

利用单共振光学参量振荡器产生宽调谐高功率连续单频红外激光

聂丹丹¹, 李渊骥^{1,2}, 冯晋霞^{1,2}, 张宽收^{1,2}

¹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;

²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 利用自制的高功率连续单频 1.06 μm 激光器抽运基于周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体的单共振光学参量振荡器(SRO), 实验产生了宽调谐高功率连续单频红外激光。通过控制改变 PPLN 晶体的极化周期和温度, 连续单频信号光和闲频光波长分别可从 1.45 μm 调谐到 1.79 μm 和从 2.62 μm 调谐到 3.99 μm 。当抽运功率为 15.5 W 时, 1.52 μm 信号光和 3.53 μm 闲频光的最大输出功率分别为 5.1 W 和 2.1 W, 光光转换效率达 46.5%。当 SRO 自由运转时, 信号光和闲频光在 4 h 内实测的功率波动分别小于 $\pm 2.77\%$ 和 $\pm 2.79\%$, 同时信号光在 4 h 内实测的频率漂移小于 ± 45 MHz。

关键词 激光器; 宽调谐; 高功率; 连续单频红外激光; 单共振光学参量振荡器

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401016

Broadly Tunable and High Power Continuous-Wave Single-Frequency Infrared Laser by a Singly Resonant Optical Parametric Oscillator

Nie Dandan¹, Li Yuanji^{1,2}, Feng Jinxia^{1,2}, Zhang Kuanshou^{1,2}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A singly resonant optical parametric oscillator (SRO) is built up based on periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal pumped by a self-made high power and continuous-wave (CW) single-frequency 1.06 μm laser. A broadly tunable and high power CW single-frequency laser source in the infrared is obtained and the signal and idler can be tuned from 1.45 μm to 1.79 μm and from 2.62 μm to 3.99 μm by controlling the polarization period and temperature of PPLN crystal, respectively. The measured maximum output powers of the signal (1.52 μm) and idler (3.53 μm) are 5.1 W and 2.1 W, respectively, at a pump power of 15.5 W. The optical conversion efficient of the SRO is 46.5%. When the SRO is free running, the power fluctuation of the signal and idler are less than $\pm 2.77\%$ and $\pm 2.79\%$ for a given 4 h, respectively, and the frequency drift of the signal is less than ± 45 MHz for the given 4 h.

Key words lasers; broadly tunable; high power; continuous single-frequency infrared laser; singly resonant optical parametric oscillator

OCIS codes 140.3600; 140.3570; 140.3070; 190.4970

收稿日期: 2018-01-12; 收到修改稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划(1331KS)

作者简介: 聂丹丹(1990—), 女, 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的研究。

E-mail: 13403438064@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(通信联系人)

1 引 言

宽波段调谐的近红外和中红外激光在高分辨率分子光谱^[1]、大气污染监测^[2]、量子信息与技术^[3]等领域有广泛的应用。光学参量振荡器(OPO)可产生从紫外到太赫兹波段的相干辐射激光^[4-5]。相对于其他可调谐激光器,OPO在激光波长调谐范围、输出功率等方面都具有一定优势。双共振光学参量振荡器(DRO)可实现较低阈值运转,但需要信号光和闲频光同时在腔内共振,从而对OPO的腔长进行严格控制,对抽运光的频率稳定性也有较高的要求。单共振光学参量振荡器(SRO)只需信号光或闲频光在腔内共振,具有输出功率稳定性好及可连续调谐等优点。

