

种子注入双共振 PPMgLN 光参量振荡器

董怡静^{1,2}, 马秀华^{1*}, 李世光¹, 朱小磊¹, 谢小兵^{1,2}, 张俊旋¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一种种子注入式 PPMgLN 外腔双共振环形腔光参量振荡器。抽运光偏振方向在 PPMgLN 晶体 (MgO 物质的量分数为 5%) 内满足 $e \rightarrow e + e$ 相位匹配, 有效利用了晶体的最大非线性系数 d_{33} ($25 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$)。以重复频率为 400 Hz、功率为 556 mW、波长为 1064 nm 的单频脉冲激光作为抽运源, 在晶体极化周期为 $30.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下, 获得了平均功率为 79 mW 的 $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ 信号光和平均功率为 38.5 mW 的 $3.3 \text{ }\mu\text{m}$ 空闲光输出, 抽运光-参量光的总转换效率可达 22%。采用种子激光注入技术获得了单频窄线宽参量光输出, 实验测得 $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ 信号光输出的线宽小于 100 MHz, 10 min 内频率漂移不超过 141 MHz。

关键词 激光光学; 双共振光学参量振荡器; 种子注入; PPMgLN 晶体; 单频激光

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801003

Injection Seeded Doubly Resonant Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN

Dong Yijing^{1,2}, Ma Xiuhua¹, Li Shiguang¹, Zhu Xiaolei¹, Xie Xiaobing^{1,2}, Zhang Junxuan¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An injection-seeded, doubly resonant ring cavity optical parametric oscillator based on PPMgLN crystal is presented. The pump beam polarization matches the $e \rightarrow e + e$ interaction in PPMgLN crystal (doped MgO with mole fraction of 5%), and thus makes the maximal nonlinear coefficient d_{33} ($25 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$) effective. Using single-frequency pulsed laser with repetition frequency of 400 Hz, wavelength of 1064 nm and output power of 556 mW as pumping source, we obtain an average output power of 79 mW at the wavelength of $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ and output power of 38.5 mW at the wavelength of $3.3 \text{ }\mu\text{m}$ when the crystal grating period is $30.5 \text{ }\mu\text{m}$ and temperature is $110 \text{ }^\circ\text{C}$, corresponding to a total conversion efficiency of 22%. By using the seed laser injection technology, we obtain single-frequency narrow linewidth laser output, the linewidth of the signal laser with wavelength of $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ is less than 100 MHz, and the frequency drift is less than 141 MHz in 10 minutes.

Key words laser optics; doubly resonant optical parametric oscillator; injection seeding; PPMgLN crystal; single frequency laser

OCIS codes 140.3520; 140.3570; 190.4410; 190.4970

1 引言

$1.5 \sim 1.6 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ 波段是光学频谱中非常重要的大气光学窗口。其中, $3 \sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ 波段是大气衰

收稿日期: 2017-02-17; 收到修改稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61475170, 61505230)、上海市自然科学基金(12ZR1435100)

作者简介: 董怡静(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事中红外光参量振荡器方面的研究。E-mail: Yjdong@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及激光应用系统方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xhma@siom.ac.cn

减最小的红外窗口,且该波段覆盖水分子及大部分工业污染气体(CH_4 、 C_3H_8 、 HCl 、 HF 、 H_2S 等)的吸收峰,因此,该波段的激光在工业气体探测、激光医疗、激光雷达、光电对抗等领域具有十分广阔的应用前景^[1-2]。而 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段不仅是人眼安全波段,而且同样处于大气传输光学窗口,对大气烟雾的穿透能力较强,因而具有人眼安全、探测灵敏度高、探测距离远等优点,作为一种主动探测光源,可用于天气预报和全球气候探测^[3]等领域。

目前,国内外比较常用的可获得 $1.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段激光输出的技术路线大致分为以下几种:半导体激光器^[4-5]直接实现该波段输出(如 GaSbInAs LD 实现 $1.5\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 激光的输出)、长波长激光进行二倍频或三倍频^[6-7]、通过激光介质直接辐射输出^[8-9]、利用光学参量振荡器(OPO)^[10-11]的非线性频率变化技术获得信号光($1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$)和空闲光($3\sim 5\ \mu\text{m}$)的激光输出。利用 OPO 技术(其抽运源可采用成熟的固体激光器或光纤激光器),通过选择合适的非线性晶体以及合理设计腔形,可实现高脉冲能量、高重复频率宽波长调谐范围的激光输出。因此,OPO 技术是获得高功率、高光束质量中红外激光输出的有效途径,已成为中红外激光研究热点之一。

