

# 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5 $\mu\text{m}$ 连续单频激光

李 鹏 马亚云 聂丹丹 冯晋霞 张宽收

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 报道了利用高功率全固态连续单频 1.06  $\mu\text{m}$  激光器, 抽运由准相位匹配晶体构成的单共振光学参量振荡器 (SRO), 产生光束质量接近衍射极限的 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光的实验研究。实验获得了输出功率为 3.2 W 的连续单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光, 光光转换效率达 40%, SRO 的阈值抽运功率仅为 2.5 W。当把 SRO 腔长主动锁定到共焦法布里-珀罗 (F-P) 腔的共振峰上, 信号光的频率稳定性优于 3 MHz(1 min)、功率稳定性优于  $\pm 0.5\%$ (15 min)。该系统的激光波长位于量子态传输波段, 可用于研究实用化量子信息处理系统。

**关键词** 非线性光学; 连续单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光; 单共振光学参量振荡器; 高效率; 频率稳定

**中图分类号** O437.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802008

## Continuous-Wave Single-Frequency 1.5 $\mu\text{m}$ Laser Generated by a Singly Resonant Optical Parametric Oscillator

Li Peng Ma Yayun Nie Dandan Feng Jinxia Zhang Kuanshou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** A continuous-wave (CW) single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser source is obtained by a singly resonant optical parametric oscillator (SRO) based on periodically poled lithium niobate. The SRO is pumped by a CW single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1.06  $\mu\text{m}$  with the pump threshold of 2.5 W. 3.2 W of CW single-frequency signal laser at 1.5  $\mu\text{m}$  is achieved at pump power of 8 W with the optical conversion efficient of 40%. When the SRO is actively locked to the centre frequency of a Fabry-Perot cavity, the power stability is better than  $\pm 0.5\%$  in 15 minutes and frequency stability is better than 3 MHz in 1 minute. The center wavelength of the laser system is in the wave band of quantum states transmission, so this kind of system can be employed for researches of practical quantum information processing.

**Key words** nonlinear optics; continuous-wave single frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser; singly resonant optical parametric oscillator; high conversion efficiency; frequency stabilization

**OCIS codes** 190.0190; 190.4970; 140.3570; 140.3425

## 1 引 言

1.5  $\mu\text{m}$  连续 (CW) 单频激光具有光束质量好、线宽窄、相干长度长、噪声低等特点, 而且激光波长位于人眼安全、光纤低损耗波段, 在激光遥感探测、光纤通信、量子信息与技术等领域有着重要的应用前景。

利用激光二极管抽运钕共掺的激光晶体, 如 Er:Yb:YCOB、Er:Yb:GdCOB 和 Er:Yb:YAB<sup>[1-3]</sup> 等, 可以获得全固态 1.5  $\mu\text{m}$  激光器, 但由于该类激光晶体具有严重热效应使激光器的输出激光功率受到限制, 目前只有输出功率达 400 mW 的连续单频

**收稿日期**: 2014-01-22; **收到修改稿日期**: 2014-02-25

**基金项目**: 国家重大科学研究计划 (2010CB923101)、国家自然科学基金 (61227015, 61121064, 11204167)、国家重大仪器专项 (2011YQ030127)

**作者简介**: 李 鹏 (1988—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术和非线性光学等方面研究。

E-mail: lipengnh@163.com

**导师简介**: 张宽收 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事量子光学及激光技术等方面的研究。E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn (中国光学学会会员号: s042011178s)

