

文章编号: 0258-7025(2010)11-2821-04

连续波可调谐内腔光学参量振荡器及橙红光源

盛 泉^{1,2} 丁 欣^{1,2} 陈 娜^{1,2} 李 雪^{1,2} 禹宣伊³ 温午麒^{1,2} 王 鹏^{1,2} 姚建铨^{1,2}

¹天津大学激光与光电子研究所,天津大学精仪学院,天津 300072
²光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072
³南开大学物理科学学院,天津 300071

摘要 报道了利用半导体激光器(LD)端面抽运的钕酸钇(Nd:YVO₄)激光器作为抽运源,多周期周期极化铌酸锂(PPLN)为非线性晶体的连续波内腔光学参量振荡器(OPO)及基于此的连续波可调谐橙红光光源。为实现 OPO 的连续波运转,采用了内腔抽运方式,并对谐振腔进行了合理设计。实验得到调谐范围 1406~1513 nm 的信号光及 3.66~4.1 μm 的中红外闲频光连续波输出,在 10.9 W 的 LD 功率下,最大输出功率分别为输出波长 1500 nm 处的 820 mW 和 3.86 μm 处的 195 mW,相对 LD 功率的转换效率分别为 7.5% 和 1.8%。利用 BaB₂O₄(BBO)晶体对 OPO 的 1064 nm 抽运光和 1.4~1.5 μm 信号光进行内腔和频,获得了调谐范围 606~624 nm 的橙红波段连续波输出,最大输出功率为 624 nm 处的 120 mW,转换效率为 1.1%。

关键词 非线性光学;光学参量振荡器;连续波;可调谐;中红外;橙红光

中图分类号 TN 248.1;O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2821

Continuous-Wave Tunable Intra-Cavity Optical Parametric Oscillator and Orange-Red Source

Sheng Quan^{1,2} Ding Xin^{1,2} Chen Na^{1,2} Li Xue^{1,2} Yu Xuanyi³
Wen Wuqi^{1,2} Wang Peng^{1,2} Yao Jianquan^{1,2}

¹College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China
²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China
³School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract We report a continuous-wave tunable optical parametric oscillator (OPO) which is intra-cavity pumped by a laser diode (LD) end-pumped Nd:YVO₄ laser and utilize a periodically-poled lithium niobate (PPLN) crystal as nonlinear medium. Cavities are carefully designed and intra-cavity pumping schemes are adopted to realize continuous-wave operation. 1406~1513 nm signal output and 3.66~4.1 μm mid-infrared idler output are obtained with the maximum power of 820 mW at 1500 nm and 195 mW at 3.86 μm, corresponding conversion efficiencies versus 10.9 W LD power are 7.5% and 1.8%. 606~624 nm continuous-wave tunable orange-red output is also obtained by intra-cavity sum-frequency generating of 1064 nm pump wave and 1.4~1.5 μm signal wave of the OPO in a BBO crystal. The maximum output power is 120 mW at 624 nm, with conversion efficiency of 1.1%.

Key words nonlinear-optics; optical parametric oscillator; continuous-wave; tunable; mid-infrared; orange-red

收稿日期: 2009-12-10; 收到修改稿日期: 2010-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(60978021,10804055) 和国家 973 计划(2007CB310403)资助课题。

作者简介: 盛 泉(1985—),男,博士研究生,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: shengquan@tju.edu.cn

导师简介: 姚建铨(1937—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光电子方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

1 引 言

连续波、可调谐的波长在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近的人眼安全波段及 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段的相干光源在光谱分析、遥感及空间通信等方面有很多重要用途。半导体激光器(LD)^[1]、光纤激光器^[2]、拉曼激光器^[3]以及光学参量振荡(OPO)^[4~13]等方法均有报道实现这些波段输出,其中 OPO 以其调谐性方面的优势成为近年来获得人眼安全波段及中红外波段激光的研究热点。由于 OPO 的阈值特性,国内对 OPO 的研究主要集中在脉冲和准连续的运转形式,利用抽运光的高峰值功率实现振荡^[5~8],而国外实现 OPO 连续波运转常需采用单频抽运源^[9,10]。 $590\sim 630 \text{ nm}$ 的橙红波段相干光源在污染监测和医疗等方面有重要应用,以往常通过双波长 Nd^{3+} 激光器和频^[14]及拉曼频移^[15]的方法获得,此波段可调谐光源的报道很少。

