

飞秒光参量振荡器的光谱净化和稳定性提升 (特邀)

同 晖, 覃治鹏, 谢国强*, 钱列加

(上海交通大学 物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室,
IFSA 协同创新中心, 上海, 200240)

摘 要: 文中首次提出并验证了基于腔内色散管理实现飞秒光参量振荡器 (OPO) 光谱净化和稳定性提升的方法。对于高功率飞秒 OPO, 输出脉冲通常具有随时间无序变化的宽带不规则光谱, 输出功率波动较大。利用铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体在腔内引入额外的负色散, 通过泵浦脉冲的时间滤波效应实现了干净平滑的窄光谱近转换极限的飞秒脉冲输出, 光谱稳定性和功率稳定性得到了极大改善。该方法是一种实现飞秒 OPO 光谱净化和稳定性提升的灵活简便的方法, 对于发展高功率的超短脉冲 OPO 具有重要的应用价值。

关键词: 光参量振荡器; 光谱净化; 功率稳定性; 色散管理; 时间滤波

中图分类号: O437.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201060

Spectrum cleaning and stability improvement of femtosecond optical parametric oscillator (*Invited*)

Tong Hui, Qin Zhipeng, Xie Guoqiang*, Qian Liejia

(Key Laboratory for Laser Plasmas (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A method for spectrum cleaning and stability improvement of femtosecond optical parametric oscillator (OPO) based on intracavity dispersion management was proposed and demonstrated for the first time. For high-power femtosecond OPO, the output pulses generally have irregular broadband spectrum varying with time, and the output power show a remarkable fluctuation. Through employing lithium niobate (LiNbO_3) crystal to introduce additional negative dispersion in the cavity, transform-limited femtosecond pulses with cleaning and smooth spectrum by temporal filtering effect of pump pulses were realized, and the spectrum stability and power stability of femtosecond OPO were greatly improved. This method is a simple and flexible way to realize the spectrum cleaning and stability improvement of femtosecond OPO, and is of significant value for the development of high power ultrashort-pulse OPO.

Key words: optical parametric oscillator; spectrum cleaning; power stability; dispersion management; temporal filtering

收稿日期:2020-09-27; 修订日期:2020-11-26

基金项目:国家自然科学基金 (61675130)

作者简介:同晖 (1995-), 男, 博士生, 主要从事中红外飞秒光参量振荡器方面的研究。Email: tonghui_19951211@sjtu.edu.cn

通讯作者:谢国强 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事中红外超短和超强激光技术方面的研究。Email: xieqg@sjtu.edu.cn

0 引言

高功率飞秒激光作为超快科学和工业应用的重要工具引起了人们的广泛关注。与锁模激光器相比,飞秒激光同步泵浦的 OPO 能够在紫外^[1]至中红外^[2-4]范围内产生宽带调谐的超快相干光源,因而在气体检测、空间光通信、激光医疗、激光加工、光电对抗等领域具有重要的应用价值。对于诸多应用,消除噪声波长的干扰,令光谱集中在目标波长附近并保持光谱和功率的稳定性是至关重要的。然而,当同步泵浦 OPO 工作在高功率状态下时,会输出宽带的非规则光谱^[5],同时光谱和功率稳定性变差,不利于实际应用。

目前,通过在 OPO 腔内插入法布里-珀罗 (F-P) 标准具^[6]、体布拉格光栅 (VBG)^[7] 或衍射光栅^[8-9] 等元件可以实现光谱窄化,从而使输出光谱集中在目标波长附近,而其它波长得到抑制。然而,当 OPO 的相位匹配带宽大于 F-P 标准具的自由光谱范围时,可能选出多个波长在腔内同时振荡,且容易出现波长跳动。VBG 是针对固定波长设计的,无法实现波长调谐。衍射光栅具有大的插入损耗,不利于高功率运行。因此,对于高功率的飞秒 OPO 系统,需要一种灵活简便的方法实现光谱净化和稳定性提升。

文中首次基于腔内色散管理实现了飞秒 OPO 的光谱净化和稳定性提升。当飞秒 OPO 的泵浦功率超过一定值时,随着泵浦功率的继续提高,输出光谱逐渐变为宽带的非规则光谱,且随时间无序变化。通过在腔内插入 LiNbO₃ 晶体引入额外的负色散,利用时间滤波效应在 2.1~2.5 μm 的整个调谐范围内得到了干净平滑的窄带光谱输出,并且光谱稳定性和功率稳