研究表明,准相位匹配技术(QPM)可通过周期性改变晶体的自发极化方向来补偿相位失配,从而在整个晶体长度内实现非线性频率转换。相比于双折射匹配(BPM)技术,QPM 技术不受波矢方向和偏振方向的限制,可以利用非线性晶体的最大非线性系数,且无走离效应,参量光相互作用的距离长。目前,掺杂氧化镁的周期性极化晶体(PPMgLN、PPMgLT)是一类高效的波长转换周期极化晶体,它的透光范围广,使用寿命长,有效非线性系数高,并具有低阈值、高增益、高转换效率等特点,是产生中红外波段激光的重要材料。但是,目前基于周期性极化晶体光参量振荡技术的报道大多集中在单共振参量振荡器(SRO)上^[12-15],即实现单一频率的激光(如信号光)谐振输出,而鲜有双共振参量振荡器(DRO)的相关报道。DRO 结构可以同时信号光和空闲光提供反馈,因此在双共振条件下,可以明显降低阈值。然而,其稳定性和可调性的降低抵消了这一优点,使得 DRO 结构未得到较多重视。2012 年,Xu 等^[16]将重复频率为 2 kHz 的声光调 Q Tm:YLF 激光器产生的 $1.9\ \mu\text{m}$ 激光作为抽运源,入射到 PPMgLN DRO 中,当平均抽运功率为 2.9 W 时,获得了 900 mW 的中红外激光输出,总输出转换效率和斜率效率分别达到了 31% 和 70%。2011 年,法国航空航天实验室的 Hardy 等^[17]报道了采用复合腔、双共振参量振荡结构(NesCOPO)实现宽调谐窄线宽中红外激光器输出的实验。Hardy 等选择脉冲宽度为 9.8 ns、重复频率为 4.8 kHz 的 $1.06\ \mu\text{m}$ 单频激光作为抽运源,利用晶体和腔镜的镀膜特性,巧妙地实现了信号光和空闲光的双共振,获得了调谐范围为 $3.8\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 、峰值功率为 50 W 的中红外单频激光输出, $3.8\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 激光的最高转换效率为 4%。2013 年,有研究者利用 DRO 以及种子激光注入技术实现了中红外激光的输出^[18],采用重复频率为 500 kHz、峰值功率为 2 W、脉宽为 10 ns 的 1064 nm 抽运光抽运周期极化钕酸锂(PPLN)DRO。在 OPO 自由振荡情况下,当抽运光能量为 800 μJ 时,获得了脉冲能量为 220 μJ 的 $1.6\ \mu\text{m}$ 信号光和脉冲能量为 30 μJ 的 $3.3\ \mu\text{m}$ 空闲光输出,空闲光转换效率为 5%,信号光转换效率为 25%~30%。利用种子注入方法将输出信号光的光谱线宽由未注入种子时的 10 nm 降低到了 0.2 nm。2015 年,南京大学的赵刚等^[19]在双通道钽酸锂超晶格(PPSLT) OPO 装置中成功实现了四波长同时振荡,获得了光谱宽度约为 100 nm 的可调谐中红外激光输出。

本文将自行设计的 1064 nm 单频脉冲全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源,设计了双共振 PPMgLN OPO 环形腔结构,研究了 DRO 输出信号光和空闲光的转换效率和光斑特性。当重复频率为 400 Hz、抽运光脉冲宽度 14.5 ns 时,抽运光-参量光的最大转换效率为 22%。采用单频种子激光注入技术成功实现了信号光的光谱线宽小于 100 MHz、10 min 内频率漂移不超过 141 MHz 的单频激光输出。