本文利用 LD 端面抽运的连续波钕酸钇($\text{Nd}:\text{YVO}_4$)激光器内腔抽运周期极化钨酸锂光学参量振荡器(PPLN-OPO),通过对谐振腔的合理设计并利用内腔高功率密度,实现 OPO 非单频抽运下的低阈值连续波运转。通过极化周期调谐和温度调谐得到 $1406\sim 1513 \text{ nm}$ 的人眼安全波段信号光及 $3.66\sim 4.1 \mu\text{m}$ 的中红外闲频光连续波输出。

2 实验装置及理论分析

图 1 为实验装置示意图。LD 为单光纤耦合输出的半导体激光器阵列,尾纤直径 $400 \mu\text{m}$,最大输出功率 10.9 W , L_1 是耦合透镜,耦合比例为 $1:1$,数值孔径 0.22 。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体掺杂原子数分数 0.4% , a 向切割,尺寸为 $3 \text{ mm}\times 3 \text{ mm}\times 8 \text{ mm}$,晶体前端面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,后端面镀 1064 nm 增透膜。PPLN 晶体尺寸为 $24 \text{ mm}\times 8 \text{ mm}\times 1 \text{ mm}$,包含 $26\sim 29 \mu\text{m}$ 的 7 个极化周期,表面未镀膜。 L_2 是焦距为 100 mm 的聚焦透镜,双面镀 1064 nm 增透膜;平-平分束镜(BS)前面镀 1064 nm 高透膜,后面镀 1064 nm 高透膜和 $1.4\sim 1.55 \mu\text{m}$ 高反膜;凹面反射镜 M_1 的曲率半径为 100 mm ,镀 $1.4\sim 1.55 \mu\text{m}$ 和 1064 nm 的高反膜($R>99\%$),信号光输出镜 M_2 的曲率半径为 90 mm ,对 $1.4\sim 1.55 \mu\text{m}$ 反射率为 95% 。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体左端面和 M_1 镜构成 1064 nm 激光的谐振腔,OPO 信号光经 BS 折叠后在 M_1 和 M_2 间振荡。虚线框内紧贴 PPLN 晶体放置的 BBO 为和频产生橙红波段输出实验中使用的,尺寸为 $3 \text{ mm}\times 3 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$,两端镀 $1.4\sim 1.55 \mu\text{m}$ 和 1064 nm 的高透膜,一端镀 $590\sim 630 \text{ nm}$ 高反膜,采

用 $\theta = 20.8^\circ, \varphi = 0^\circ$ 的 I 类相位匹配方式切割($d_{\text{eff}} = 2 \text{ pm/V}$)。

