

# 基于功率和波长锁定的可调谐飞秒光学参量振荡器

杨文凯, 宋有建\*, 范锦涛, 刘宇宏, 田昊晨, 李小英, 胡明列

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 设计并搭建了可调谐飞秒光学参量振荡系统, 研究了不同腔长处信号光的稳定性, 通过比例积分控制系统控制腔长, 分别利用功率锁定和波长锁定两种方法提升了系统的信号光输出稳定性, 对比了两种方法分别对信号光输出功率和光谱稳定性的提升效果, 研究了两种锁定方式的锁定特点。实验中, 利用光纤飞秒激光器抽运 PPLN 晶体, 实现了信号光中心波长在 1317~1610 nm 连续调谐。通过功率锁定, 将 15 min 内信号光的功率稳定性提升至 0.16%, 波长稳定性提升至 0.35%; 通过波长锁定, 将 15 min 内信号光的功率稳定性提升至 0.25%, 波长稳定性提升至 0.03%, 利用两种方法都实现了信号光输出功率和波长稳定性的提升。不同的应用领域对于飞秒光学参量振荡器输出信号光功率稳定性及光谱稳定性有不同的要求, 本研究对比了两种锁定方式的锁定效果, 为今后相关研究提供了实验依据与参考。

**关键词** 激光器; 非线性光学; 光学参量振荡器; 比例积分控制系统; 飞秒激光; 同步抽运

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001006

## Tunable Femtosecond Optical Parametric Oscillator Based on Power and Wavelength Locking

Yang Wenkai, Song Youjian\*, Fan Jintao, Liu Yuhong,

Tian Haochen, Li Xiaoying, Hu Minglie

*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of the Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** A tunable femtosecond optical parametric oscillator is designed and built, and the signal light stability with different cavity lengths is studied. The output stability is improved by the method of power and wavelength locking respectively, and the cavity length is controlled by the proportional-integral control system. The effects of the two methods on improving the signal optical output power and spectral stability are compared. The output wavelength of the oscillator can be tuned from 1317 nm to 1610 nm. The standard deviation of signal output power and wavelength is promoted to 0.16% and 0.35% by using the power stabilization method over a period of 15 min, and to 0.25% and 0.03% by using the wavelength stabilization method over the same period of time. It proves that both the power stabilization method and the wavelength stabilization method are sufficient for output stability in optical parametric oscillator. The requirement of power stability and wavelength stability for the output signal of femtosecond optical parametric oscillator varies from different applications, this work compares and studies the locking effects of two locking methods, and provides experimental basis and reference for future research.

**Key words** lasers; nonlinear optics; optical parametric oscillator; proportional-integral control system; femtosecond laser; synchronously pump

**OCIS codes** 140.7090; 190.4360; 190.4970

## 1 引 言

飞秒光学参量振荡器(OPOs)<sup>[1]</sup>可以输出传统

超短脉冲激光器所不能直接覆盖的波长范围。随着抽运光源功率的提高<sup>[2]</sup>、新型抽运光源的发展和非线性晶体制备技术的成熟, OPOs 输出光谱范围不

收稿日期: 2018-03-29; 修回日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(11527808, 61675150, 61535009)、天津市杰出青年科学基金项目(17JCJQJC43500)

\* E-mail: yjsong@tju.edu.cn

断拓宽,输出功率不断提高。目前,OPOs 已经在量子光学、激光加工、遥感和生物学等领域获得广泛应用<sup>[3-6]</sup>。在量子光学、生物光子学、成像等领域的应用过程中,不仅要求 OPOs 输出波长覆盖范围宽、输出功率高,而且需要 OPOs 输出光谱及功率具备良好的长期稳定性。现已报道的飞秒 OPOs 多数为自由运转状态,受群速度色散的影响,只要保证 OPOs 腔长与抽运脉冲重复频率的失配量不超过一定的范围,OPOs 都可以满足同步抽运条件使信号光始终保持谐振,但是,在不同腔长条件下,实现谐振的信号光中心波长、功率及脉宽均不同<sup>[7-8]</sup>。抽运源的扰动、腔镜的振动、外部环境温度的变化和气流的扰动等因素都会引起 OPOs 腔长的抖动,影响自由运转状态下 OPOs 的输出稳定性。