2 实验装置

1064 nm 单频激光抽运的双共振四镜环形腔 PPMgLN-OPO 实验装置如图 1 所示。抽运源为基于 RbTiOPO_4 (RTP) 电光晶体调谐腔长的种子注入单频调 Q 脉冲 Nd:YAG 全固态激光器,光束质量因子优于 1.2,脉宽约为 14.5 ns,脉冲波形如图 2(a) 所示。

实验用 PPMgLN 极化晶体的最大非线性极化率张量元素 $d_{33} = 25\ \text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$,抽运光和参量光的偏振方向都平行于晶体的极化光轴方向,有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 15.9\ \text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$,非线性光频转换时耦合波都采用 Z

轴偏振,采用“ $e \rightarrow e + e$ ”相位匹配方式。实验采用的晶体为多周期极化 PPMgLN 晶体(掺杂 MgO 的物质的量分数为 5%),其极化周期为 $30.5 \mu\text{m}$,几何尺寸为 $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,两个通光端面都镀有对抽运光、信号光和空闲光($1.06, 1.57, 3.3 \mu\text{m}$)增透的介质膜,该增透膜在三个波段范围内的反射率均小于 0.5%。晶体固定在温控炉上,温控炉的温度调节范围为 $20 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

PPMgLN-OPO 采用双共振环形腔结构,几何腔长为 243 mm 。凹面镜 M1 与 M2 的间距 L_1 为 80 mm ,M1 和 M2 的曲率半径均为 230 mm ,腔镜 M1 对抽运光高透,对信号光、空闲光的透过率均为 30%,腔镜 M2、M3 和 M4 均对抽运光高透,对信号光和空闲光高反(HR)。平面反射镜 M3 与 M4 的间距 L_3 为 33 mm ,两臂 L_2 和 L_4 均为 65 mm ,腔内入射光线与反射光线的夹角为 30° 。PPMgLN 晶体位于两个凹面镜 M1 和 M2 连线的中点处。输出光路中插入分光镜 M5 和 M6。M5 对空闲光高反,对信号光和抽运光高透;M6 对信号光高反,对抽运光高透。M7 用于将种子激光耦合到谐振腔中。

使用焦距 $f = 260 \text{ mm}$ 的平凸透镜将抽运光聚焦到 PPMgLN 晶体上,半波片 HWP1 和偏振分束器(PBS)用于调节抽运光的偏振态,使其在晶体内满足相位匹配条件,半波片 HWP2 用于调节入射到谐振腔的抽运光功率的大小。用 CCD 测得晶体中心处抽运光斑的直径为 $800 \mu\text{m}$,如图 2(b)所示,输出光路中插入分光镜 M5,用以分离空闲光和信号光,并有效滤除抽运光。利用种子注入方法实现输出信号光的光谱线宽压窄,波长为 $1.57 \mu\text{m}$ 的单频种子激光经过单模保偏光纤输出,先经过准直透镜变为近似平行光,再经过隔离器后由焦距 $f = 100 \text{ mm}$ 的聚焦透镜会聚到晶体中心位置,半波片 HWP3 可用来改变种子激光的偏振态,使其与腔内振荡光的偏振态匹配。

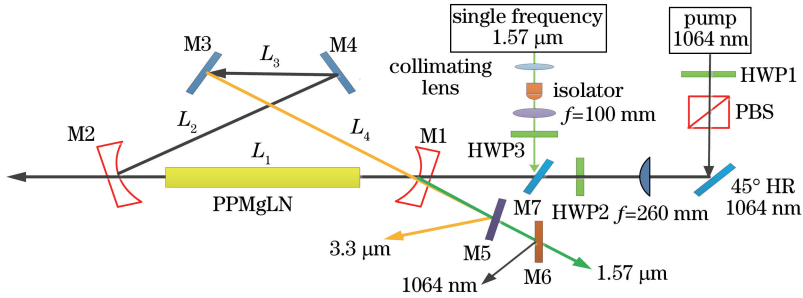


图 1 DRO 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of DRO experimental setup