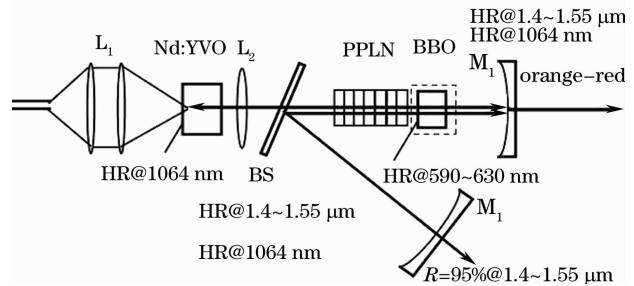


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

紧邻 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体放置的透镜 L_2 将 1064 nm 激光聚焦到 PPLN 晶体中心,提高晶体内的 OPO 抽运光功率密度以优化转换效率。考虑到 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体中的热透镜效应, L_2 镜起光学镇定器的作用^[16,17],使 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体中的 1064 nm 激光光斑以及 PPLN 晶体中的 1064 nm 激光和 OPO 信号光光斑的大小和位置不会因抽运功率变化而随热透镜焦距改变产生明显变化,便于实现模体匹配以提高转换效率。 M_1 与 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体左端面间距离为 160 mm ,PPLN 晶体中心与 M_1 距离 102 mm , M_1 与 M_2 间距离为 185 mm ,测量得 LD 功率 10.9 W 时 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的热透镜焦距约 80 mm 。通过计算得到 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体左端面处 1064 nm 激光基模光斑半径为 $216 \mu\text{m}$,实现了与 808 nm 抽运光 $200 \mu\text{m}$ 光斑半径的匹配,PPLN 晶体中 1064 nm 激光基模光斑半径为 $70 \mu\text{m}$,与 $76 \mu\text{m}$ 的 OPO 信号光光斑半径也实现了很好的匹配,即两个转换过程中均实现了模体匹配,从而减少了衍射损耗,降低阈值并提高转换效率,此时 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器运转在光斑半径与热透镜光焦度的 U 型曲线的稳功率点处,如图 2 所示。实验中 PPLN

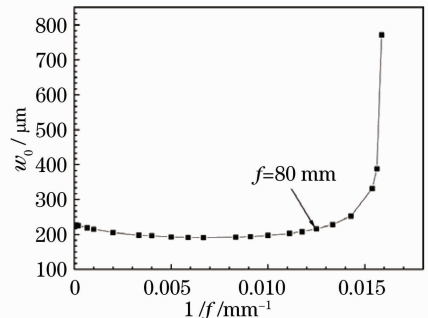


图 2 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体中 1064 nm 激光基模光斑半径-热透镜光焦度曲线

Fig. 2 Spot radius of 1064 nm laser in the $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ crystal versus thermal-lens focal power

放置于精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温炉中,以便更好地实现匹配和进行温度调谐,而 Nd:YVO_4 和 BBO 晶体均用循环冷水冷却,水温分别为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果及分析

实验中对 OPO 的温度调谐和极化周期调谐性质分别进行了研究,所用光谱仪为 Agilent 86142B,功率计为 Moletron EPM1000。LD 功率固定在 10.9 W ,极化周期 $29\text{ }\mu\text{m}$,PPLN 晶体温度由 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,信号光调谐范围为 $1495\sim 1513\text{ nm}$,输出功率变化范围 $810\sim 820\text{ mW}$ (图 3),当 PPLN 晶体温度 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$,极化周期 Λ 由 $27\text{ }\mu\text{m}$ 变化到 $29\text{ }\mu\text{m}$ 时,得到信号光调谐范围 $1406\sim 1500\text{ nm}$,输出功率变化范围 $788\sim 819\text{ mW}$,输出波长与理论值吻合很好(图 4)。受镜片镀膜限制,使用 $26\text{ }\mu\text{m}$ 和 $26.5\text{ }\mu\text{m}$ 两个极化周期时 OPO 不能振荡。

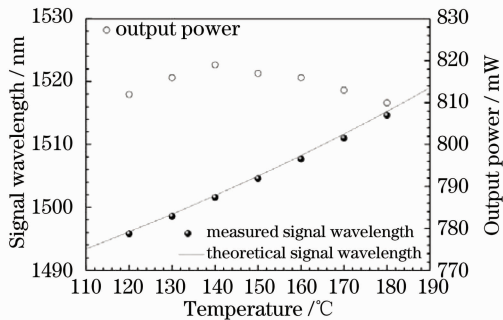


图 3 不同温度下信号光理论和实际输出波长及输出功率($\Lambda=29\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 3 Measured output power and wavelength and theoretical wavelength of the signal at different temperatures ($\Lambda=29\text{ }\mu\text{m}$)

当 PPLN 晶体温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$,极化周期 $29\text{ }\mu\text{m}$,输出波长 1500 nm 时得到了最大的信号光输出功率 820 mW ,相对 LD 功率转换效率 7.51% 。不同 LD 抽运功率下的信号光输出功率及转换效率如图 5 所示,OPO 阈值(LD 功率)为 2.5 W ,功率不稳定性为 $\pm 1.2\%$ 。