OPOs 中对腔长的主动控制是实现输出稳定性提升的关键,通过选取信号光中心波长、功率或脉宽中的任何一个参数作为反馈量来调控腔长,都可以实现另外两个参数稳定性的提升。利用压电陶瓷驱动器(PZT)调控腔长的技术已广泛应用于飞秒激光器<sup>[9-10]</sup>。借鉴飞秒激光器腔长稳定的方法,1990年,Wachman 等<sup>[11]</sup>利用两个光电二极管分别监视信号光光谱两侧的强度变化,以两个光电二极管电压的差值作为误差信号,通过主动锁定的方法调控 OPOs 腔长对 OPOs 输出进行稳定,但是这一方法的应用受到输出信号光的光谱形状的不规则限制。为了解决这个问题,1996年,Butterworth 等<sup>[12]</sup>报道了利用位置传感探测器(PSD)通过闭环控制的方法调控 OPOs 腔长,从而提升输出信号光稳定性的方法;2010年,Lamour 等报道了利用类似的方法提升 OPOs 的输出稳定性,并研究了输出信号光功率及波长短期稳定性特点<sup>[13]</sup>。然而,在实际应用中,如何有效提高超短脉冲抽运 OPOs 输出光谱及功率的长期稳定性仍是一项重要而且具有挑战性的工作。

本文研究了不同腔长条件下信号光的输出稳定性,并通过功率锁定和波长锁定两种方法对 OPOs 输出信号光波长及功率进行锁定,对两种方法的锁定效果进行了对比。实验中,利用全保偏光纤飞秒放大系统作为抽运源,MgO:PPLN 作为非线性晶体,搭建了 OPOs 系统;通过调节晶体极化周期,实现了信号光中心波长在 1317~1610 nm 范围内的连续调谐。将 OPOs 系统置于密闭盒子里以隔离外界气流扰动,同时利用温控装置稳定晶体温度,以减小外界环境对系统的扰动。并进一步通过主动控制的方法控制 PZT 对 OPOs 腔长进行调控,使用比

例积分控制器(PI servo)分别对信号光倍频光光谱和信号光输出功率实现锁定,有效提升了 OPOs 输出信号光功率和光谱的稳定性。

## 2 实验装置及自由运转时信号光稳定性研究

### 2.1 实验装置

实验搭建同步抽运光学参量振荡器装置如图 1 所示。抽运源采用全保偏光纤放大系统,相比于非保偏系统,基于全保偏光纤及器件的全光纤放大系统具有更好的偏振稳定性和更高的脉冲质量<sup>[14]</sup>。放大系统输出激光中心波长为 1035 nm,脉冲宽度为 220 fs,重复频率为 96 MHz,输出平均功率为 1.4 W。扇形结构的周期极化 MgO:PPLN 晶体作为非线性材料,晶体极化周期为 25.5~32.5  $\mu\text{m}$ ,通光长度为 5 mm,通光截面尺寸为 10 mm  $\times$  0.5 mm。将非线性晶体固定在温控炉上,温控炉对晶体可以实现精度为 0.1  $^{\circ}\text{C}$  的精确温度控制;实验中将温度  $T$  设定在 85  $^{\circ}\text{C}$ ,以避免双折射导致的晶体损伤及晶体温度变化引起的光斑模式劣化<sup>[15]</sup>。谐振腔采用线型腔结构,其中 M1 和 M2 均为焦距为 75 mm 的凹面金镜,利用 M2 将抽运光聚焦到晶体上,保证最大的非线性转换效率,利用 M1 将晶体中产生的信号光准直;其余腔镜(M3~M6)均为镀膜介质镜,对抽运光和闲频光高透,对信号光高反,保证腔内信号光单谐振运转。OPOs 腔长约为 154 mm,与抽运光重复频率相匹配,其中腔镜 M6 被固定在位移平台上,用于手动微调腔长实现同步抽运。实验中,为了降低外部环境及光纤热效应的影响<sup>[16]</sup>,抽运端被放置在密封金属箱中隔绝外界气流扰动,并使用水冷装置保证恒温。同时将 OPOs 系统置于另一个密封盒子中,隔绝外界气流扰动。