1.5  $\mu\text{m}$ 激光器的报道<sup>[4]</sup>。利用受激拉曼过程可以将 1.3  $\mu\text{m}$  的激光频移到 1.5  $\mu\text{m}$  波段,但由于拉曼效应相对较弱,激光器均以脉冲方式运转<sup>[5]</sup>。发展迅速的光纤激光器可以直接输出 1.5  $\mu\text{m}$  波段的连续单频激光,但存在远高于散粒噪声极限的强度噪声,使其在量子光学、量子信息与技术方面的应用受到限制。连续波光学参量振荡器(OPO)可以通过非线性频率变换拓宽激光的波长范围,输出激光具有宽的调谐范围、高的输出功率和窄的线宽,是一种理想的相干辐射装置<sup>[6]</sup>。单共振光学参量振荡器(SRO)与三共振和双共振光学参量振荡器相比,虽然抽运阈值功率较高,但容易实现稳定的激光输出<sup>[7]</sup>。随着全固态连续单频激光器和准相位匹配晶体的发展,SRO技术也得到进一步发展和应用。利用 1.06  $\mu\text{m}$  连续单频激光抽运由准相位匹配晶体构成的 SRO,为获得 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光开辟了一种有效途径。2008 年, Lin 等<sup>[8]</sup> 报道了中红外闲置光共振的 SRO,在抽运功率 25 W 时获得了 5.3 W 的非共振 1.58  $\mu\text{m}$  激光输出,由于氧化镁掺杂的周期极化铌酸锂(MgO:PPLN)对 3  $\mu\text{m}$  激光的吸收较强,该装置的抽运阈值功率高达 9 W。在 SRO 中,抽运激光的频率不稳定将传递到非共振激光上,通常共振激光比非共振激光的光谱特性更好<sup>[9]</sup>。2011 年, Kumar 等<sup>[10]</sup> 采用信号光共振且有部分耦合输出的 SRO,在 28.6 W 的抽运功率下获得了 9.8 W 的 1594 nm 信号光。

为满足在量子通信与技术、高分辨率光谱等领域中的应用需求,本文采用自行研制的全固态连续单频 1.06  $\mu\text{m}$  激光器抽运由 PPLN 构成的、信号光共振且有部分耦合输出的 SRO,进行了获得 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光实验研究。在降低抽运阈值功率、提高信号光转换效率和光束质量的基础上,对 SRO 的输出稳定性进行了研究。

## 2 实验装置

图 1 为利用单共振光学参量振荡器产生 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光的实验装置。抽运源为自行研制的输出功率为 10 W 的全固态连续单频 1.06  $\mu\text{m}$  激光器,半波片(HWP)用来控制激光的偏振方向,偏振分束器(PBS)用于激光的分束,光隔离器(OI)用来抑制由光学元件反射的激光,保证激光器稳定运转,透镜 L 用来进行光束准直和空间模式匹配,PZT 为压电陶瓷,F-P 腔为法布里-珀罗腔。经过一系列光学元件后,SRO 腔前 1.06  $\mu\text{m}$  抽运光