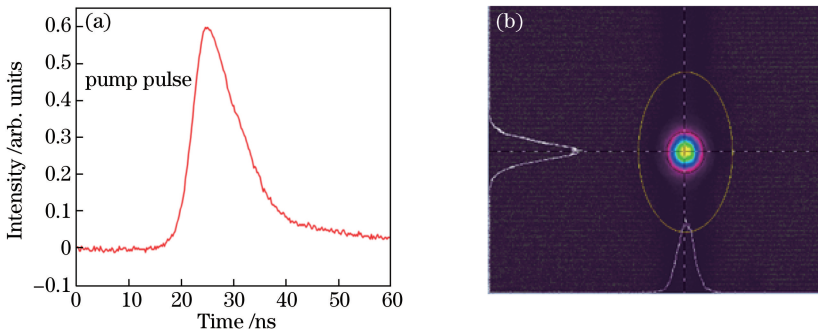


图 2 (a) 输入抽运光的脉冲波形; (b) 晶体中心处抽运光的光斑

Fig. 2 (a) Input pump laser pulse profile; (b) pump laser spot at the center of crystal

3 实验结果

利用图 1 所示的实验装置开展环形腔结构 PPMgLN-OPO 双共振输出的实验研究。PPMgLN 晶体的极化周期为 $30.5 \mu\text{m}$,当晶体温度从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,测得谐振腔输出波长的变化如图 3(a)所示。对比实验和理论计算结果可知,实验测得的波长变化与理论计算的波长变化趋势基本吻合。保持温控炉的温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 不变,当凹面镜 M1 对信号光和空闲光的透过率 $T = 30\%$ 时,测得谐振腔的输出功率如图 3(b)所示。

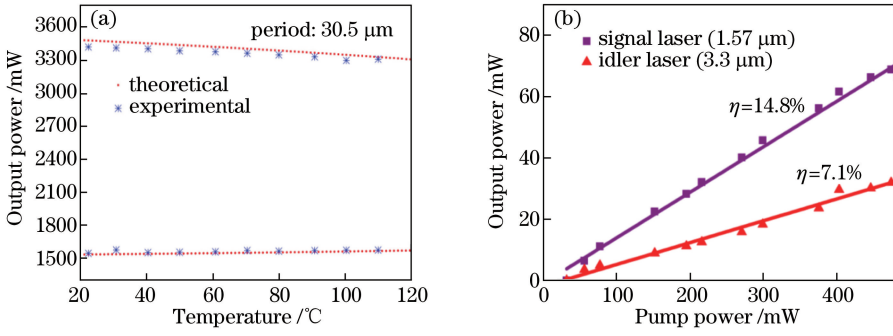


图3 (a) 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 晶体的温度调谐曲线; (b) $T=30\%$ 时, PPMgLN-OPO 输出功率与抽运功率的关系曲线

Fig. 3 (a) Temperature tuning curves for PPMgLN crystal pumped by laser with wavelength of 1064 nm;

(b) PPMgLN-OPO laser output power versus pump power when $T=30\%$

实验测得 OPO 的阈值抽运功率为 35 mW, 对应的阈值抽运光功率密度约 $2.40 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。对图 3 (b) 的实验数据进行拟合后可知, $1.57 \mu\text{m}$ 信号光和 $3.3 \mu\text{m}$ 空闲光的斜率效率分别为 14.8% 和 7.1%。当抽运光功率为 556 mW 时, 获得了平均功率为 79 mW 的 $1.57 \mu\text{m}$ 信号光和平均功率为 38.5 mW 的 $3.3 \mu\text{m}$ 空闲光输出, 计算可得 $1.57 \mu\text{m}$ 信号光的最高光-光转换效率为 15.4%, $3.3 \mu\text{m}$ 空闲光的最高光-光转换效率为 6.9%, 信号光和空闲光的强度比近似为 2.4, 略高于理论计算值(2.1)。分析实验结果可以发现, 双共振 PPMgLN-OPO 振荡器的转换效率低于理论模拟值^[20], 其原因主要是信号光和空闲光同时在谐振腔内振荡, 使得谐振腔内储存了大量信号光和空闲光的能量, 这些能量阻碍了光波之间的进一步转换。当腔内信号光和空闲光的能量增大达到一定值以后, 正向传输的参量光会发生和频过程, 产生抽运光, 即出现逆转换现象。图 4 所示为不同抽运功率下 OPO 输出信号光与剩余抽运光的脉冲时间波形图。当抽运光输入功率为 50 mW 时, 测得 OPO 输出剩余抽运光和信号光的脉冲波形如图 4(a) 所示, $1.57 \mu\text{m}$ 信号光的脉冲宽度为 9.4 ns, 剩余抽运光的脉冲宽度为 4.5 ns。当抽运光输入功率增大到 300 mW 时, 测得抽运光和信号光的脉冲波形如图 4(b) 所示, 抽运脉冲下降沿抬起明显, 这在一定程度上表明了当输入抽运光功率过大时, 谐振腔内会发生一次或多次逆转换。

