

高转换效率单谐振连续波近红外光学参量振荡器

姚文明¹, 邓力华², 田玉冰¹, 常奥磊^{1,3}, 王 鹏¹, 陈建生¹, 檀慧明¹, 高 静^{1,3}

- (1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163;
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;
3. 长春理工大学 理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 提出了一种高功率及高转换效率的可调谐连续波近红外外腔单谐振光学参量振荡器。为了获得短波段近红外可调谐激光光源, 基于准相位匹配晶体的光学参量振荡技术是其中一项有效的技术手段。光学参量振荡器采用连续波 532 nm 激光器作为泵浦源, 掺杂氧化镁的周期性极化化学计量比钽酸锂 (MgO:sPPLT) 晶体作为准相位匹配晶体, 通过在周期调谐的基础上再结合温度调谐的组合调谐方式, 在 8.3~8.6 μm 的 4 个极化周期内实现了信号光 807~879 nm 和闲频光 1352~1567 nm 近红外宽波段的无跳模可调谐激光输出。通过闲频光单谐振设计, 当泵浦功率 5.4 W 时, 在 8.6 μm 周期处, 获得了 3.1 W 的 821 nm 的近红外信号光输出, 实现了 57.4% 的信号光光-光转换效率。当泵浦功率达到 13.6 W 时, 在 8.6 μm 周期处, 获得了 6.8 W 的高功率输出。

关键词: 光学参量振荡器; MgO:sPPLT 晶体; 近红外激光; 连续波

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210654

High-conversion-efficiency continuous-wave near-infrared singly resonant optical parametric oscillator

Yao Wenming¹, Deng Lihua², Tian Yubing¹, Chang AoLei^{1,3},
Wang Peng¹, Chen Jiansheng¹, Tan Huiming¹, Gao Jing^{1,3}

- (1. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China;
2. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;
3. Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: High-power, high-conversion-efficiency and tunable continuous-wave (CW) near-infrared external-cavity pumped singly resonant optical parametric oscillator (SRO) was proposed. OPO based on a quasi-phase-matched (QPM) nonlinear crystal was a very effective technology to obtain the short-wave near-infrared tunable laser sources. CW laser at 532 nm was used as the fundamental laser source to drive the OPO in the cavity. The QPM crystal was a multi-grating MgO-doped stoichiometric periodically poled LiTaO₃(MgO:sPPLT). The widely tunable SRO output signal wavelength ranging from 807 to 879 nm and idler wavelength ranging from 1352 to 1567 nm were achieved by combination of poling period tuning and temperature tuning with four different

收稿日期:2022-01-10; 修订日期:2022-02-25

基金项目:国家自然科学基金(62075234);江苏省自然科学基金(BK20180220);江苏省六大人才高峰(SWYY-285)

作者简介:姚文明,男,副研究员,博士,主要从事激光及其非线性频率变换技术方面的研究。

periodically poled gratings from 8.3 to 8.6 μm . By means of using single resonant of idler light, the output power of the signal (821 nm) was 3.1 W at a pump power of 5.4 W with the efficiency of 57.4% was achieved. Under an incident pump power of 13.6 W, a maximum signal output power of 6.8 W at 821 nm was obtained with the period of 8.6 μm .

Key words: optical parametric oscillator; MgO:sPPLT crystal; near-infrared laser; continuous-wave