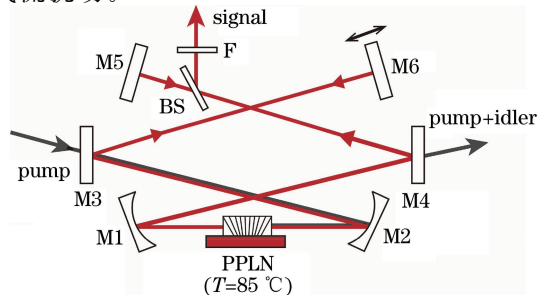
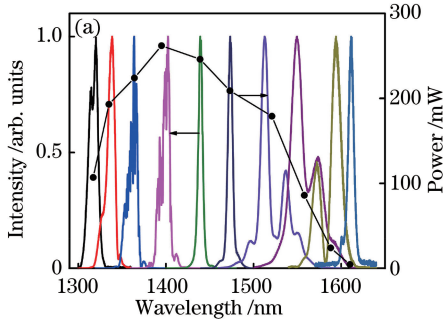


图 1 可调谐光学参量振荡器装置图

Fig. 1 Experimental setup of tunable optical parametric oscillator

### 2.2 OPOs 输出及自由运转时稳定性研究

首先,研究了 OPOs 输出信号光的光谱调谐和输出功率特性。信号光通过反射率为 8% 的薄膜分光片(BS)输出,通过滤光片(F)滤除其他杂散光。图 2(a)所示为 OPOs 信号光归一化输出光谱及对应功率,实验中光谱测量分辨率为 0.02 nm。通过改变晶体周期,输出信号光中心波长在



1317~1610 nm范围内连续调谐。当抽运光功率为 1.4 W 时,信号光输出平均功率从 1317 nm 处的 107 mW 变到 1610 nm 处的 4.3 mW;信号光中心波长在 1395 nm 处,输出最大平均功率为 262 mW。在长波波段信号光输出功率较低,可以通过增加抽运功率的方式提升长波波段信号光的输出功率。

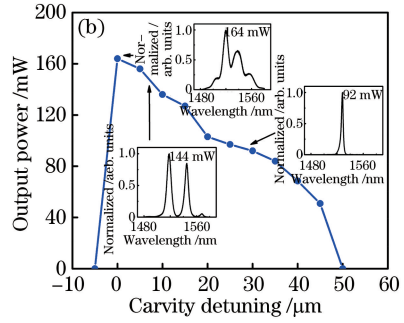


图 2 (a)输出信号光光谱及功率;(b)输出信号光功率随腔长的变化(插图分别为不同腔长下输出信号光光谱)  
Fig. 2 (a) Output spectra and power of signal light; (b) output power under different cavity lengths (inserts are spectra under different cavity lengths)

固定晶体周期为 30.5  $\mu\text{m}$ ,在一定范围内改变 OPOs 的腔长,在保证信号光谐振的前提下,研究了信号光的光谱和输出功率随腔长的变化情况。图 2(b)所示为输出信号光功率随腔长的变化,插图分别为信号光输出平均功率为 164,144,92 mW 时的归一化光谱。OPOs 在 50  $\mu\text{m}$  腔长调谐范围内均能保持谐振,在调谐过程中,信号光最大输出功率为 164 mW,将此时的腔长失谐量定义为 0,同时,定义向腔长变长的方向失谐量为负值,向腔长变短的方向失谐量为正值。信号光向负失谐量方向调谐范围小于 5  $\mu\text{m}$  便不再振荡。在正腔长失谐量方向,当腔长调谐范围在 0~20  $\mu\text{m}$ 、输出信号光平均功率大于 103 mW 时,信号光输出功率随腔长变化曲线的斜率较大,在大部分调谐范围内光谱形状都保持双波长状态。信号光输出功率在 144 mW 附近双波长运转的原因可以解释为实验中使用的腔镜是镀膜介质镜,对于信号光波段的近红外激光提供的群速

