

# 高功率, 红光至中红外可调谐腔内和频 光学参量振荡器\*

张丽梦 胡明列<sup>†</sup> 顾澄琳 范锦涛 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2013年10月11日收到; 2013年10月28日收到修改稿)

本文利用高重复频率, 高平均功率大模场面积飞秒光纤激光器作为同步抽运源, 抽运以多周期极化掺氧化镁铌酸锂为非线性晶体的单共振光学参量振荡器, 获得了高功率可调谐红光至中红外光, 信号光调谐范围为1450—2200 nm, 闲频光调谐范围为2250—4000 nm, 在2 W的抽运功率下, 信号光输出波长为1502 nm时获得最大输出功率374 mW, 转换效率为18.7%, 脉冲宽度为144 fs, 此时中红外输出中心波长为3.4  $\mu\text{m}$ , 平均功率为166 mW. 再利用BBO晶体对信号光进行腔内和频, 获得和频光输出波长调谐范围为610—668 nm, 在4.1 W抽运的情况下, 最高平均功率为615 nm处的694 mW, 转换效率达16.9%.

**关键词:** 光学参量振荡器, 光纤激光器, 中红外, 腔内和频

**PACS:** 42.65.Yj, 42.55.Wd, 42.65.Ky

**DOI:** 10.7498/aps.63.054205

## 1 引言

高重复频率的超短脉冲源在通信、非线性光谱学和显微等领域具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>, 不同波段的飞秒脉冲在量子光学、激光显示、水下和空间通讯、高密度存储、医学及生物分析、光谱分析、材料处理和分析以及半导体制作工艺等方面有着重要的应用<sup>[2]</sup>. 光学参量振荡器(OPO)是目前实现可调谐激光输出的最主要手段. 基于准相位匹配技术的周期性极化掺氧化镁铌酸锂(MgO:PPLN)晶体不仅具有高的非线性系数和高的光折变损伤阈值<sup>[3]</sup>, 而且可实现温度调谐的准相位匹配<sup>[4]</sup>, 是优良的非线性晶体<sup>[5-7]</sup>. 而大模场面积掺镱光子晶体光纤激光器与常规的固体激光器相比, 具有平均功率高、转换效率高、结构紧凑和可靠性高等一系列优点<sup>[8-10]</sup>, 因此使用大模场面积飞秒光纤激光器抽运的光学参量振荡器结合腔内混频是实

现高平均功率可调谐光源的一个重要技术途径. 2010年, Lin等<sup>[11]</sup>使用25 W光纤激光器抽运以P-PLN为非线性晶体的光学参量振荡器, 进一步利用PPLN晶体对OPO的抽运光和信号光进行腔内混频, 得到了高平均功率的红绿蓝光源. 2012年, Chaitanya等<sup>[12]</sup>使用皮秒光纤激光器作为抽运源, 利用BBO晶体对OPO的信号光进行腔内倍频, 获得了752—860 nm的连续光输出, 在778 nm处获得3.5 W的最大输出功率.

本文利用大模场面积飞秒光纤激光器抽运周期极化晶体MgO:PPLN实现光学参量振荡器, 进一步利用BBO晶体实现腔内和频(SFG), 通过调整相关参量, 获得了可调谐红光到中红外光的高平均功率的飞秒脉冲输出. 信号光调谐范围为1450—2200 nm, 闲频光调谐范围为2250—4000 nm, 和频光调谐范围为610—668 nm, 在抽运光平均功率为4.1 W时, 最高平均功率为694 mW, 转换效率达16.9%.