0 引言

基于准相位匹配技术的光学参量振荡器 (OPO) 是实现激光波长的调谐与拓展的有效途径之一。通过改变周期极化晶体的极化周期与温度等参数,可以得到覆盖可见光到中红外波段的可调谐激光输出,满足人们不同的使用需求^[1-6]。与脉冲泵浦 OPO 相比,连续波 (CW)OPO 的增益低、阈值高,对非线性晶体的要求更高,实现起来更加困难。2008 年,姚建铨院士课题组实现了由二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器泵浦周期极化铌酸锂 (PPLN) 的连续波中红外腔内单谐振光参量振荡器 (ICSRO),温度为 140 $^{\circ}\text{C}$ 时,在 3.86 μm 处获得了 155 mW 的闲频光输出功率,光-光转换效率为 1.82%^[7]。2009 年,他们在 1500 nm 处获得 820 mW 的信号光输出功率,光-光转换效率为 7.51%^[8]。2013 年,他们采用 880 nm 激光二极管共振泵浦连续波 ICSRO,在 21.9 W 泵浦功率下,获得了 1.54 W 的 3.66 μm 中红外闲频光输出,光-光转换效率为 7.0%。通过升高输出镜对振荡光的透射率优化 SRO 阈值,在 21.4 W 泵浦功率下同时获得 1.54 W 的闲频光和 5.03 W 的信号光输出,总提取效率达到 30.2%^[9]。2020 年,他们报道了一种全光纤结构的 CW OPO,当泵浦功率为 2 W 时获得了 0.5 W 的 1642.5 nm 激光输出,实现了 1642.5~1655.4 nm 范围内的可调谐输出^[10]。2021 年,祝世宁院士团队采用 ICSRO 结构,808 nm 半导体激光器泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,PPLN 晶体作为准相位匹配晶体,实现了 2.25~4.79 μm 中红外波段的可调谐输出,泵浦功率为 9.1 W 时,在 3.189 μm 处获得最大 1.08 W 的激光输出,转换效率为 11.88%^[11]。

周期极化钽酸锂 (PPLT) 晶体比 PPLN 晶体有更高的抗光损伤阈值,在短波近红外激光领域有强大的发展潜力。通过在 PPSLT 中掺杂 MgO(MgO:sPPLT),可以有效降低晶体因可见光辐射导致的光折变损

伤^[12]。2007 年, Samanta 等人^[13]采用环形腔的设计,利用 532 nm 的激光泵浦 MgO:sPPLT,获得了 1.59 W 的单频、连续波近红外闲频光输出。2011 年, Kumar 等人^[14]利用 1064 nm 的光纤激光器泵浦 CW MgO:sPPLT-OPO,获得了高达 5.5 W 的中红外激光输出。2017 年, Devi 等人^[15]利用 532 nm 连续波单频激光器泵浦扇形 MgO:sPPLT 晶体,在室温下获得了百毫瓦级的闲频光输出。国内对连续波 OPO 的研究相对较少,对短波近红外波段连续波 MgO:sPPLT-OPO 的报道较为少见。

文中采用连续波 532 nm 绿光激光器泵浦多周期 MgO:sPPLT 晶体,实现了连续波运转的高效率 MgO:sPPLT-OPO。通过周期调谐和温度调谐相结合,获得了信号光 807~879 nm 和闲频光 1352~1567 nm 波段范围内无跳模的连续可调谐输出。在信号光 821 nm 处,最高输出功率达到 6.8 W;当泵浦功率为 5.4 W 时,获得 3.1 W 输出,光-光转换效率达到 57.4%。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验采用的泵浦源为 IPG Photonics 公司生产的 GLR-20 型连续波激光器,其中心波长为 532 nm,最高输出功率达到 20 W。OPO 结构采用外腔式设计,532 nm 泵浦光通过光隔离器后,经过焦距为 100 mm 的聚焦透镜将光斑压缩后耦合进入 OPO 系统。准相位匹配晶体是由日本 OXIDE 公司提供的 MgO:sPPLT 晶体,晶体尺寸为 30 mm \times 15 mm \times 0.5 mm,掺杂了 1% 原子分数的 MgO。晶体表面镀有 532 nm 的增透膜,极化周期为 7.9~8.8 μm ,共有 10 个极化周期。谐振腔采用闲频光单谐振 (SRO) 的双凹腔线性结构。谐振腔由两个平凹镜 M1 和 M2 组成,其曲率半径均为 50 mm。输入镜 M1 的平面镀有对 0.5~0.9 μm 波段增透膜 ($R<0.6\%$),凹面则镀有对闲频光 1.3~1.5 μm 波段的高反 ($R>99.7\%$),

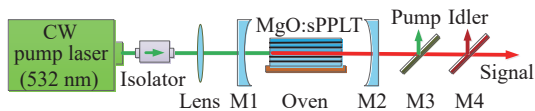


图 1 CW MgO:sPPLT-OPO 实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the CW MgO:sPPLT-OPO

532 nm 高透 ($T > 99.9\%$), 和对 0.5~0.9 μm 波段高透 ($T > 95\%$) 的多层介质膜。输出镜 M2 的镀膜参数与输入镜 M1 相同。