定性得到了大幅提升。该方法灵活简便,在高功率飞秒 OPO 中具有重要的应用价值。

1 实验装置

基于色散管理实现光谱净化和稳定性提升的飞秒 OPO 装置如图 1 所示。泵浦源是一套基于 Yb 光纤的主振荡功率放大 (MOPA) 系统,输出激光的脉冲宽度为 800 fs,重复频率 84.2 MHz,中心波长 1030 nm,光谱带宽 1.9 nm。为了防止激光反馈回泵浦源,在 MOPA 系统的输出端放置了一个法拉第隔离器。隔离器的前后各放置一个半波片,其中第一个半波片将激光的偏振方向旋转到隔离器的传输方向,第二个半波片控制入射至 OPO 晶体的激光偏振方向,从而实现最佳的相位匹配。利用两个焦距分别为 40 mm 和 50 mm 的平凸透镜 L1、L2 将泵浦光聚焦到非线性晶体中,焦点处的光斑直径为 310 μm。OPO 中使用的非线性晶体为掺杂 5 mol% 氧化镁的周期极化铌酸锂 (MgO:PPLN),长度为 2 mm,横截面积为 1 mm×1.5 mm,极化周期为 31 μm。MgO:PPLN 晶体置于温控平台上,其温度可在 -30 ℃~100 ℃ 范围内双向调节。该晶体在泵浦光和闲频光波段镀有增透膜,其中在 2.0~2.65 μm 波长范围内透过率大于 99.5%,在 1.02~1.08 μm 波长范围内透过率大于 95%。平凹镜 M1、M2 的曲率半径为 500 mm。平平反射镜 M3 固定在一维平移台上,用于微调腔长。M1、M2、M3 在 2.06~2.5 μm 波长范围内反射率大于 99.5%,在 1.02~1.04 μm 波长范围内透过率大于 90%。将一个长度为 30 mm 的 LiNbO₃ 晶体置于腔内,用于提供额外的负色散。该 LiNbO₃ 晶体表面镀有增透膜,在 2.0~2.5 μm 波长范围内透过率大于

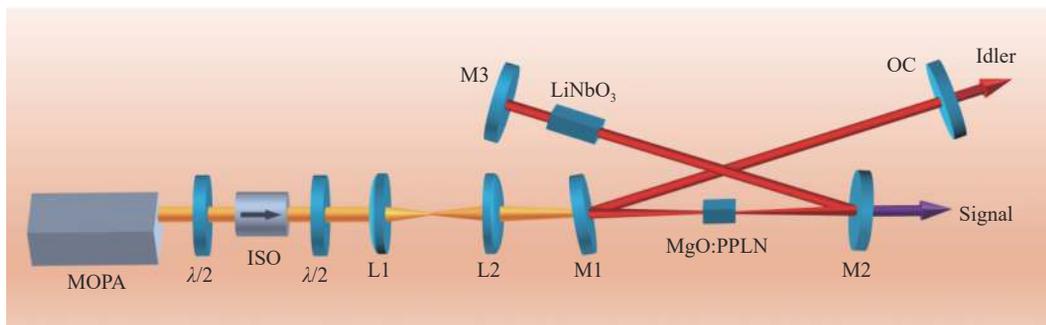


图 1 基于色散管理实现光谱净化和稳定性提升的飞秒 OPO 装置

Fig.1 The femtosecond OPO setup for spectrum cleaning and stability improvement based on dispersion management

99.5%。输出耦合镜 OC 对 2.1~2.6 μm 波长的透过率为 9%。

2 实验结果与分析

当腔内不插入 LiNbO_3 晶体时, OPO 谐振腔结构为通常使用的四镜腔结构。当泵浦光功率超过 4 W 时, 闲频光在腔内开始振荡。控制温控平台的温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, 并通过微调腔长使闲频光的输出功率取得最大值, 此时闲频光中心波长约为 2350 nm, OPO 输出功率随泵浦功率的变化如图 2(a) 所示。信号光的斜效率为 32.0%, 闲频光的斜效率为 16.8%。通过测量闲频光的输出光谱发现, 当泵浦光功率较低时, 闲频光输出一个干净平滑的窄带光谱。当泵浦光功率超过 25 W 时, 随着泵浦光功率的继续增大, 闲频光在除中心波长外的其它波长处也开始振荡, 输出光谱呈现出不规则的形状, 如图 2(b) 所示。这是由于当泵浦功率较高时, 腔内增益增大, 使得具有较小相位失配量的波长成分也能得到足够的增益从而开始振荡, 因此输出闲频光具有非常宽的光谱。