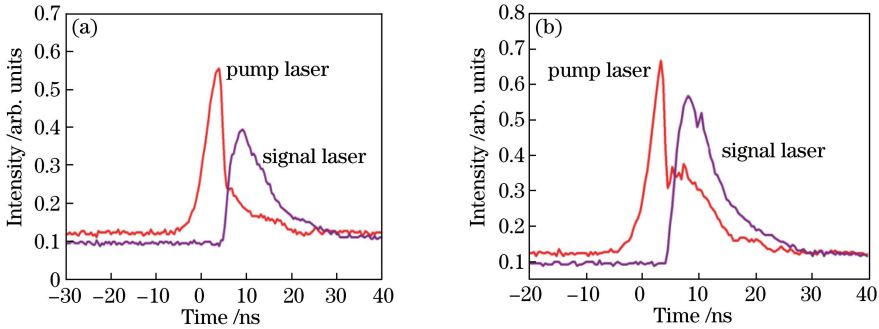


图4 不同抽运光输入功率 P_{pump} 下, 剩余抽运光与 $1.5 \mu\text{m}$ 信号光的脉冲波形。(a) $P_{\text{pump}}=50 \text{ mW}$; (b) $P_{\text{pump}}=300 \text{ mW}$

Fig. 4 Pulse profiles of residual pump laser and output signal laser with wavelength of $1.5 \mu\text{m}$ at different pump powers.

(a) $P_{\text{pump}}=50 \text{ mW}$; (b) $P_{\text{pump}}=300 \text{ mW}$

实验中对 OPO 输出信号光斑的空间强度分布进行了测量。在距输出凹面镜 (M1) 480 mm 处, 测得 $1.57 \mu\text{m}$ 信号光的光斑直径约为 5.5 mm, 探测到的信号光的光斑强度分布如图 5(a) 所示, 光斑呈较好的高斯分布。图 5(b) 为实验测得的信号光的光谱, 信号光的中心波长为 1570.66 nm, 光谱线宽为 0.65 nm (79 GHz)。实验测得空闲光的光谱如图 5(c) 所示, 其中心波长为 3299 nm, 光谱线宽为 1.0 nm, 已达到了所用光谱仪 (Omni-λ500, Zolix) 的最小分辨率(1 nm)。

为获得窄线宽的参量光输出, 实验中采用种子注入技术。种子激光器为连续输出的分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD), 其标称输出中心波长为 1572 nm (可调), 采用延时拍频法测得种子激光输出线宽为 600 kHz, 30 min 内频率稳定在 100 MHz 以下。通过种子激光器的温度和电流调节可改变其输出波长, 使

