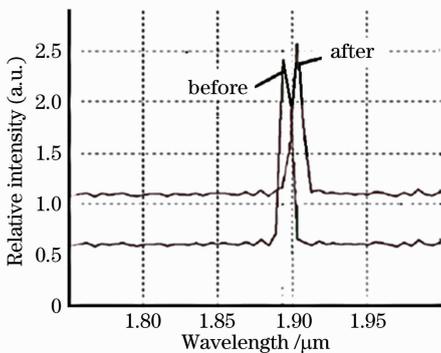


图 6 不同时间的信号光光谱

Fig. 6 Spectrum of signal light at different time

3 结 论

采用单管 LD 抽运 Nd:YVO₄ 的激光晶体,并采用内腔式、单谐振结构抽运 PPMgLN 晶体,同时获得了最大输出功率为 370 mW、波长为 2.4 μm 的闲频光和 750 mW、波长为 1.9 μm 的信号光输出,光-

光转换效率分别为 13.6% 和 6.7%,总的转换效率达到了 20% 以上。对不同长度的晶体进行实验,发现 OPO 的阈值随晶体长度的增加而降低,输出功率随晶体长度的增加而提高。同时还对功率和波长的稳定性进行了简单的测试与分析。本实验结构简单、紧凑,易于制成小型激光器。下一步的工作是改善 M1 和 M2 镜的透射率,提高转换效率;对晶体的温度进行更好的控制,改善波长漂移现象;将实验成果转化为商业激光器。

参 考 文 献

- 1 Ruud W. M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P. H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0~2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the earth atmosphere[J]. *Infrared Phys & Technol.*, 2001, **42**(1): 1~16
- 2 Yonggang Zhang, Xiaojun Zhang, Xiangrong Zhu *et al.*. Tunable diode laser absorption spectroscopy detection of N₂O at 2.1 μm using antimonide laser and InGaAs photodiode[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(8): 2301~2303
- 3 Hiroaki Ashizawa, Shinobu Ohara, Shigeru Yamaguchi *et al.*. Performance characteristics of narrow linewidth fiber laser pumped mid-IR difference frequency mixing light source for methane detection[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(3): 1263~1267
- 4 S. Stry, P. Hering, M. Murtz. Portable difference-frequency laser-based cavity leak-out spectrometer for trace-gas analysis[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(2-3): 297~303
- 5 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 6 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. Continuously tunable optical parametric oscillator based on multi-grating periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 897~902
- 张百钢,姚建铨,丁欣等.连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 897~902
- 7 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
- 8 F. G. Colville, M. H. Dunn, M. Ebrahimzadeh. Continuous-wave, singly resonant, intracavity parametric oscillation[J]. *Opt Lett.*, 1997, **22**(2): 75~77
- 9 Xin Ding, ShaoMin Zhang, HongMei Ma *et al.*. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(1): 211~216
- 10 Boxia Yan, Yong Bi, Mi Zhou *et al.*. Highly efficient continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO:PPLN[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(12): 124203
- 11 Lin Hongyi, Xu Yingchao, Huang Xiaohua *et al.*. Low threshold mid-infrared intracavity optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(10): 1098~1100
- 林洪沂,许英朝,黄晓桦等.内腔中红外低阈值 PPMgLN 光学参量振荡器[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(10): 1098~1100

栏目编辑:宋梅梅