度色散为负色散,与 MgO:PPLN 晶体提供的材料色散符号相反,因此,可以用腔镜对 OPOs 腔色散进行补偿。当信号光运转在净零群速度色散附近时,处于不同波长的两个脉冲可以满足同步抽运的条件(即这两个波长的脉冲一个处于正色散区域,另一个处于负色散区域,其群速度相同),从而实现同时振荡<sup>[17]</sup>。当腔长调谐范围大于 20  $\mu\text{m}$  时,信号光输出平均功率小于 103 mW,信号光输出光谱形状为单峰结构,谱宽较窄。

选取信号光输出功率为 144 mW 和 92 mW 时,研究了自由运转状态下不同腔长条件下信号光输出平均功率和光谱的稳定性。图 3(a)和图 3(b)分别是信号光输出平均功率为 144 mW 和 92 mW 时,15 min 内信号光输出平均功率的稳定性。当信号光输出平均功率为 144 mW 时,前 5 min 信号光输出平均功率抖动较小,5 min 之后信号光功率开始出现明显的抖动,在 15 min 观测时间内信号光功率的标

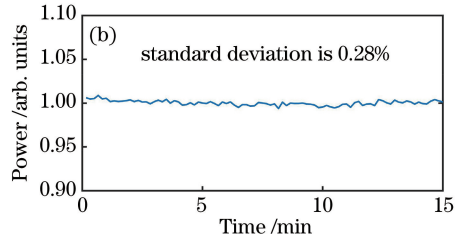
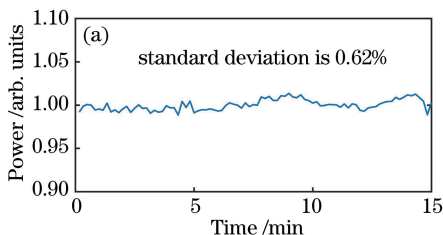


图 3 信号光输出功率稳定性。(a) 144 mW;(b) 92 mW  
Fig. 3 Power stability of signal light. (a) 144 mW; (b) 92 mW

准差为 0.62%。当信号光输出平均功率为 92 mW 时,信号光输出平均功率在 15 min 内的标准差为 0.28%,在整个观测时间内没有出现明显的起伏。

图 4 所示为信号光输出平均功率分别为 144 mW 和 92 mW 时,15 min 内信号光输出光谱的稳定性。实验中,将光谱仪分辨率设置为 0.02 nm,利用外部程序控制光谱仪,将光谱采样时间间隔设置为 10 s。当信号光输出平均功率为 144 mW 时,如图 4(a)和图 4(b)所示,初始信号光光谱为双波长结构,两个峰的中心波长分别为 1519 nm 和 1547 nm,短波处主峰半峰全宽为 9.82 nm,长波处次峰半峰全宽为 8.54 nm。在整个观测过程中,次峰幅值逐渐变小,谱宽逐渐增大,整个光谱形状由分立的双峰结构变为连续谱,覆盖范围为 1500~1570 nm,主峰极大值处波长漂移差最大为

1.18 nm,对应标准差为 0.64%。当信号光输出平均功率为 92 mW 时,如图 4(c)和图 4(d)所示,信号光光谱始终保持单峰结构,光谱极大值处波长为 1528 nm,初始半峰全宽为 3.20 nm。在 15 min 的观测时间内,信号光极大值处波长漂移差最大为 0.26 nm,对应标准差为 0.13%。

对信号光输出平均功率分别为 144 mW 和 92 mW 时信号光输出平均功率和光谱的稳定性研究可以发现,当腔长失谐量较大时信号光的输出稳定性更高,但是此时光谱的谱宽更窄。因此,自由运转状态下,要获得光谱和功率更加稳定的信号光输出,需以牺牲信号光功率大小和光谱谱宽为代价,为了获得更高平均功率、更宽光谱的信号光输出,需要在小腔长失谐量处对 OPOs 进行主动控制,提升信号光的稳定性。