基于对称双凹腔设计, 在实验过程中 MgO:sPPLT 晶体被放置于谐振腔内的中心位置。将 MgO:sPPLT 晶体用铝箔包裹后放置于温控炉中, 然后将温控炉固定在位移平台上, 通过移动晶体的位置实现周期调谐, 通过改变晶体的温度实现温度调谐, 进而实现光学参量振荡器的连续可调谐无跳模输出。实验中, 通过 M3 镜滤除多余的泵浦光, 通过 M4 镜对闲频光进行过滤, 得到信号光的输出特性。M3 镜对 0.8~1.6 μm 波段的透过率 $> 80\%$, M4 镜对闲频光波段的反射率 $> 99\%$ 。利用 Ocean Optics 公司生产的 NIRQUEST512 型近红外光谱仪及 HR4000 型光纤光谱仪同时检测输出的信号光及闲频光光谱。利用 OPHIR 公司生产的 10A-PPS 型功率计测量信号光输出功率。

2 实验结果和分析

在谐振腔中心位置处, 通过激光光束轮廓仪 (NanoScan V2, Ophir Photonics) 测得经透镜聚焦后的泵浦光束腰直径约为 100 μm , 如图 2 所示。为满足模式匹配要求, 结合对称双凹腔的特性和谐振腔稳态条件, 设计谐振腔长为 97 mm, 此时谐振腔振荡光在谐振腔中的束腰直径约为 96 μm , 谐振腔内泵浦光与振荡光束腰比值接近 1 : 1。实验同时另外设计了腔长约为 60 mm 和 80 mm 的两种谐振腔, 谐振腔内泵浦光束腰与振荡光束腰比值分别为 1 : 2.3 和 1 : 1.8。在 8.6 μm 极化周期和晶体温度为 27 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 得到了这三种谐振腔的信号光功率随泵浦光功率的变化关系, 如图 3 所示。60 mm 腔长的谐振腔振荡阈值最低约为 1.45 W, 这是因为更小的泵浦光斑提供了更高的功率密度。97 mm 腔长的谐振腔振荡阈值最高约为 3.0 W, 但在 9 W 泵浦功率下其信号光输出功率却

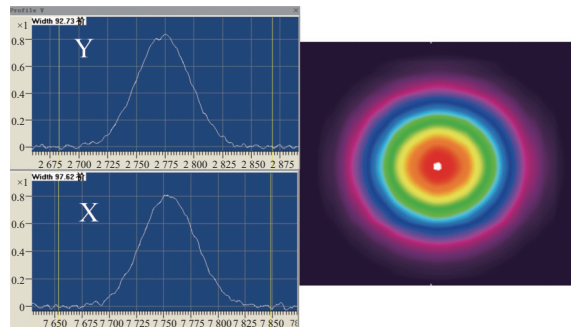


图 2 谐振腔内泵浦光经透镜聚焦后的光斑轮廓

Fig.2 Spatial beam profile of the pump light in the cavity after focusing by the lens

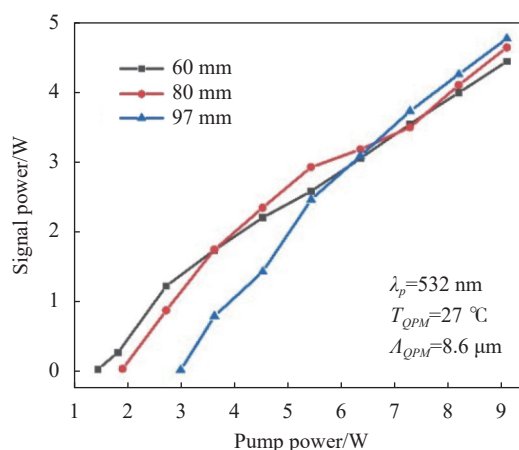


图 3 27 $^{\circ}\text{C}$ 时, 不同谐振腔腔长下的信号光输出功率与泵浦功率的变化关系

Fig.3 Signal output power as function of the pump power with different kinds of laser cavity lengths at 27 $^{\circ}\text{C}$

为最高约 4.8 W, 相对更大的振荡光模式体积对这一现象的产生有直接影响。这些结果表明模式匹配对高功率输出有较大影响, 以下工作均围绕 97 mm 谐振腔进行研究分析。