2004年 von Basum等^[6]利用基于周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体的连续波(CW)OPO获得了宽调谐中红外激光。通过改变晶体极化周期获得了波长可从 $3.1\ \mu\text{m}$ 调谐到 $3.9\ \mu\text{m}$ 的闲频光,当抽运功率为 $2.5\ \text{W}$ 时,闲频光输出功率为 $100\ \text{mW}$ 。并利用 Pound-Drever-Hall (PDH)稳频技术稳定闲频光的频率,在 $45\ \text{min}$ 内闲频光的频率变化范围小于 $\pm 30\ \text{MHz}$ 。2006年, Henderson等^[7]利用中心波长为 $1.083\ \mu\text{m}$ 的光纤激光器抽运基于氧化镁掺杂的周期性极化铌酸锂(MgO:PPLN)晶体的SRO,获得了调谐范围为 $2.65\sim 3.20\ \mu\text{m}$ 的闲频光。SRO的阈值为 $780\ \text{mW}$,当抽运功率为 $2.8\ \text{W}$ 时, $2.8\ \mu\text{m}$ 闲频光的输出功率 $750\ \text{mW}$ 。同年, van Herpen等^[8]报道了利用基于PPLN晶体的OPO,实验产生了调谐范围为 $3.9\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 的连续单频红外激光,并将红外激光与光声光谱相结合来探测追踪通风状态下昆虫所释放的 CO_2 。2007年, Samanta等^[9]报道了利用连续单频 $532\ \text{nm}$ 激光抽运基于MgO:sPPLT晶体的SRO,通过温度调谐获得了 $1.14\sim 1.417\ \mu\text{m}$ 的闲频光输出。当抽运功率为 $7.8\ \text{W}$ 时, $1.159\ \mu\text{m}$ 闲频光的最大输出功率为 $1.59\ \text{W}$,测量得到的闲频光在 $5\ \text{h}$ 内的峰值功率波动为 16% 。2012年, Hong等^[10]利用光纤放大器抽运基于MgO:PPLN晶体的OPO,在优化MgO:PPLN晶体温度的基础上,通过调谐抽运波长,中心波长为 $1.535\ \mu\text{m}$ 信号光可无跳模连续调谐 $900\ \text{GHz}$,并将该可无跳模连续调谐的红外激光用于研究甲烷的高分辨率吸收光谱。2015年, Li等^[11]报道了一种基于PPLN晶体的连续单频 $1.5\ \mu\text{m}$ SRO,在晶体温度从 $120\ ^\circ\text{C}$ 变为 $180\ ^\circ\text{C}$ 时,获得了波长调谐范围为

$1.560\sim 1.592\ \mu\text{m}$ 的连续单频红外激光。2016年, Jiang等^[12]通过优化抽运光功率和输出镜反射率,在 $2.9\ \mu\text{m}$ 波段实现了 $8\ \text{W}$ 的闲频光输出,输出效率达到 19.5% 。2017年, Shukla等^[13]报道了利用基于MgO:PPLN晶体的OPO产生可调谐高功率连续单频红外激光。通过对MgO:PPLN晶体进行温度调谐,获得了波长调谐范围为 $3.761\sim 3.970\ \mu\text{m}$ 的中红外激光和 $1.453\sim 1.484\ \mu\text{m}$ 的近红外激光。当抽运功率为 $16\ \text{W}$ 时, $1.464\ \mu\text{m}$ 信号光和 $3.895\ \mu\text{m}$ 闲频光的最大输出功率分别为 $4\ \text{W}$ 和 $2\ \text{W}$ 。

为了满足量子信息与技术、高分辨率光谱分析等领域对高功率宽调谐连续单频红外激光的需求,本文采用自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、信号光共振且有部分耦合输出的SRO,进行稳定的宽调谐、高功率连续单频红外激光的实验研究,并对SRO的波长调谐、输出功率、功率和频率稳定性等特性进行了详细研究。

2 实验装置

图1为利用基于PPLN晶体的SRO获得宽调谐高功率连续单频红外激光的实验装置。抽运源为自制的高功率全固态连续单频 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光器,最大输出功率为 $25\ \text{W}$,线宽小于 $200\ \text{kHz}$, $1\ \text{min}$ 内的频率漂移小于 $5\ \text{MHz}$ 。半波片(HWP)用来控制抽运光的偏振方向,光隔离器(OI)用来防止光学元件反射的激光进入激光器。SRO是由两个曲率半径为 $25\ \text{mm}$ 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($R_{1.06\ \mu\text{m}} < 0.2\%$),凹面镀抽运光高透膜、闲频光和信号光高反膜($T_{1.06\ \mu\text{m}} > 95\%$, $R_{3.3\ \mu\text{m}} > 99.8\%$, $R_{1.5\ \mu\text{m}} > 99.8\%$);输出耦合镜的平面镀信号光和闲频光减反膜($R_{1.5\ \mu\text{m}} < 0.2\%$, $R_{3.3\ \mu\text{m}} < 0.2\%$),凹面镀抽运光高反膜、闲频光高透膜和信号光部分反射膜($R_{1.06\ \mu\text{m}} > 99.8\%$, $R_{3.3\ \mu\text{m}} < 5\%$, $R_{1.5\ \mu\text{m}} = 97.5\%$)。在上述SRO腔镜的镀膜参数下,抽运光在腔内两次穿过非线性晶体,信号光在腔内共振并经输出耦合镜部分耦合输出,闲频光在腔内两次穿过非线性晶体并经输出耦合镜输出。PPLN晶体(Deltronic Inc,美国)的尺寸为 $1\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$,双端面均镀抽运光、信号光和闲频光减反膜($R_{1.06\ \mu\text{m}, 1.5\ \mu\text{m}, 3.3\ \mu\text{m}} < 0.5\%$),PPLN晶体具有8个极化周期,极化周期 Λ 分别为 $28.2, 28.6, 29.0, 29.4, 29.8, 30.2, 30.6, 31.0\ \mu\text{m}$ 。图2为周期极化的PPLN晶体的示意图。