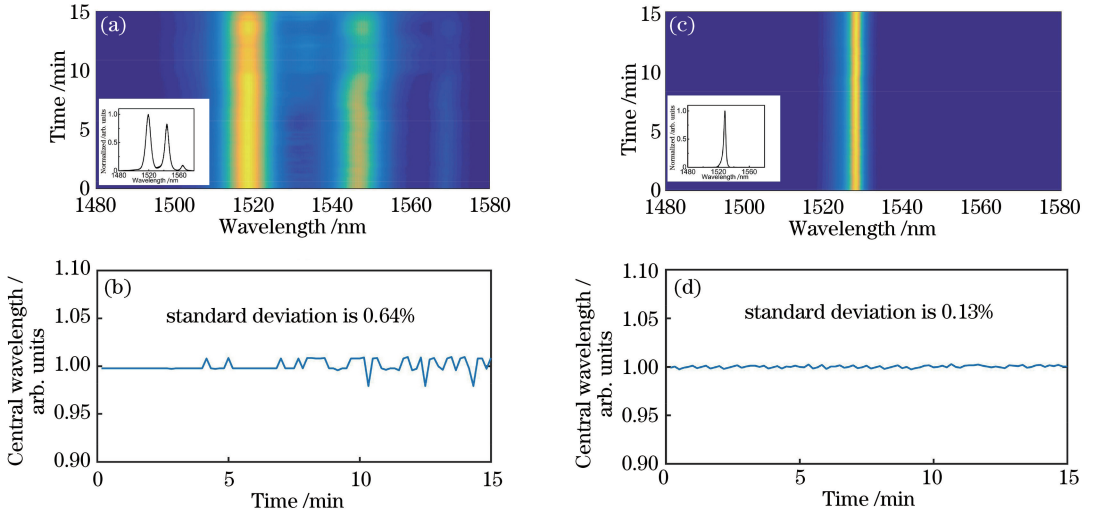


图 4 信号光输出光谱稳定性。(a)(b) 144 mW;(c)(d) 92 mW

Fig. 4 Spectrum and central wavelength stability of signal light. (a)(b) 144 mW; (c)(d) 92 mW

### 3 比例积分控制实验原理与结果分析

#### 3.1 基于比例积分控制的 OPOs 输出稳定原理

利用比例积分控制器控制 OPOs 腔长的原理如图 5 所示。实验中,首先手动调节 OPOs 腔长至锁定目标位置附近,根据探测器(D)探测到的 OPOs 输出信号设置参考值  $r(t)$ ,比例积分控制参数  $P$ 、 $I$ 。此后,在比例积分控制器中,探测器每一次探测到的信号  $y(t)$  与参考值  $r(t)$  进行比较,获得误差信号  $e(t)$ 。通过误差信号  $e(t)$  计算出对系统的纠正值  $u(t)$ ,将此纠正值经过高压放大器 A 放大。最后利用放大后得到的信号  $v(t)$  驱动固定腔镜 M6 的位移平台上的 PZT,补偿外界环境变化引起的腔长变化,使 OPOs 输出信号恒定在之前记录的参考值