由于谐振腔镜对闲频光 1.3~1.5 μm 波段的反射率 $> 99.7\%$, 实验中只检测到微弱的闲频光信号, 因此文中只对信号光特性进行重点分析。图 4 所示为晶体温度为 27 $^{\circ}\text{C}$, 泵浦功率为 13.6 W 时, 821、837、856、879 nm 的信号光分别对应的最大输出功率。同时对这 4 个波长的输出功率随泵浦功率变化的特性分别进行了研究, 实验结果如图 5 所示。随着泵浦功率的增加, 信号光的输出功率也在逐渐增加。当输入泵浦功率达到 13.6 W 时, 在 821 nm 处, 获得了 6.8 W 的输

出,光-光转换效率达到 50.0%。而当泵浦功率为 5.4 W 时,获得了 3.1 W 的 821 nm 激光输出,光-光转换效率达到了 57.4%。极化周期为 8.3、8.4、8.5 μm 时,在同样泵浦功率下,分别得到了 48.2%、51.7% 及 55.2% 的高转换效率。在泵浦功率 13.6 W 时,在 879、856、837 nm 波段处获得的输出功率分别达到 5.9、6.2、6.4 W,对应的光-光转换效率分别达到 43.4%、45.6% 和 47.1%。图 5(b) 所示为在 0~13.6 W 的泵浦功率范围内,821、837、856、879 nm 波长对应的最高光-光转换效率分别为 57.4%、55.2%、51.7% 和 48.2%。从图中可以看出,在 4 个波长均在泵浦功率在 6 W 附近时,光-光转换效率达到峰值,随着泵浦功率的进一步增加,转换效率逐渐下降,但是, OPO 系统的输出仍保持着 43% 以上的高转换效率。随着泵浦功率的逐渐增加,输出功率也保持上升趋势,而且没有出现饱和的迹象。分析认为高转换效率的实现与单谐振结构和闲频光的高反射率有一定的关系,不过出于预防晶体损伤等原因的考虑,实验没有进一步增加泵浦功率。

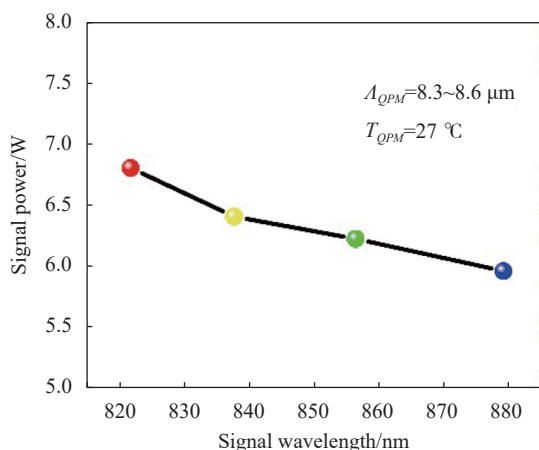


图 4 在泵浦功率为 13.6 W,温度为 27 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同信号光的输出功率
Fig.4 Output power of the different signal light at pump power 13.6 W and temperature 27 $^{\circ}\text{C}$

通过温控炉将晶体温度控制在 27 $^{\circ}\text{C}$, 移动位移平台,得到了 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 4 个极化周期的周期调谐光谱曲线,分别是 879、856、837、821 nm 信号光及其相对应的 1 352、1 411、1 464、1 515 nm 闲频光,如图 6 所示。