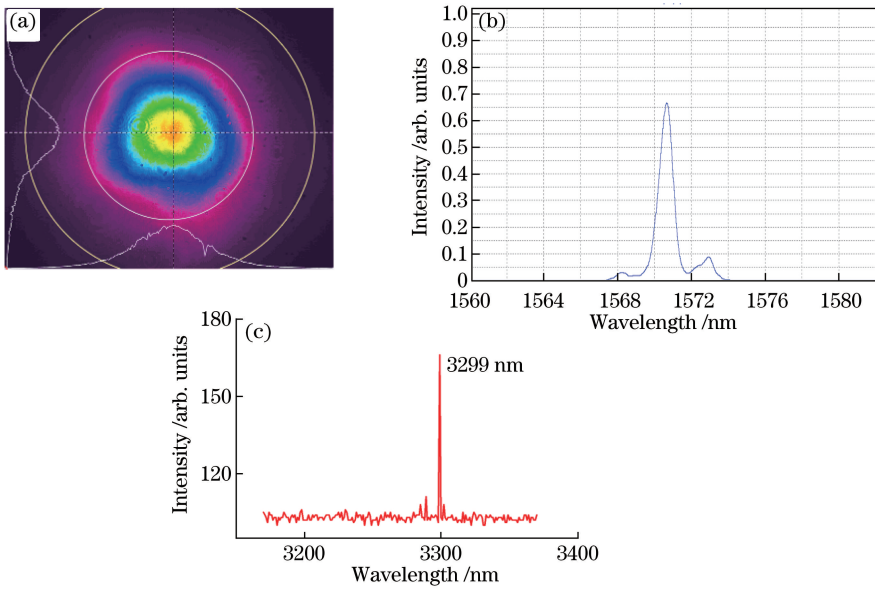


图 5 信号光的(a)光斑强度和(b)光谱以及(c)空闲光的光谱

Fig. 5 (a) Spot intensity and (b) spectrum of signal laser and (c) spectrum of idler laser

其输出的波长位于自由振荡 PPMgLN-OPO 信号光的中心波长附近。当种子光频率与环形腔的某一纵模频率足够靠近时,该纵模优先起振,获得绝对的竞争优势,OPO 环形腔将在该纵模频率上输出单频脉冲激光^[21]。实验过程中发现,在实现单频种子成功注入的条件下,OPO 输出光功率有所提高。利用波长计(WS7, HighFinesse)对单频种子注入后 OPO 输出信号光的线宽特性进行测量,线宽测量结果如图 6 所示,测得 OPO 输出信号光的中心波长为 1570.84 nm(190.84819 THz),信号光的线宽小于 100 MHz,已达到该波长计分辨率的极限。为进一步观察 OPO 单频输出信号光中心波长的稳定性,采用波长计实时监控了 OPO 输出信号光中心波长和种子波长随时间的变化情况,结果如图 7 所示。显然,种子光波长与 OPO 输出信号光的中心波长存在一定的偏差,且都在随时间变化。由图 7 的测量结果可以计算得到 10 min 内 OPO 输出信号光的频率漂移不超过 141 MHz。

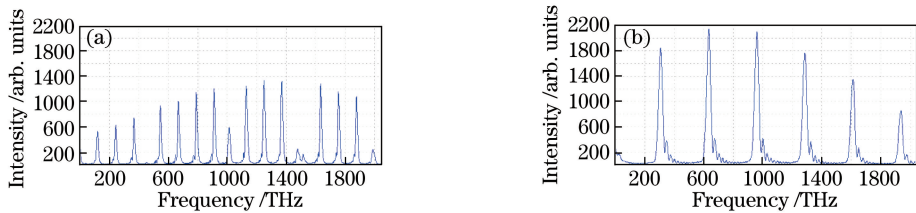


图 6 种子注入后 OPO 输出信号光的(a)中心频率和(b)线宽

Fig. 6 (a) Central frequency and (b) linewidth of OPO output signal laser with injection seeding

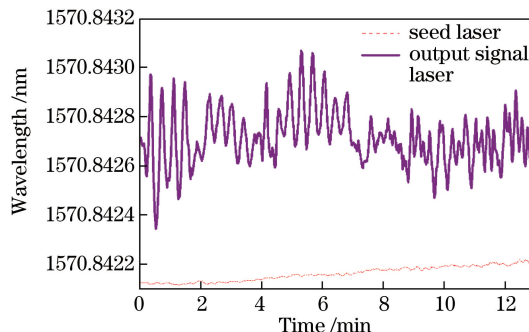


图 7 种子光和输出信号光中心波长随时间的变化

Fig. 7 Variations of central wavelengths of seed laser and output signal laser as a function of time

4 结 论

采用 1064 nm 单频纳秒脉冲全固态 Nd:YAG 激光器抽运 DRO 四镜环形腔 PPMgLN-OPO 振荡器,在晶体极化周期为 30.5 μm 、温度为 110 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,获得了最大平均功率为 79 mW 的 1.57 μm 信号光以及 38.5 mW 的 3.3 μm 空闲光输出,抽运光-参量光总转换效率最大可达 22%。采用种子激光注入技术压窄光谱线宽,获得了线宽小于 100 MHz、中心波长为 1.57 μm 的信号光输出,且 10 min 内频率漂移不超过 141 MHz。该装置有望利用压电陶瓷扫腔等手段进一步锁定双谐振腔,优化腔结构,提高参量光的转换效率,可应用于对光谱线宽、探测灵敏度要求较高的光谱学、激光遥感、环境探测等领域。