$r(t)$  时的位置,实现对 OPOs 输出信号光的稳定。

实验中,利用波长锁定和功率锁定两种方式提

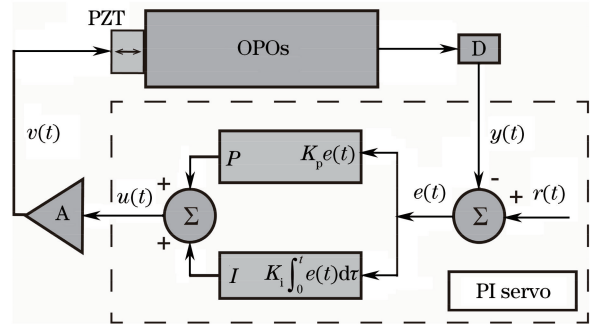


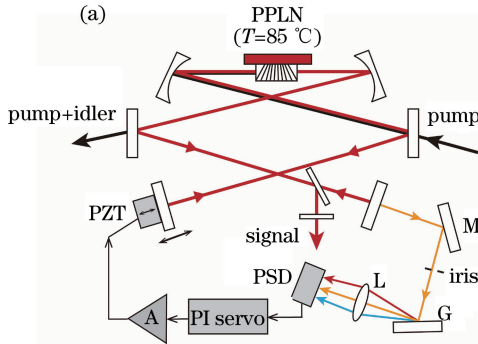
图 5 利用比例积分控制 OPOs 稳定性原理图

Fig. 5 Schematic of OPOs output stability with proportional-integral controller



升 OPOs 输出信号光的稳定性。

1) 波长锁定方法。实验装置如图 6(a) 所示, 所采用的 PSD 的接收波长范围为 320~1100 nm, 输出信号光光谱范围为 1317~1610 nm。因此, 实验中实际监测的是 OPOs 输出信号光的倍频信号(波长范围为 658~805 nm)。当光斑照射在 PSD 探测区域的某一位置时, PSD 会输出相应位置的电压信号。从介质镜 M5 泄露的信号光倍频光经过反射镜 M 反射, 通过小孔保证单一光点打在光栅(G)上发生衍射, 将二级衍射光通过焦距  $f=150$  mm 的柱面镜(L)会聚后照射到 PSD 上。当 OPOs 受到外界环境扰动时, 其输出信号光中心波长发生漂移, 同时光谱形状也会发生改变。经光栅衍射后, 信号光倍频光入射在 PSD 上的位置也会相应改变,



PSD 输出和中心波长相关的电压信号, 将该信号输入比例积分控制器中, 经过比例积分控制器处理后输出相应的校正信号  $u(t)$ , 将此校正信号通过放大器 A 放大后加载到 OPOs 腔镜 M6 上的 PZT, 实现 OPOs 输出的波长锁定, 以提升 OPOs 的输出稳定性。

2) 功率锁定方法。实验装置如图 6(b) 所示, 利用半波片(HWP)和偏振分束器(PBS)调整入射到功率探测器(PD)上的信号光功率, 使其低于探测器的最大探测功率。将功率探测器输出的电压信号输入到比例积分控制器中进行处理, 反馈控制过程与波长锁定的方法相同, 通过反馈调节 OPOs 腔镜 M6 上的 PZT 实现 OPOs 输出的功率锁定, 最终实现了 OPOs 输出稳定性的提升。

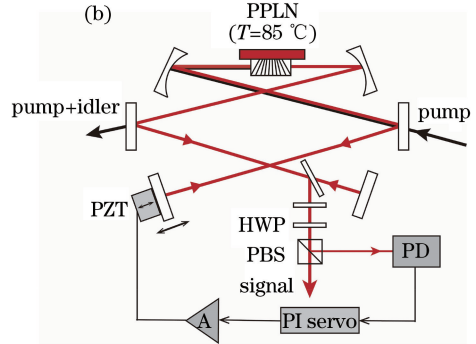


图 6 (a) 波长锁定装置图; (b) 功率锁定装置图

Fig. 6 (a) Experimental setup of wavelength stabilization; (b) experimental setup of power stabilization

### 3.2 基于比例积分控制的 OPOs 输出稳定性控制

为了提升信号光输出稳定性, 在输出平均功率为 144 mW 时分别采用功率锁定和波长锁定对 OPOs 腔长进行调控, 并测量了两种锁定情况下输出信号光功率及光谱在 15 min 内的稳定性。

图 7 所示为两种锁定方法下信号光功率稳定性。在不锁定的情况下, 信号光功率标准差为

0.62%。当通过功率锁定及波长锁定后, 信号光功率标准差分别提升至 0.16% 和 0.25%。利用功率锁定和波长锁定方法, 使得信号光功率和稳定性均得到了提升, 在整个观测时间内没有出现明显的功率起伏。同时可以发现, 相比于波长锁定方法, 功率锁定方法在输出功率稳定性的提升方面更加有效。

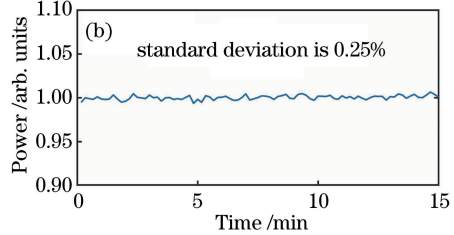
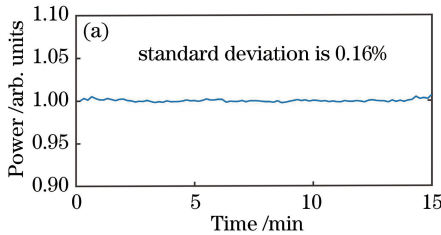