如图 7 所示,将实验结果与根据 Sellmeier 色散方程^[16] 计算得到的理论值进行对比,图中的实线为理论

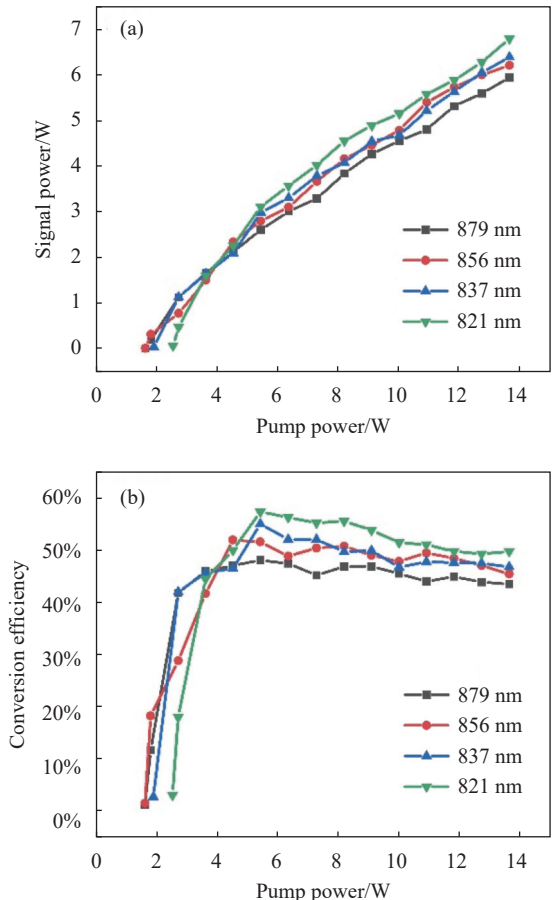


图 5 27 $^{\circ}\text{C}$ 时,极化周期为 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 时,信号光输出功率及其转换效率随泵浦功率的变化关系。(a) 信号光功率;(b) 转换效率

Fig.5 Signal output power and conversion efficiency as functions with pump power when the poling periods are 8.3, 8.4, 8.5 and 8.6 μm at 27 $^{\circ}\text{C}$. (a) Signal output power; (b) Conversion efficiency

计算值曲线,离散点为实验测量值。从图 7 中可以看出,在信号光波段,实验值与理论值高度符合,在闲频光波段,实验结果与理论值也保持较高的重合性,因此 Sellmeier 色散方程对工作温度为 27 $^{\circ}\text{C}$ 的周期调谐具有较高的参考价值。

在周期调谐的基础上,通过改变 $\text{MgO}:\text{sPPLT}$ 晶体的温度获得了 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 4 个周期的温度调谐曲线,如图 8 所示。图中离散点为实验测量得到的输出光谱数据,实线为根据 Sellmeier 色散方程得到的理论值。通过对比发现,在 27~83 $^{\circ}\text{C}$ 范围内改变这 4 个极化周期的温度就可以实现 807~879 nm 信号光和 1 352~1 567 nm 闲频光波段范围内不间断地连续可调谐输出,实验结果与理论值在低温条件下 (27~