参 考 文 献

- [1] Numata K, Riris H, Li S, *et al.* Ground demonstration of trace gas lidar based on optical parametric amplifier[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063561.
- [2] Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 536-540.
范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 536-540.
- [3] Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, *et al.* Development of a 1.6 μm differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO₂ profile[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): 748-757.
- [4] Lehnardt T, Hummer M, Rossner K, *et al.* Continuous wave single mode operation of GaInAsSb/GaSb quantum well lasers emitting beyond 3 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 183508.
- [5] Gmachl C, Capasso F, Sivco D L, *et al.* Recent progress in quantum cascade lasers and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2001, 64(11): 1533-1601.
- [6] Ku S A, Chu W C, Luo C W, *et al.* Optical properties and application of GaSe:AgGaSe₂ crystal[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 57-63.
古新安, 朱韦臻, 罗志伟, 等. GaSe:AgGaSe₂ 晶体的光学性能及应用[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 57-63.
- [7] Zhang Xingliang, Guo Lihong, Zhang Chuansheng, *et al.* Design of high-voltage pulse trigger system for CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 416-422.
张兴亮, 郭立红, 张传胜, 等. CO₂ 激光器高压脉冲触发系统的设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 416-422.
- [8] Tokita S, Murakami M, Shimizu S. High power 3 μm erbium fiber lasers[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 2014: AM3A.4.
- [9] Yu Qingxu, Li Hong, Lin Junxiu. A CO₂-overtone laser based photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, 14(7): 669-671.
于清旭, 李 红, 林钧岫. 基于泛频 CO 激光器的微量气体光声光谱仪[J]. *光电子 • 激光*, 2003, 14(7): 669-671.
- [10] Su Ning, Zhang Mao, Ren Gang, *et al.* The development and application of 3-5 μm optical parametric oscillator[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(4): 359-364.
苏 宁, 张 茂, 任 刚, 等. 3~5 μm 光学参量振荡器研究进展及其应用[J]. *光学技术*, 2013, 39(4): 359-364.
- [11] Peng Y, Wang W, Wei X, *et al.* High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2897-2899.
- [12] Peng Y F, Wei X, Wang W M, *et al.* High-power 3.8 μm tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(20): 4032-4035.
- [13] Wu B, Kong J, Shen Y H. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 μm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1118-1120.
- [14] Liu J, Liu Q, Yan X, *et al.* High repetition frequency PPMgOLN mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(9): 630-633.
- [15] Lin D J, Alam S, Shen Y H, *et al.* An all-fiber PM MOPA pumped high-power OPO at 3.82 μm based on large aperture PPMgLN[C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82371K.
- [16] Xu L, Zhang S Y, Chen W B. Tm:YLF laser-pumped periodically poled MgO-doped congruent LiNbO₃ crystal optical parametric oscillators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 743-745.
- [17] Hardy B, Berrou A, Guilbaud S, *et al.* Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 678-680.

- [18] Mel'nikov I V, Machnev A A, Novozhylov P B, *et al.* Compact mid-IR source based on a DFB diode, fiber amplifier, and PPLN[C]. SPIE, 2013, 8601: 860132.
- [19] Zhao Gang, Jiang Xudong, Lü Xinjie, *et al.* Four-wavelength near and mid-infrared optical parameter oscillator based on superlattice[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502004.
赵 刚, 蒋旭东, 吕新杰, 等. 基于光学超晶格的四波长近-中红外光参量振荡器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502004.
- [20] Xu Lin. 1.9 μm laser pumped PPMgLN mid-infrared optical parametric oscillator[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 20-24.
徐 林. 1.9 μm 激光泵浦 PPMgLN 的中红外光学参量振荡器[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012: 20-24.
- [21] Park Y K, Giuliani G, Byer R L. Single axial mode operation of a Q-switched Nd:YAG oscillator by injection seeding [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(2): 117-125.