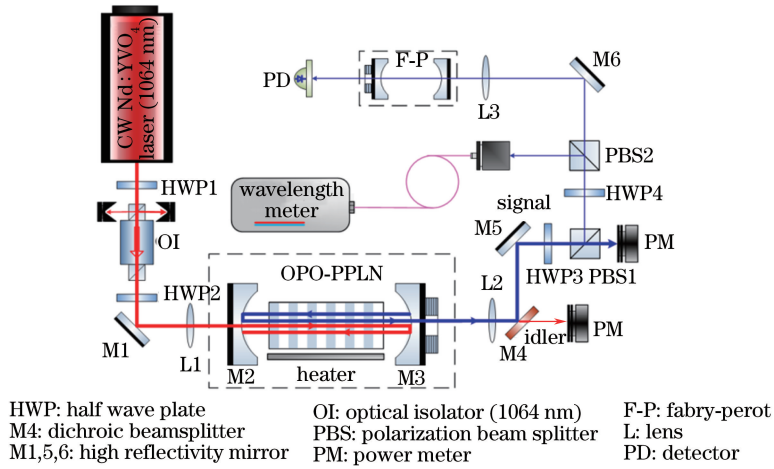


图 1 利用单共振光学参量振荡器产生连续单频红外激光的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for CW single-frequency infrared laser generated by a SRO

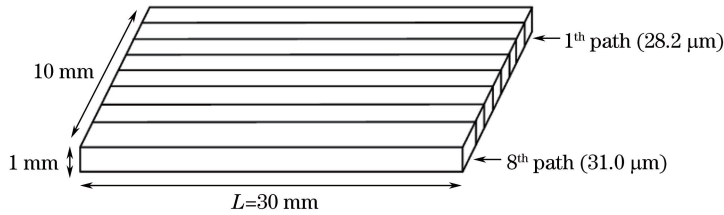


图 2 PPLN 晶体的示意图

Fig. 2 Diagram of PPLN crystal

PPLN 晶体放置在控温炉中,并由控温精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度控制仪(YG-1HC,宇光公司,山西太原)来控制。控温炉固定在电动平移台上,通过电动平移台精确控制 PPLN 晶体的极化周期。通过选择 SRO 腔长为 59 mm ,使得晶体中心处信号光的腰斑为 $59\text{ }\mu\text{m}$ 。利用焦距为 90 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 $48.7\text{ }\mu\text{m}$,使抽运光与 SRO 腔实现模式匹配,模式匹配率达到 98.3% 。选择上述实验条件使得抽运光和信号光的聚焦因子均为 $1^{[14]}$,从而降低 SRO 的抽运阈值功率,提高光光转换效率。用功率计(LabMax-TOP,Coherent,美国)分别测量经双色镜过滤掉抽运光和闲频光的信号光,以及经双色镜过滤掉抽运光和信号光的闲频光的输出功率和长期功率波动。通过 HWP 和偏振分束器(PBS)构成的光束分束器分出小部分信号光,利用 Fabry-Perot (F-P) 腔监视其纵模模式,通过波长计(WS6, HighFinesses GmbH,德国)测量其波长和长期频率漂移。

3 实验结果

通过精确控制 PPLN 晶体温度,调节抽运光方

向、SRO 腔镜,改变输出镜上压电陶瓷(PZT)的电压来微调 SRO 的腔长,即可获得稳定的下转换红外激光输出。当 PPLN 晶体极化周期为 $29.4\text{ }\mu\text{m}$ 、晶体温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,下转换信号光和闲频光的波长分别为 $1.52\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.53\text{ }\mu\text{m}$,实验测量的信号光和闲频光的输出功率曲线如图 3 所示。SRO 的阈值抽运功率为 3 W 。当抽运功率为 15.5 W 时, $1.52\text{ }\mu\text{m}$ 信号光和 $3.53\text{ }\mu\text{m}$ 闲频光最大输出功率分别为 5.1 W 和 2.1 W ,光光转换效率为 46.5% ,斜效率达 57.6% 。