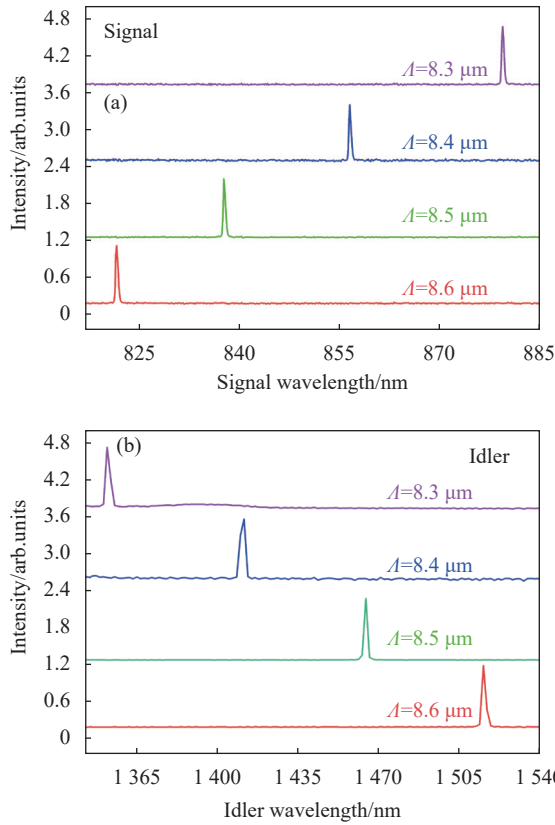


图 6 27 °C 时, MgO:sPPLT-OPO 输出光谱曲线

Fig.6 Output spectrum curve of the MgO:sPPLT-OPO at 27 °C

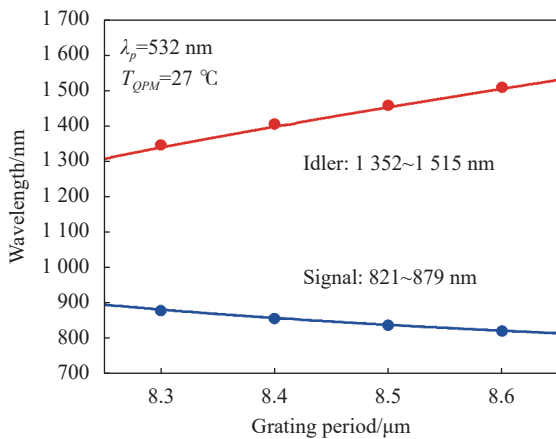


图 7 27 °C 时, CW MgO:sPPLT-OPO 调谐曲线随周期的变化

Fig.7 Polarization periodic tuning curve of the CW MgO:sPPLT-OPO at 27 °C

50 °C) 比较吻合,而在高温条件下(55~90 °C)实验结果与理论值有一定偏差,分析认为这是由于所采用的 Sellmeier 色散方程在高温条件下的精度有限所导致。根据温度调谐的结果发现周期不同,温度调谐速度也略有不同,随着极化周期的增加调谐速度逐渐降

低,信号光和闲频光的变化趋势相同,如图 9 所示。8.3 μm 周期的信号光调谐速度约为 -0.4 nm/°C,闲频光调谐速度约为 1.0 nm/°C,而 8.6 μm 周期的信号光调谐速度则降至 -0.25 nm/°C,闲频光调谐速度则降至 0.9 nm/°C。

当泵浦功率为 5.4 W 时,在距离 OPO 输出腔镜 M2 约 150 mm 处,利用光束轮廓仪测试了信号光光斑的轮廓,获得的光斑强度分布图像如表 1 所示。从测试结果可以看出,不同信号光在 X 和 Y 方向的光斑大小均接近 1 : 1,且都表现为近高斯分布。

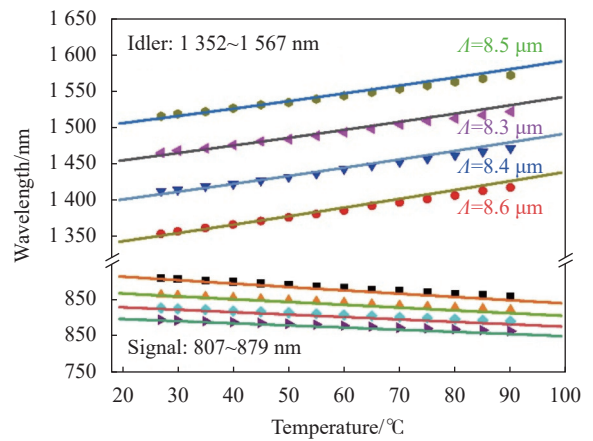


图 8 极化周期为 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 时,信号光和闲频光光谱随温度的变化关系

Fig.8 Signal and idler wavelength tuning varies with temperature when the grating periods are 8.3, 8.4, 8.5 and 8.6 μm

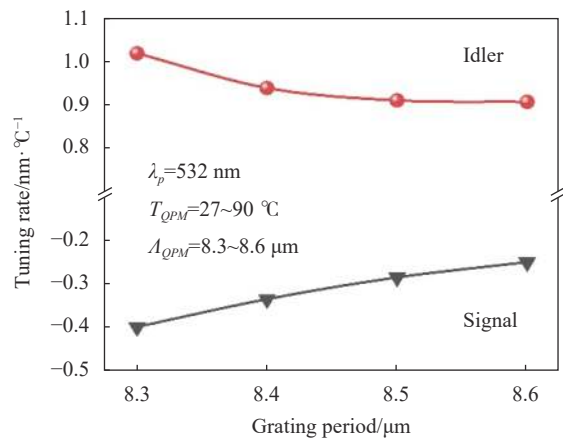
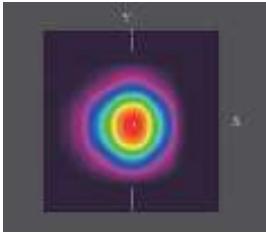
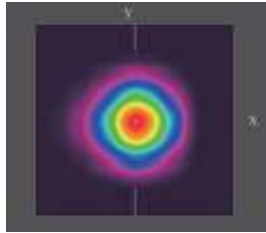
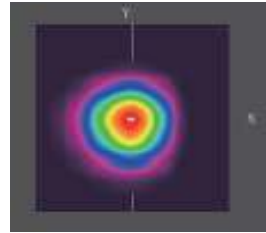
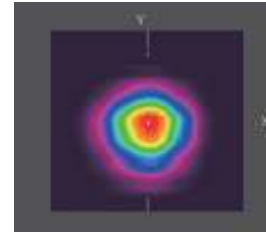