的功率为 8 W。

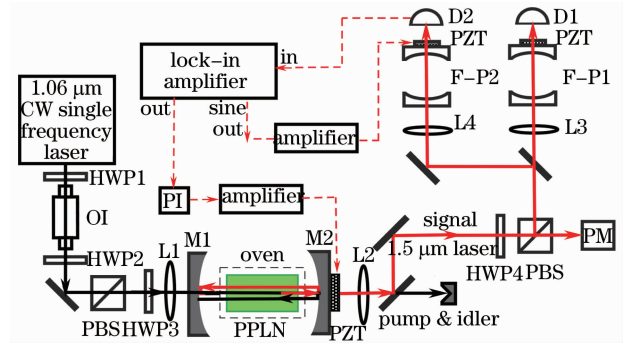


图 1 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser generated by a SRO

SRO 是由两个曲率半径为 26 mm 的平凹镜构成的两镜驻波腔,输入耦合镜的平面镀抽运光减反膜( $R_{1.06 \mu\text{m}} < 1\%$ ),凹面镀抽运光高透膜、信号光高反膜( $T_{1.06 \mu\text{m}} > 90\%$ ,  $R_{1.5 \mu\text{m}} > 99.8\%$ );输出耦合镜的平面镀信号光减反膜( $R_{1.5 \mu\text{m}} < 1\%$ ),凹面镀抽运光高反膜、信号光部分反射膜( $R_{1.5 \mu\text{m}} = 98.2\%$ ,  $R_{1.06 \mu\text{m}} > 99.8\%$ )。1.06  $\mu\text{m}$  抽运光在腔内往返穿过 PPLN 晶体,1.5  $\mu\text{m}$  信号光在腔内共振且有部分耦合输出。由于镀膜技术的原因,SRO 腔镜均未对 3.3  $\mu\text{m}$  闲置光镀膜。非线性晶体选用尺寸为 1 mm(T)  $\times$  10 mm(W)  $\times$  30 mm(L) 的 PPLN 晶体,双端面均镀抽运光、信号光和闲置光减反膜( $R_{1.06 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}, 3.3 \mu\text{m}} < 0.5\%$ )。PPLN 晶体置于控温炉中,用自制的控温精度为 0.01  $^{\circ}\text{C}$  的高精度温度控制仪(Model YG-1HC)控制。通过选择 SRO 腔长为 63.8 mm,使得晶体中心处信号光的腰斑为 59.5  $\mu\text{m}$ 。利用一个焦距为 100 mm 的聚焦透镜 L1 将抽运光聚焦至 PPLN 晶体的中心位置,聚焦腰斑为 48.7  $\mu\text{m}$ ,使抽运光与 SRO 腔实现模式匹配,模式匹配率达到 98%。选择上述实验条件使得抽运光和信号光的聚焦因子都为 1<sup>[11]</sup>,以降低 SRO 的抽运阈值功率、提高光光转换效率。当 PPLN 晶体的极化周期为 29.8  $\mu\text{m}$ ,且晶体温度控制为 160  $^{\circ}\text{C}$  时,满足相位匹配条件、由 SRO 输出的下转换信号光波长为 1.58  $\mu\text{m}$ 、闲置光波长为 3.26  $\mu\text{m}$ 。经双色镜过滤掉抽运光和闲置光后的 1.5  $\mu\text{m}$  信号光用功率计(PM, LabMax-OP, Coherent)测量其功率。同时通过 HWP 和 PBS 构成的光束分束器分出小部分用于监视 1.5  $\mu\text{m}$  激光的模式、锁定 SRO 腔长以获得稳定输出。在实验中,首先通过把 SRO 各元件固

定于殷钢板上、在 SRO 腔外罩有机玻璃密封壳降低空气流动等措施来减小随机振动对 SRO 输出稳定性的硬性波动的影响。随后为获得频率和功率稳定的 1.5 μm 激光,采用振幅调制光谱技术把 SRO 腔长主动锁定到共焦 Fabry-Perot 腔(F-P2:自由光谱范围为 750 MHz,精细度为 300)的透射峰上。给 F-P 腔的 PZT 上加 15 kHz 正弦信号,振幅调制的 F-P 腔的透射信号经锁相放大器(SR830)混频、低通滤波获得误差信号,该误差信号经过自制的比例积分器(PI)处理、高压放大器(Model YG-2009A)放大后反馈到 SRO 腔的 PZT 上,实现 SRO 输出信号光的频率稳定。

### 3 实验结果

把 PPLN 晶体温度控制在 160 °C,通过调节抽运光方向、SRO 腔镜及改变输出镜上 PZT 的电压来微调 SRO 的腔长,即可获得稳定的下转换激光输出。1.5 μm 信号光的输出功率曲线如图 2 所示。SRO 的阈值抽运功率为 2.5 W,当抽运功率为 8 W 时,获得了最大 3.2 W 的 1.5 μm 激光输出。通过控制 PPLN 晶体的温度,从 130 °C 调节到 170 °C 时,可把 SRO 输出信号光的中心波长从 1.57 μm 调谐到 1.59 μm,调谐范围为 20 nm。图 2 中红色圆点为 SRO 的抽运倒空率,在 5~8 W 的抽运功率范围内,SRO 的抽运倒空率保持在 85%左右。

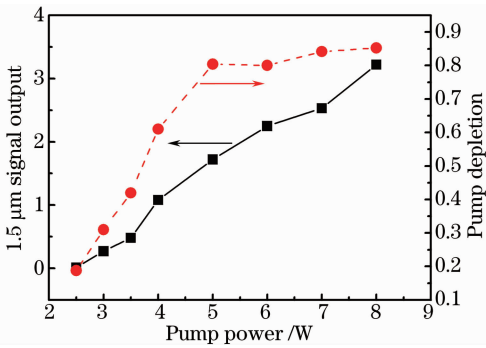


图 2 1.5 μm 信号光输出功率和抽运倒空率随抽运功率的变化曲线

Fig. 2 1.5 μm signal power and pump depletion versus pump power

当 SRO 稳定运转,输出的 1.5 μm 信号光的功率为 3.2 W 时,利用激光光束分析仪(Spiricon, M-200)对信号光的光束质量进行了分析,结果如图 3 所示。实测的信号光的光束质量因子在水平方向为 1.12,在垂直方向为 1.23。