在高功率泵浦情况下输出的闲频光宽带不规则光谱是不稳定的。图 3(a) 给出了当泵浦功率为 55 W 时, 每隔 1 分钟测得的闲频光输出光谱。结果显示, 输出光谱随时间无序变化。这是由于闲频光在较宽的波长范围内振荡, 不同的波长成分同时消耗泵浦光, 相互之间产生竞争, 使得输出光谱的稳定性降低。为净化闲频光输出光谱并提升其稳定性, 将一个长度为 30 mm 的 LiNbO_3 晶体置于腔内, 用于提供额外的负色散。 LiNbO_3 晶体的群速度色散与 MgO:PPLN 晶体相同, 在 2.35 μm 波长处的群速度色散约为 $-149 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 。此时闲频光的输出光谱及其随时间的变化如图 3(b) 所示。可以看出, 当腔内插入 LiNbO_3 晶体增大负色散后, 原来不规则的宽带光谱变成了干净平滑的窄带光谱, 几乎没有其它噪声波长成分。这是由于当腔内引入较大的负色散时, 相当于对闲频光引入较大的负啁啾, 不同的波长成分在时间上得以拉伸。在同步泵浦 OPO 中, 泵浦脉冲宽度决定了时间增益窗口。此时仅有较窄的波长成分能够在时间增益窗口之内, 从而在腔内振荡。因此, 在泵浦脉冲的时间滤波作用下, 输出光谱变为窄带光谱, 而其它噪声波长得以滤除。此外, 在 60 分钟之

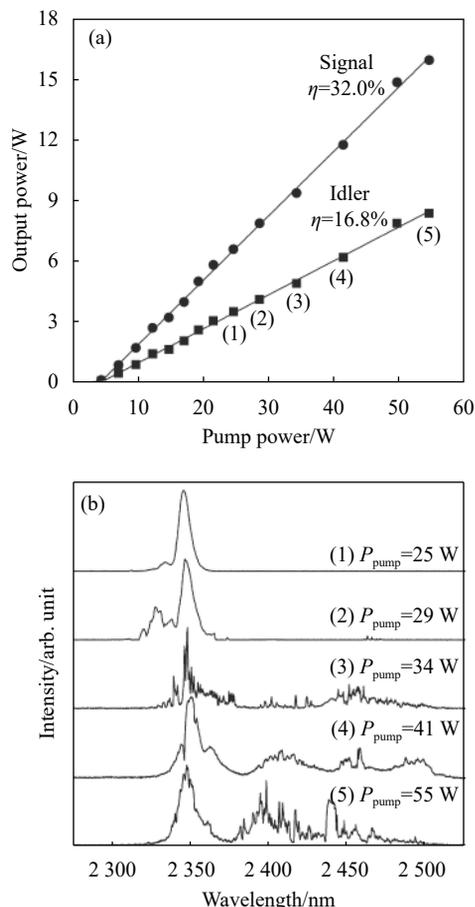


图 2 腔内无 LiNbO_3 时的 OPO 输出特性: (a) 信号光和闲频光功率随泵浦功率的变化; (b) 闲频光光谱随泵浦功率的变化

Fig.2 OPO output characteristics without LiNbO_3 in the cavity:

- (a) Variations of signal and idler power with pump power;
- (b) Variation of idler spectrum with pump power

内, 光谱形状几乎没有发生变化, 这是由于其它噪声波长被滤除, 仅有中心波长附近的波长成分能够振荡, 原来宽带光谱成分之间的竞争消失, 因此输出光谱形状是稳定的。