图 7 不同锁定方式下信号光输出功率稳定性结果。(a) 功率锁定; (b) 波长锁定

Fig. 7 Output power stability results of different stabilizing methods. (a) Power stabilization; (b) wavelength stabilization

图 8 所示为分别利用功率锁定和波长锁定后信号光光谱在 15 min 观测时间内的稳定性, 插图 of 初始锁定时信号光光谱。通过两种方法锁定后, 在

15 min 观测时间内, 信号光光谱形状没有发生明显的变化, 始终保持双波长状态。OPOs 自由运转时, 主峰极大值处波长漂移差最大为 1.18 nm, 标准差

为 0.64%。利用功率锁定后,主峰极大值处波长漂移差最大为 0.50 nm,标准差为 0.35%。利用波长锁定后,主峰极大值处波长漂移差最大为 0.06 nm,标准差为 0.03%。利用功率锁定和波长锁定均实现

了信号光输出光谱稳定性的提升,但是利用信号光倍频光谱作为反馈信号时,对信号光输出光谱稳定性提升效果优于利用信号光功率作为反馈信号时的提升效果。

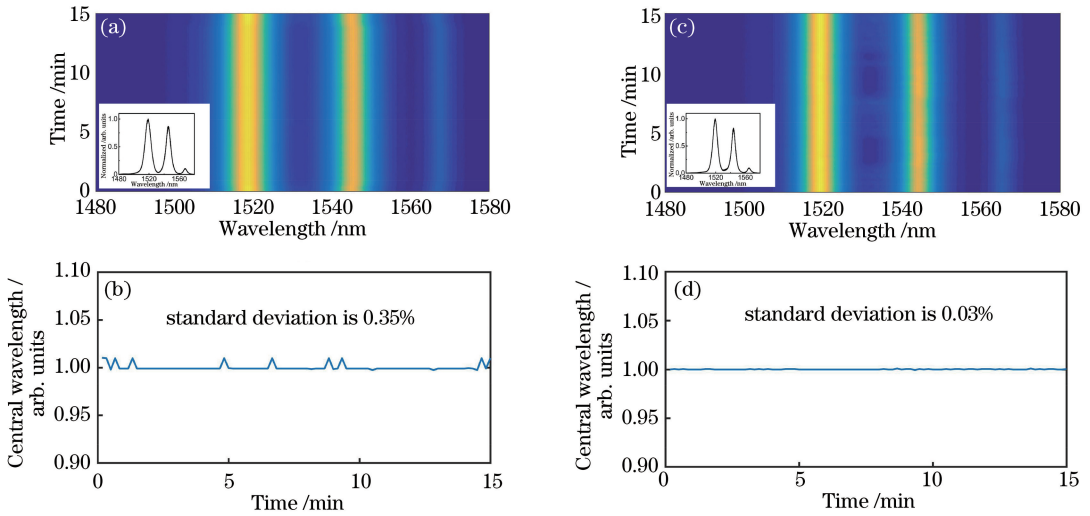


图 8 信号光输出平均功率为 144 mW 时,不同锁定方式下光谱稳定性结果。

(a)(b)功率锁定;(c)(d)波长锁定(插图为锁定开始时信号光光谱图)

Fig. 8 Wavelength stability results of different stabilizing methods with power of 144 mW. (a)(b) Power stabilization; (c)(d) wavelength stabilization (insert is initial spectra before stabilization)

## 4 结 论

搭建了同步抽运光学参量振荡器,通过改变非线性晶体周期,实现了信号光中心波长在 1317~1610 nm 范围内的连续调谐,研究了不同腔长处信号光输出功率和光谱特点,测量了自由运转时 OPOs 信号光输出功率和光谱稳定性特点。并对 OPOs 腔长进行反馈控制以提升 OPOs 输出稳定性;测量了 15min 内分别利用波长锁定及功率锁定时,信号光输出波长及功率稳定性提升的效果,并对锁定结果差异进行了对比分析。