在输出中红外闲频光的实验中,将 M_1 镜换为仍对 OPO 抽运光和信号光高反,对 $3.6\sim 4.1\text{ }\mu\text{m}$ 高透的 CaF_2 镜片,产生的中红外闲频光经 M_1 镜输出。PPLN 晶体温度 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下通过极化周期调谐得到的调谐范围为 $3.66\sim 4.03\text{ }\mu\text{m}$,改变温度可进一步将输出波长范围扩展到 $4.1\text{ }\mu\text{m}$,最大输出功率为 $T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Lambda=28.5\text{ }\mu\text{m}$,输出波长 $3.86\text{ }\mu\text{m}$ 下的 195 mW ,转换效率 1.8% ,功率不稳定性小于 8% 。图 6 为不同抽运功率下的闲频光输出功率和效率曲线。

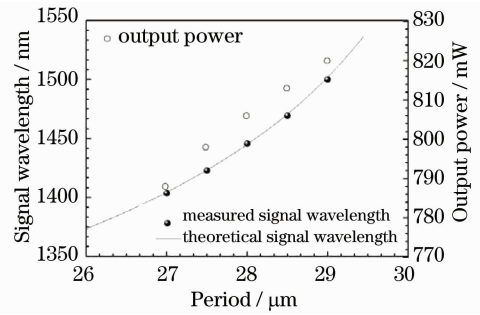


图 4 不同极化周期下信号光的理论和实际输出波长及输出功率($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Measured output power and wavelength and theoretical wavelength of the signal at different grating periods ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$)

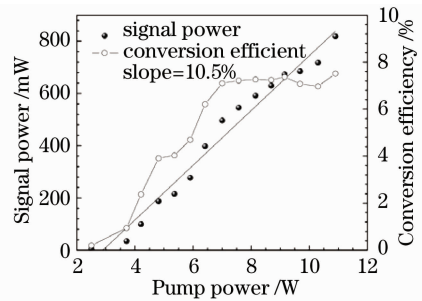


图 5 信号光输出功率及转换效率随 LD 抽运功率的变化($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Lambda=29\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 5 Output signal power and conversion efficiency as a function of LD power ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Lambda=29\text{ }\mu\text{m}$)

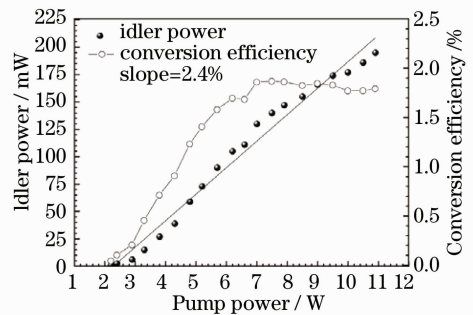


图 6 闲频光输出功率及转换效率随 LD 抽运功率的变化($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Lambda=28.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 6 Output idler power and conversion efficiency as a function of LD power ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Lambda=28.5\text{ }\mu\text{m}$)

紧邻 PPLN 插入 BBO 晶体,使腔内的 1064 nm 激光和 OPO 信号光和频产生橙红光经 M_1 镜输出。通过调谐 OPO 信号光波长以实现和对频橙红光波长的调谐,在进行波长调谐的过程中, BBO 晶体的摆放角度需随信号光波长变化进行微小调节。在 LD 功率 10.9 W ,PPLN 晶体温度 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,通过极化周期调谐获得了 $606\sim 624\text{ nm}$ 的连续波输出(图 7),最大输出功率为 624 nm 处的 120 mW ,转

转换效率 1.1%。橙红光阈值为 7 W(LD 功率),功率不稳定性小于 5%。此方法中,腔内 1064 nm 激光和 OPO 信号光的高功率密度都得到了利用,因此具有获得较高总转换效率的潜力。

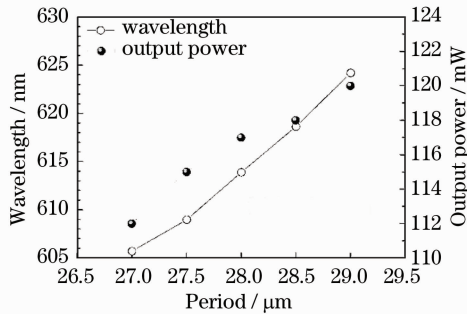


图 7 极化周期调谐下橙红光输出波长和功率变化情况($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7 Output orange-red power and wavelength at different grating periods($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4 结 论