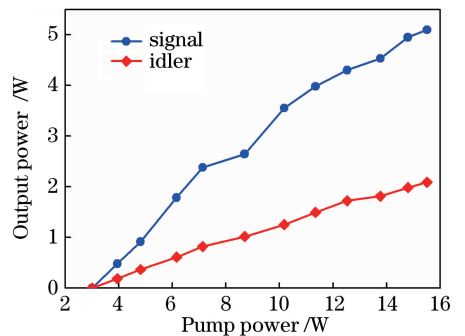


图 3 信号光和闲频光的输出功率随抽运功率的变化曲线
Fig. 3 Output power of signal and idler versus pump power

在上述 SRO 运转条件下,利用光束质量分析仪(M-200,Spiricon Inc,美国)测量分析了信号光的光

束质量,信号光的光斑轮廓如图 4 所示。实测的信号光在水平方向上的光束质量因子 $M_x^2 = 1.13$,在垂直方向上的光束质量因子 $M_y^2 = 1.31$ 。由于光束质量分析仪的波长测量范围为 $1.44 \sim 1.60 \mu\text{m}$,实验中来测量分析闲频光的光束质量。

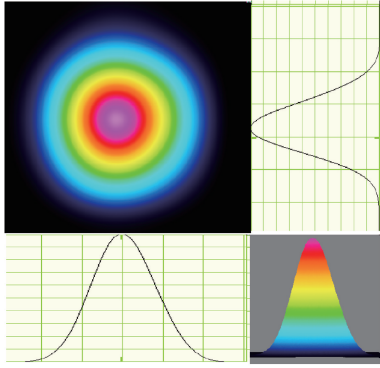


图 4 信号光的光斑轮廓
Fig. 4 Profile of the signal

在研究 SRO 输出信号光和闲频光的波长调谐过程中,为了避免 PPLN 晶体的光折射损伤,需要控制 PPLN 晶体的温度不低于 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而温度控制仪(YG-1HC,宇光公司,太原)的最高控制温度为 $196 \text{ }^\circ\text{C}$,因此在研究 SRO 输出信号光和闲频光的波长调谐过程中,PPLN 晶体温度的控制范围为 $120 \text{ }^\circ\text{C} \sim 196 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在抽运功率为 15.5 W 的情况下,利用电动平移台精确改变 PPLN 晶体的极化周期,通过温度控制仪精确控制 PPLN 晶体的温度,使用分辨率为 50 MHz 的波长计(WS6, HighFinesse GmbH,德国)测量记录的由 SRO 输出的信号光的波长如图 5 所示(图中的菱形数据点)。由于波长计的波长测量范围为 $1.0 \sim 2.25 \mu\text{m}$,实验中无法直接测量记录闲频光的波长。图 5 中的圆形数据点是根据能量守恒关系计算的由 SRO 输出的闲频光的波长。从图 5 可以看出,当 PPLN 晶体的极化周期由 $28.2 \mu\text{m}$ 变为 $31.0 \mu\text{m}$,晶体的温度由 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 变为 $196 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,由 SRO 输出的信号光的波长可从 $1.45 \mu\text{m}$ 调谐到 $1.79 \mu\text{m}$,闲频光波长可从 $2.62 \mu\text{m}$ 调谐到 $3.99 \mu\text{m}$ 。

当抽运功率为 15.5 W 、PPLN 晶体极化周期为 $29.4 \mu\text{m}$ 、晶体的温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,SRO 输出的中心波长为 $1.52 \mu\text{m}$ 的信号光的输出功率最大(实测值为 5.1 W),中心波长为 $3.53 \mu\text{m}$ 闲频光的输出功率最大(实测值为 2.1 W)。在该极化周期下,当控制 PPLN 晶体的温度从 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 变为 $196 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,SRO 皆可高效运转。当信号光波长从 $1.52 \mu\text{m}$ 调谐到

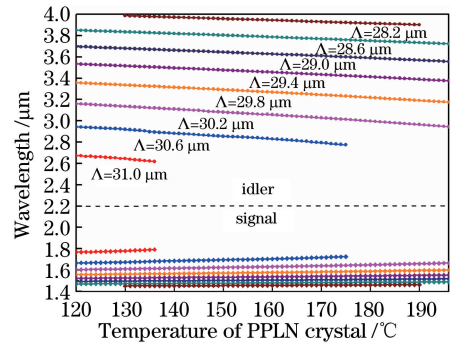


图 5 信号光和闲频光波长随 PPLN 晶体的极化周期和温度变化的调谐曲线

Fig. 5 Signal and idler wavelength versus PPLN crystal temperature at different polarization periods