在实验中,用共焦 F-P 腔(F-P1:自由光谱范围

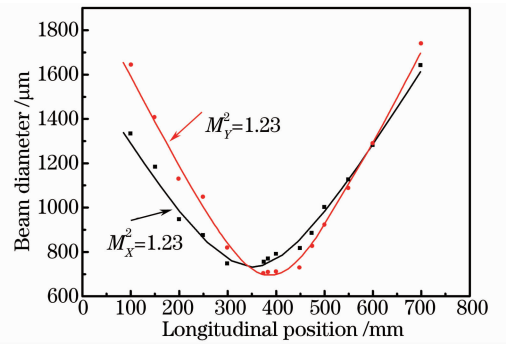


图 3 实测的信号光光束质量

为 375 MHz,精细度为 270)监视 1.5 μm 信号光的纵模模式,用数字存储示波器(Tektronix DPO 7245)记录。在抽运功率为 2.5~8 W 范围内,SRO 输出的 1.5 μm 激光均为单纵模运转。但在高抽运功率条件下,由于晶体吸收激光导致热效应严重,SRO 输出信号光容易发生跳模。当 SRO 自由运转时,实测的 1.5 μm 激光在 1 min 内的频率漂移为 10 MHz。当把 SRO 腔长主动锁定到共焦 F-P 腔的透射峰上,获得了频率稳定的 1.5 μm 激光输出,实测的频率漂移为 3 MHz(1 min),如图 4 所示。

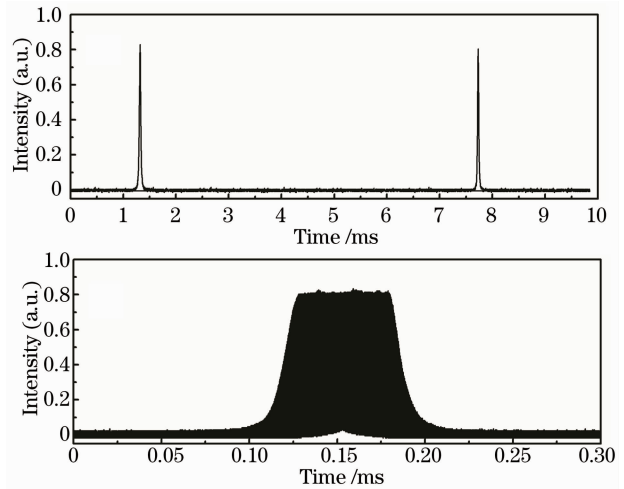


图 4 实测的扫描共焦 F-P 腔的透射峰

Fig. 4 Transmission intensity of the scanned Fabry-Perot interferometer

采用功率计记录了 1.5 μm 激光的功率稳定性。当 SRO 自由运转时,信号光会随机跳模,在 1 h 内的功率稳定性为 ±3%。当把 SRO 腔长主动锁定到共焦 F-P 腔的透射峰上,SRO 可以不发生跳模稳定运转 15 min,信号光的功率稳定性优于 ±0.5%,如图 5 所示。随后由于信号光的跳模导致 SRO 腔失锁,经过 3 min 的波动,SRO 腔又会重新锁定而稳定运转。

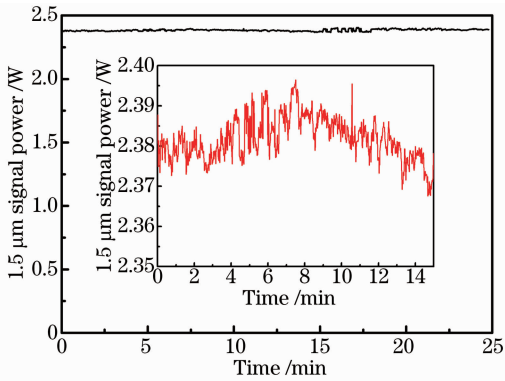


图5 当主动锁定 SRO 腔长时,信号光的功率波动  
Fig. 5 Stability of the signal output when the SRO is actively locked