利用 LD 端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器内腔抽运 PPLN-OPO,得到了可调谐的人眼安全波段信号光和中红外闲频光连续波输出。为使 OPO 能够高效率连续波运转,通过合理选择谐振腔参数,实现了 1064 nm 激光产生以及 OPO 这两个转换过程的抽运光和信号光的光斑半径匹配以降低损耗,同时也使谐振腔具有很好的热稳定性。实验中获得了 1406~1513 nm 的信号光及 3.66~4.1 μm 的闲频光连续波输出,最大输出功率分别为 1500 nm 处的 820 mW 和 3.86 μm 处的 195 mW,相对 LD 功率的转换效率分别为 7.5% 和 1.8%。在此基础上,利用 BBO 晶体对 OPO 的 1064 nm 抽运光和 1.4~1.5 μm 信号光进行内腔和频,得到了调谐范围 606~624 nm 的橙红波段连续波输出,在 624 nm 处得到 120 mW 的最大输出功率,转换效率 1.1%。

参 考 文 献:

- L. L. Goddard, S. R. Bank, M. A. Wistey *et al.*. Recombination, gain, band structure, efficiency, and reliability of 1.5 μm GaInNAsSb /GaAs lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(8): 0831011
- D. Y. Shen, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188 W free-running and 100 W tunable output power [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13): 4916~4921
- Y. F. Chen. Efficient 1521 nm Nd:GdVO₄ Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2632~2634
- R. F. Wu, K. S. Lai, H. F. Wong *et al.*. Multiwatt mid-IR output from a Nd:YALO laser pumped intracavity KTA OPO [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(13): 694~698
- X. C. Lin, Y. P. Kong, Y. Zhang *et al.*. Mid-infrared generation based on a periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Chin. Phys.*, 2004, **13**(7): 1042~1045
- F. Ji, B. G. Zhang, E. B. Li *et al.*. A low-pump-threshold high-repetition-rate intracavity optical parametric generator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8): 2113~2116
- Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Low-threshold widely-tunable intracavity Q-switched Nd:YVO₄/PPLN optical parametric generator [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1643~1647
纪峰,姚建铨,张百钢等.低阈值宽调谐的内腔调 Q Nd:YVO₄/PPLN 光学参量产生 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1643~1647
- Linghong Xia, Hong Su, Shuangchen Ruan. Widely continuous-tunable 2.789~4.957 μm twin MgO:PPLN cascaded optical parametric oscillator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1038~1040
- S. T. Lin, Y. Y. Lin, Y. C. Huang *et al.*. 3- μm continuous-wave, singly resonant OPO[C]. *CLEO 2008, San Jose, California, CTuII7*
- T. H. My, C. Drag, F. Bretenaker. Single-frequency and tunable operation of a continuous intracavity-frequency-doubled singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1455~1457
- G. A. Turnbull, M. H. Dunn, M. Ebrahimzadeh. Continuous-wave intracavity optical parametric oscillators an analysis of power characteristics [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**(6): 701~710
- Xingbao Zhang, Yuezhu Wang, Youlun Ju *et al.*. Low-threshold mid-IR MgO:PPLN optical parametric generation with high reflectivity mirror for signal wavelength [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 204~206
- 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
- Liu Tianhong, Tan Huiming, Gao Lanlan *et al.*. Intracavity sum-frequency mixing with BIBO in 593 nm laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1195~1197
刘天红,檀慧明,高兰兰等. BIBO 腔内和频 593 nm 激光器 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1195~1197
- R. P. Mildren, M. Convery, H. M. Pask *et al.*. Efficient all solid state, Raman laser in the yellow, orange and red [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 785~790
- Zhang Guangyin, Guo Shuguang. Graphic Analysis and Design Method of Optical Resonator [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 28~33, 85~98
张光寅,郭曙光.光学谐振腔的图解分析与设计方法 [M]. 北京:国防工业出版社, 2003. 28~33, 85~98
- Zhang Guangyin, Song Feng, Feng Yan *et al.*. A solid state laser resonator capable of compensating thermal lens effect adaptively [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(8): 1495~1498
张光寅,宋峰,冯衍等.可自适应补偿热透镜效应的固体激光谐振腔 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(8): 1495~1498