$1.55 \mu\text{m}$,信号光的输出功率均大于 3.3 W 。当闲频光波长从 $3.53 \mu\text{m}$ 调谐到 $3.37 \mu\text{m}$,闲频光的输出功率均大于 1.0 W ,如图 6 所示。由于镀膜技术的原因,随着 SRO 输出的信号光和闲频光中心波长的变化,SRO 腔镜的镀膜参数逐渐偏离最佳值,信号光和闲频光的输出功率逐渐减小,SRO 的光光转换效率降低。当抽运功率为 15.5 W 、PPLN 晶体极化周期为 $28.2 \mu\text{m}$ 、晶体温度为 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,获得的最短波长的信号光的中心波长为 $1.45 \mu\text{m}$,该波长信号光的输出功率为 32 mW ;同时获得的最长波长的闲频光的波长为 $3.99 \mu\text{m}$,该波长闲频光的输出功率为 16 mW 。

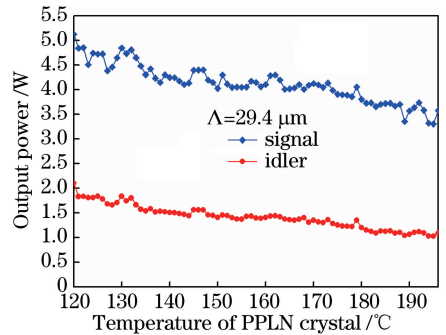


图 6 信号光和闲频光的输出功率随 PPLN 晶体温度的变化曲线
Fig. 6 Signal and idler powers versus temperature of PPLN crystal

在实验中,用中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的共焦 F-P 干涉仪(自由光谱范围为 750 MHz ,精细度为 1100)监视信号光的纵模模式,并用数字存储示波器(DPO 7245, Tektronix,美国)记录。共焦 F-P 干涉仪输出的透射曲线如图 7 所示,SRO 自由运转时,输出的信号光的模式为单纵模。但在改变 PPLN 晶体温度进行波长大范围调谐时,信号光会出现纵模模式跳变,不能实现无跳模波长调谐。

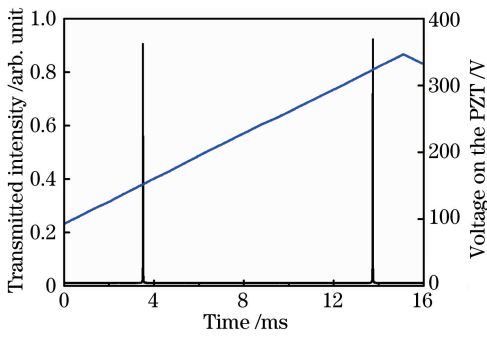


图 7 共焦 F-P 干涉仪输出的透射曲线

Fig. 7 Transmitted intensity of F-P interferometer

为进一步研究 SRO 的输出稳定性,用功率计 (LabMax-TOP, Coherent, 美国) 分别测量记录了信号光和闲频光的长期功率波动,并用波长计 (WS6, HighFinesses GmbH, 德国) 测量记录了信号光的长期频率漂移。当抽运功率为 15.5 W, PPLN 晶体极化周期为 29.4 μm 、晶体的温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ 时,用功率计测量记录的信号光和闲频光的输出功率随时间的变化曲线如图 8 所示,在 4h 内测得的信号光和闲频光的功率波动分别小于 $\pm 2.77\%$ 和 $\pm 2.79\%$ 。用波长计测量记录的信号光的长期频率漂移曲线如图 9 所示,在 4h 内测得的信号光的频率漂移小于 ± 45 MHz。

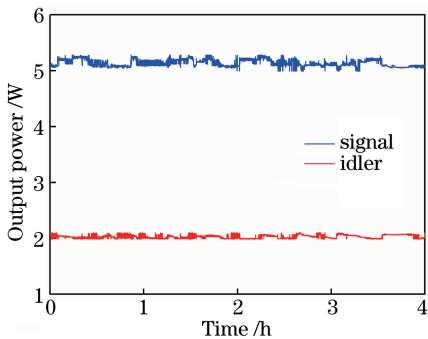


图 8 SRO 自由运转时,信号光和闲频光的输出功率随时间的变化曲线

Fig. 8 Output power of the signal and idler versus time when the SRO was free running