由于不同的波长在晶体中的群速度略有不同, 只有当振荡脉冲在腔内往返一周的时间与泵浦光的间隔周期相同的波长才能在腔内振荡, 因此通过微调腔长可以实现波长调谐^[10]。当不插入 LiNbO_3 晶体时, 由于在腔内振荡的光谱带宽较宽且光谱形状随机变化, 因此腔长调谐现象并不明显。而当腔内插入 LiNbO_3 晶体后, 由于时间滤波效应, 光谱带宽变窄, 因此通过改变腔长可以十分明显地看到闲频光在 2.1~2.5 μm 波长范围内连续调谐, 且始终为干净的窄带光谱, 如图 4 所示。在调谐范围内, 闲频光光谱带

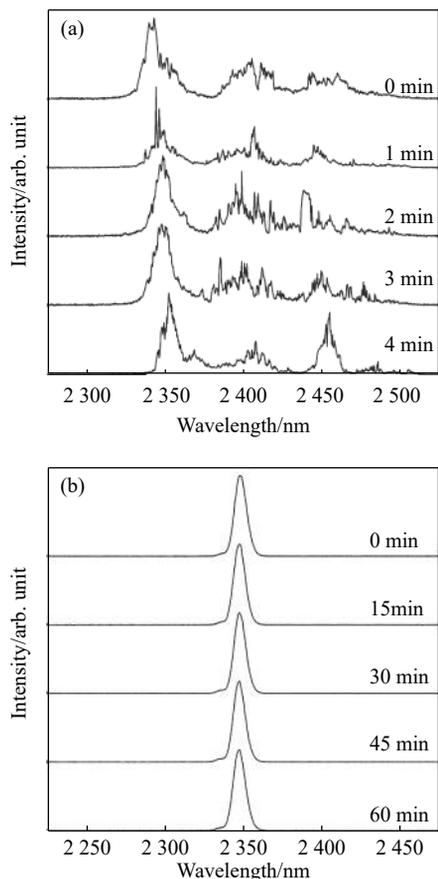


图 3 腔内不插入 (a) 和插入 (b) LiNbO₃ 晶体时闲频光光谱随时间的变化

Fig.3 Variation of idler spectrum with time while not inserting (a) and inserting (b) LiNbO₃ crystal in the cavity

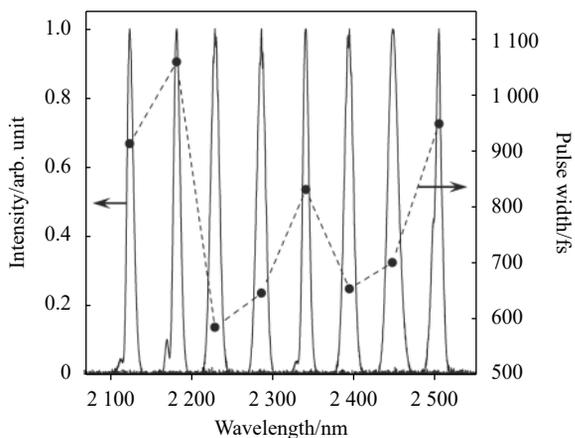


图 4 腔内插入 LiNbO₃ 晶体后微调腔长时闲频光光谱和相应脉宽的变化

Fig.4 Spectrum and the corresponding pulse width variations when the cavity length is tuned with LiNbO₃ crystal in the cavity

宽为 8~15 nm, 脉冲宽度为 600 fs~1.1 ps, 接近傅立叶变换极限。

值得注意的是, 当腔内引入额外的负色散后, 在光谱稳定性提升的同时, 功率稳定性也得到了提升。在腔内补偿色散前后, 分别对闲频光的输出功率连续监测 1 小时, 得到闲频光的输出功率随时间的变化如图 5 所示。可以看出, 闲频光输出功率的波动峰谷 (PV) 值由引入色散前的 34.3% 下降到引入色散后的 5.6%, 功率波动下降为原来的 1/6, 功率稳定性得到了极大的提升。这是由于输出功率与光谱是相关的。一方面, 当腔内色散量较小时, 闲频光在较宽的波长范围内振荡, 不同波长成分之间相互竞争, 使输出光谱随时间无序变化, 进而导致输出功率随光谱变化而发生较大波动。而当腔内色散量增大时, 输出光谱变稳定, 原来输出功率发生较大波动的原因不复存在, 因而输出功率的稳定性得到了改善。另一方面, 当腔内负色散量增大后, 由于群速度的影响导致单位波长间隔的腔渡越时间差增大, 因而腔长抖动导致的波长漂移减弱, OPO 对环境微扰更不敏感, 也使得输出功率的稳定性得到了提升。