## 4 结 论

采用自行研制的高功率全固态连续单频  $1.06 \mu\text{m}$  激光器抽运由 PPLN 构成的单共振光学参量振荡器,产生了光束质量接近衍射极限的  $1.5 \mu\text{m}$  连续单频激光。SRO 的  $1.06 \mu\text{m}$  抽运光在腔内往返穿过 PPLN 晶体,  $1.5 \mu\text{m}$  信号光在腔内共振且有部分耦合输出。实验研究中, SRO 的阈值抽运功率仅为  $2.5 \text{ W}$ , 当抽运功率为  $8 \text{ W}$  时, 连续单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光的输出功率为  $3.2 \text{ W}$ , 光光转换效率达  $40\%$ , 信号光的中心波长可通过控制 PPLN 晶体的温度调谐  $20 \text{ nm}$ 。在此基础上, 对 SRO 的输出稳定性进行了研究。当把 SRO 腔长主动锁定到共焦 F-P 腔的透射峰上, 实测信号光的频率稳定性在  $1 \text{ min}$  内优于  $3 \text{ MHz}$ 、功率稳定性在  $15 \text{ min}$  内优于  $\pm 0.5\%$ 。下一步将通过优化实验系统和锁腔电路,

进一步提高系统的运转稳定。该系统的激光波长位于量子态传输波段, 可在量子光学实验研究中, 用于连续变量量子纠缠态光源的制备。

## 参 考 文 献

- 1 P A Burns, J M Dawes, P Dekker, *et al.*. Optimization of Er, Yb: YCOB for CW laser operation [J]. IEEE J Quantum Electron, 2004, 40(11): 1575–1582.
- 2 B Denker, B Galagan, L Ivleva, *et al.*. Luminescent and laser properties of Yb-Er:GdCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: a new crystal for eye-safe  $1.5\text{-}\mu\text{m}$  lasers[J]. Appl Phys B, 2004, 79(5): 577–581.
- 3 N A Tolstik, S V Kurilchik, V E Kisel, *et al.*. Efficient 1 W continuous-wave diode pumped Er, Yb: YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(22): 3233–3235.
- 4 Yuanji Li, Jinxia Feng, Peng Li, *et al.*. 400 mW low noise continuous-wave single-frequency Er, Yb: YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser at  $1.55 \mu\text{m}$ [J]. Opt Express, 2013, 21(5): 6082–6090.
- 5 O V Kulagin, I A Gorbunov, A M Sergeev, *et al.*. Picosecond Raman compression laser at  $1530 \text{ nm}$  with aberration compensation[J]. Opt Lett, 2013, 38(17): 3237–3240.
- 6 L E Myers, R C Eckardt, M M Fejer, *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. J Opt Soc Am B, 1995, 12(11): 2102–2116.
- 7 S T Yang, R C Eckardt, R L Byer. Power and spectral characteristics of continuous-wave parametric oscillators: the doubly to singly resonant transition[J]. J Opt Soc Am B, 1993, 10(9): 1684–1695.
- 8 S T Lin, Y Y Lin, Y C Huang, *et al.*. Observation of thermal-induced optical guiding and bistability in a mid-IR continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. Opt Lett, 2008, 33(20): 2338–2340.
- 9 G K Samanta, M Ebrahim-Zadeh. Continuous-wave singly-resonant optical parametric oscillator with resonant wave coupling [J]. Opt Express, 2008, 16(10): 6883–6888.
- 10 S C Kumar, R Das, G K Samanta, *et al.*. Optimally-output-coupled,  $17.5 \text{ W}$ , fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator[J]. Appl Phys B, 2011, 102(1): 31–35.
- 11 G Boyd, D Keinman. Parametric interaction of focused Gaussian light beams[J]. J Appl Phys, 1968, 39(8): 3597–3639.

栏目编辑:何卓铭