4 结 论

采用自制高功率全固态连续单频 Nd:YVO₄ 1.06 μm 激光器抽运由 PPLN 构成的单共振光学参量振荡器,进行了稳定的宽调谐、高功率连续单频红外激光的实验研究。通过控制改变 PPLN 晶体的极化周期和温度,连续单频的信号光和闲频光波长分别可从 1.45 μm 调谐到 1.79 μm 和从 2.62 μm 调谐到 3.99 μm 。当 PPLN 晶体极化周期为 29.4 μm 、

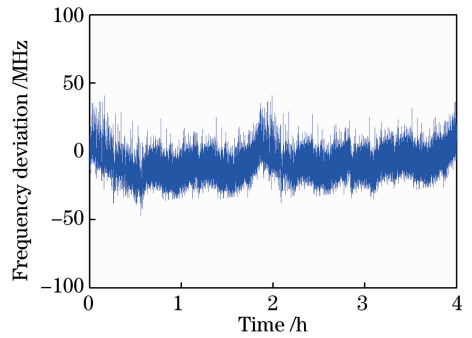


图 9 SRO 自由运转时,信号光的频率漂移曲线

Fig. 9 Frequency drift of the signal when the SRO free running

晶体的温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ 时,SRO 的阈值抽运功率为 3 W,1.52 μm 信号光和 3.53 μm 闲频光的最大输出功率分别为 5.1 W 和 2.1 W,光光转换效率为 46.5%,斜效率达 57.6%,信号光和闲频光的光束质量接近衍射极限。当控制 PPLN 晶体的温度从 120 $^{\circ}\text{C}$ 变为 196 $^{\circ}\text{C}$ 时,SRO 皆可高效运转,信号光的输出功率均大于 3.3 W,闲频光的输出功率均大于 1.0 W。当 SRO 自由运转时,信号光和闲频光在 4 h 内实测的功率波动分别小于 $\pm 2.77\%$ 和 $\pm 2.79\%$,同时信号光在 4 h 内实测的频率漂移小于 ± 45 MHz。该稳定运转的高功率宽调谐连续单频红外激光可广泛应用于量子信息与技术、高分辨率光谱分析等领域的研究。

参 考 文 献

- [1] Kovalchuk E V, Dekorsy D, Lvovsky A I, *et al.* High-resolution Doppler-free molecular spectroscopy with a continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(18): 1430-1432.
 - [2] Richter D, Fried A, Wert B P, *et al.* Development of a tunable mid-IR difference frequency laser source for highly sensitive airborne trace gas detection [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(2/3): 281-288.
 - [3] Dayan B, Pe'er A, Friesem A A, *et al.* Two photon absorption and coherent control with broadband down-converted light [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(2): 023005.
 - [4] Vainio M, Peltola J, Persijn S, *et al.* Singly resonant cw OPO with simple wavelength tuning [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11141-11146.
 - [5] Dong Y J, Ma X H, Li S G, *et al.* 3-5 μm optical parametric oscillator technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090004.
- 董怡静, 马秀华, 李世光, 等. 3~5 μm 光参量振荡技术进展研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53

- (9): 090004.
- [6] von Basum G, Halmer D, Hering P, *et al.* Parts per trillion sensitivity for ethane in air with an optical parametric oscillator cavity leak-out spectrometer[J]. Optics Letters, 2004, 29(8): 797-799.
- [7] Henderson A, Stafford R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 767-772.
- [8] van Herpen M M J W, Ngai A K Y, Bisson S E, *et al.* Optical parametric oscillator-based photoacoustic detection of CO₂ at 4.23 μm allows real-time monitoring of the respiration of small insects [J]. Applied Physics B, 2006, 82(4): 665-669.
- [9] 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.
- [10] Hong X P, Shen X L, Gong M L, *et al.* Broadly tunable mode-hop-free mid-infrared light source with MgO : PPLN continuous-wave optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 4982-4984.
- [11] Li P, Li Y J, Zhang K S. Stable low noise 1.5 μm laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(4): 045401.
- [12] Jiang H B, Shen L F, Zhao Z G, *et al.* Optimal conversion efficiency of continuous-wave optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001011.
姜洪波, 沈利洋, 赵志刚, 等. 连续波光参量振荡器最优转换效率的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001011.
- [13] Shukla M K, Das R. High-power single-frequency source in the mid-infrared using a singly resonant optical parametric oscillator pumped by Yb-fiber laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5): 5100206.
- [14] Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(8): 3597-3639.