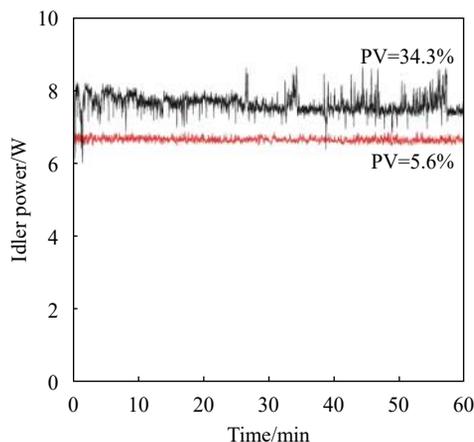


图 5 腔内不插入 (黑线) 和插入 (红线) LiNbO₃ 晶体时闲频光功率随时间的变化

Fig.5 Variation of idler power with time while not inserting (black) and inserting (red) LiNbO₃ crystal in the cavity

以上基于色散管理实现飞秒 OPO 光谱净化和稳定性提升的主要思想是通过增大腔内色散量使得泵浦脉冲的增益时间窗口之内只含有较窄的光谱成分, 从而起到时间滤波的作用。从原理上讲, 在腔内引入大的正色散, 也可以起到时间滤波的效果。腔内净色散量越大, 时间滤波的效果越明显, 输出光谱带宽越窄, OPO 稳定性越高。对于色散管理的飞秒 OPO, 选

择的色散补偿晶体需要对振荡脉冲具有较高的透过率且无双光子吸收效应。

3 结 论

文中首次提出并验证了基于腔内色散管理实现飞秒 OPO 光谱净化和稳定性提升的方法。对于高功率的飞秒 OPO, 当泵浦功率超过一定值时, 输出光谱变为宽带的非规则光谱, 且随时间无序变化。在腔内插入 30 mm 长的 LiNbO₃ 晶体引入额外的负色散, 利用泵浦光的时间滤波效应实现了干净平滑的窄光谱近转换极限飞秒脉冲输出, 波长调谐范围为 2.1~2.5 μm。在 60 分钟之内, 光谱形状保持稳定, 功率波动 PV 值从色散管理前的 34.3% 下降到色散管理后的 5.6%。该方法克服了高功率飞秒 OPO 输出光谱带宽大且无规则变化以及输出功率不稳定的问题, 为飞秒 OPO 的光谱净化和稳定性提升提供了一种通用的方法, 对于发展高功率超快 OPO 光源具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] M Ghotbi, A Esteban-Martin, M Ebrahim-Zadeh. Tunable high-repetition-rate femtosecond pulse generation in the ultraviolet [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 345-347.
- [2] Tong Hui, Xie Guoqiang, Qiao Zhen, et al. Generation of a mid-infrared femtosecond vortex beam from an optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 989-992.
- [3] Maidment L, Schunemann P G, Reid D T. Molecular fingerprint-region spectroscopy from 5 to 12 μm using an orientation-patterned gallium phosphide optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4261-4264.
- [4] Popien S, Beutler M, Rimke I, et al. Femtosecond Yb-fiber laser synchronously pumped HgGa₂S₄ optical parametric oscillator tunable in the 4.4- to 12-μm range [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(11): 111802.
- [5] Qin Zhipeng, Xie Guoqiang, Ge Weiyang, et al. Over 20-W mid-infrared picosecond optical parametric oscillator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 140056.
- [6] Peng Y F, Wei X B, Xie G, et al. A high-power narrow-linewidth optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(5): 055405.
- [7] Descloux D, Walter G, Cadiou E, et al. Wide and fast dispersion tuning of a picosecond OPO based on aperiodic quasi-phase matching using an axially chirped volume Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4060-4063.
- [8] Laporte C, Dherbecourt J-B, Melkonian J-M, et al. Analysis of cavity-length detuning in diffraction-grating narrowed picosecond optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(5): 1026-1034.
- [9] Bhupathiraju K V, Rowley J D, Ganikhanova F. Efficient picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium tantalate [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(8): 081111.
- [10] Zhu Jiangfeng, Zhong Xin, Teng Hao, et al. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled LiNbO₃ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(9): 2603-2605.