图 9 极化周期为 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 时,信号光和闲频光光谱的温度调谐速度

Fig.9 Temperature tuning rates of signal and idler spectra at poling periods of 8.3, 8.4, 8.5 and 8.6 μm

表 1 不同周期输出的信号光光斑

Tab.1 Signal beam profile of different periods

Grating period	8.3 μm X: 2.3 mm Y: 2.4 mm	8.4 μm X: 2.3 mm Y: 2.6 mm	8.5 μm X: 2.4 mm Y: 2.6 mm	8.6 μm X: 2.4 mm Y: 2.5 mm
				

3 结 论

实验采用准相位匹配 MgO:sPPLT 晶体, 用 532 nm 连续波激光器作为泵浦源, 通过外腔、单谐振的结构设计, 实现了连续波高转换效率的宽波段可调谐光学参量振荡。实验研究了 MgO:sPPLT-OPO 的周期调谐和温度调谐特性, 对比了信号光输出功率随泵浦功率的变化。实验通过对 8.3、8.4、8.5、8.6 μm 4 个周期进行周期调谐获得了信号光 821~879 nm 和闲频光 1352~1515 nm 波段的可调谐激光输出。在周期调谐的基础上, 结合温度调谐, 实现了 807~879 nm 信号光和 1352~1567 nm 闲频光波段范围内不间断地连续可调谐输出, 调谐速度随着周期的增加而逐渐降低。在信号光中心波长为 821 nm 处, 当泵浦功率为 5.4 W 时, 最高转换效率达到了 57.4%; 当泵浦功率为 13.6 W 时, 在 821 nm 处的最大输出功率达到 6.8 W。821、837、856、879 nm 波长对应的最高光-光转换效率分别为 57.4%、55.2%、51.7% 和 48.2%, 且输出光光斑均呈近高斯分布。

参考文献:

[1] Gibson G M, Dunn M H, Padgett M J. Application of a continuously tunable, cw optical parametric oscillator for high-resolution spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(1): 40-42.

[2] Romanovskii O A, Sadovnikov S A, Kharchenko O V, et al. Development of near/mid IR differential absorption OPO lidar system for sensing of atmospheric gases [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 43-47.

[3] Bai X, He Y, Yu D, et al. Miniaturized mid-infrared MgO:

PPLN optical parametric oscillator with high beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190512. (in Chinese)

[4] Lombardini A, Berto P, Duboisset J, et al. Background-suppressed SRS fingerprint imaging with a fully integrated system using a single optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14490-14502.

[5] Won M, Li M, Kim H S, et al. Visible to mid IR: A library of multispectral diagnostic imaging [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 426: 213608.

[6] Zhang J, Ma J, Lu T, et al. Compact wavelength tunable output around 440 nm pulsed laser for oceanic lidar application [J]. *Optics Communications*, 2021, 485: 126706.

[7] Ding X, Zhang S M, Ma H M, et al. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(1): 0211.

[8] Ding X, Sheng Q, Chen N, 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.

[9] Ding X, Shang C, Sheng Q, et al. Continuous-wave tunable intra-cavity single resonance optical parametric oscillator under 880 nm in-band pumping and the inverse conversion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602008. (in Chinese)

[10] Yu J, Zhang J X, Sheng Q, et al. All-fiber CW optical parametric oscillator tuned from 1642.5 to 1655.4 nm by a low-loss SMS filter [J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103136.

[11] Wang K, Gao M Y, Yu S H, et al. A compact and high efficiency intracavity OPO based on periodically poled lithium niobate [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5079.

- [12] Samanta G K, Fayaz G R, Sun Z, et al. High-power, continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 400-402.
- [13] Samanta G K, Fayaz G R, Ebrahim-Zadeh M. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2623-2625.
- [14] Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. High-power, continuous-wave, mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2578-2580.
- [15] Devi K, Ebrahim-Zadeh M. Room-temperature, rapidly tunable, green-pumped continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2635-2638.
- [16] Lim H H, Kurimura S, Katagai T, et al. Temperature-dependent Sellmeier equation for refractive index of 1.0 mol % Mg-doped stoichiometric lithium tantalate [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(3R): 032601.