将晶体周期固定在 30.5  $\mu\text{m}$ ,并将晶体温度设定为 85  $^{\circ}\text{C}$ ,研究发现自由运转的 OPOs 在腔长失谐量较大时,输出信号光的稳定性要高于腔长失谐量较小时信号光的稳定性。在输出平均功率为 144 mW 时分别利用波长锁定和功率锁定对 OPOs 腔长进行锁定,有效提升了 OPOs 输出信号光的稳定性。利用功率和波长锁定时,15min 内信号光功率标准差由自由运转的 0.62% 分别提升至 0.16% 和 0.25%;主峰极大值处波长漂移差由 1.18 nm 分别提升至 0.50 nm 和 0.06 nm,极大值处波长标准差由 0.64% 分别提升至 0.35% 和 0.03%。

不同的应用对 OPOs 输出信号光功率稳定性

和光谱稳定性的要求侧重点不同,本研究提供了波长锁定和功率锁定两种方法,为量子光学、光梳产生等领域的应用研究打下了良好的基础。

## 参 考 文 献

- [1] van Driel H M. Synchronously pumped optical parametric oscillators[J]. Applied Physics B, 1995, 60(5): 411-420.
- [2] Yu H L, Wang X L, Su R T, et al. Advances in high power femtosecond fiber laser systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050007.  
于海龙, 王小林, 粟荣涛, 等. 高功率飞秒光纤激光系统的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050007.
- [3] Yin J, Ren J G, Lu H, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. Nature, 2012, 488(7410): 185-188.
- [4] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(4): e149-e149.
- [5] Ehret G, Fix A, Weiss V, et al. Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapor DIAL application in the upper troposphere and lower stratosphere[J]. Applied Physics B, 1998, 67(4):

- 427-431.
- [6] Consani C, Aubbock G, van Mourik F, *et al.* Ultrafast tryptophan-to-heme electron transfer in myoglobins revealed by UV 2D spectroscopy [J]. *Science*, 2013, 339(6127): 1586-1589.
- [7] Haché A, Allan G R, van Driel H M. Effects of cavity detuning on the pulse characteristics of a femtosecond synchronously pumped optical parametric oscillator [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(11): 2209-2213.
- [8] Seres J, Hebling J. Nonstationary theory of synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 741-750.
- [9] Zhu M H, Wu X J, Wei H Y, *et al.* Closed-loop displacement control system for piezoelectric transducer based on optical frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 070702.  
朱敏昊, 吴学健, 尉昊赞, 等. 基于飞秒光频梳的压电陶瓷闭环位移控制系统[J]. *物理学报*, 2013, 62(7): 070702.
- [10] Tian H C, Song Y J, Ma C Y, *et al.* Timing and carrier envelope phase synchronization from two independent femtosecond lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801003.  
田昊晨, 宋有建, 马春阳, 等. 两台独立飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0801003.
- [11] Wachman E S, Edelstein D C, Tang C L. Continuous-wave mode-locked and dispersion-compensated femtosecond optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 136-138.
- [12] Butterworth D S, Girard S, Hanna D C. A simple technique to achieve active cavity-length stabilisation in a synchronously pumped optical parametric oscillator[J]. *Optics Communications*, 1996, 123(4/5/6): 577-582.
- [13] Lamour T P, Sun J H, Reid D T. Wavelength stabilization of a synchronously pumped optical parametric oscillator: optimizing proportional-integral control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(5): 053101.
- [14] Wen L, Liu B W, Song H Y, *et al.* All polarization-maintaining fiber amplification system to generate high-power and high-quality femtosecond laser pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201011.  
文亮, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201011.
- [15] Cai X T, Li X, Zhao G M. Beam quality deterioration caused by crystal temperature in optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1219001.  
蔡小天, 李霄, 赵国民. 光参量振荡器中的晶体温度引起的光束质量劣化[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1219001.
- [16] Hu Z T, He B, Zhou J, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080002.  
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080002.
- [17] Sun J, Gale B J, Reid D T. Dual-color operation of a femtosecond optical parametric oscillator exhibiting stable relative carrier-envelope phase-slip frequencies [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(13): 2021-2023.