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)和国家自然科学基金(批准号: 61322502, 61205131, 11274239)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

## 2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示, OPO 的抽运源为大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器, 输出激光中心波长为 1040 nm, 重复频率为 51 MHz, 脉冲宽度为 70 fs, 光谱半高全宽为 40 nm. OPO 的非线性晶体为

掺 5% MgO 的 PPLN, 尺寸为 1 mm × 8.5 mm × 1 mm, 包括 28.5 μm 至 31.5 μm 七个极化周期. 晶体两端面镀有对 1040 nm ( $R < 1\%$ ) 和 1420—2000 nm ( $R < 1.5\%$ ) 的高透膜. 实验中, PPLN 晶体放置在特制的温控炉中进行温度控制, 其温控调谐范围为室温到 200 °C, 温控精度为 0.1 °C, 并将温度控制在 80 °C 以避免非线性晶体的光折变效应.

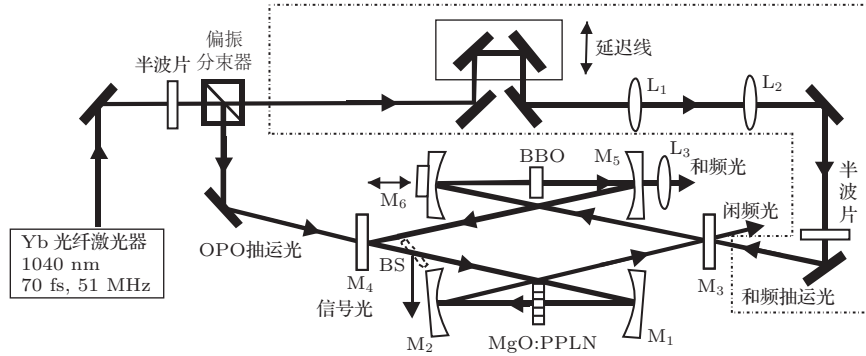


图 1 内腔倍频及和频光学参量振荡器装置

OPO 谐振腔为双焦环形腔结构, 由两组凹面镜 ( $M_1$  和  $M_2$ ,  $M_5$  和  $M_6$ ) 和两个平面镜 ( $M_3$  和  $M_4$ ) 组成. 凹面镜  $M_1$  和  $M_2$  曲率半径  $r = 15$  cm, 凹面镜  $M_5$  和  $M_6$  曲率半径  $r = 10$  cm. 其中  $M_5$  为和频及倍频的输出耦合镜, 对 1400—2100 nm 高反, 对 600—1000 nm 透过率为 95%. 腔镜  $M_3$ ,  $M_4$  对 1040 nm 高透 ( $T > 95\%$ ), 1400—2100 nm 高反 ( $R > 99.8\%$ ). 端镜  $M_6$  放置在平平台上, 以便调整 OPO 腔长使其与激光器腔长一致而谐振.

实验中选用 BBO 作为腔内的和频晶体, BBO 晶体透光范围能覆盖紫外到中红外波段, 在近红外波段的群速度色散小, 抗损伤阈值高, 晶体的非线性系数在近红外区域也较高<sup>[13]</sup>, 适合作为和频的晶体. BBO 置于  $M_5$  和  $M_6$  镜子之间的焦点处.

首先, 我们模拟了腔内和频的动力学过程, 抽运光波长为 1.04 μm, 脉冲宽度为 70 fs, 和实验相一致, OPO 抽运光和和频光抽运功率均为 1 W, 信号光波长为 1.5 μm, 相应的闲频光波长为 3.4 μm, 信号光和抽运光的和频波长为 614 nm. 参量过程和和频过程均采用三波耦合波方程进行理论分析, 如图所示, 在 PPLN 晶体中, 抽运光的功率向信号光和闲频光转换, 从 PPLN 晶体中出射后, 信号光继续在腔内传输, 而闲频光和参与抽运光经过输出镜输出, 此时输入新的和频抽运光与腔内信号光在 BBO 晶体产生和频作用, 经过 BBO 晶体后, 和频光和残余和频抽运光输出, 而信号光在腔内开始下一个循环. 当信号光输出耦合率为 80% 时, 模拟得到信号光输出功率为 273 mW, 脉冲宽度为 106 fs, 闲频光输出功率为 152 mW, 脉冲宽度为 128 fs, 和频光功率为 402 mW, 脉冲宽度为 221 fs.

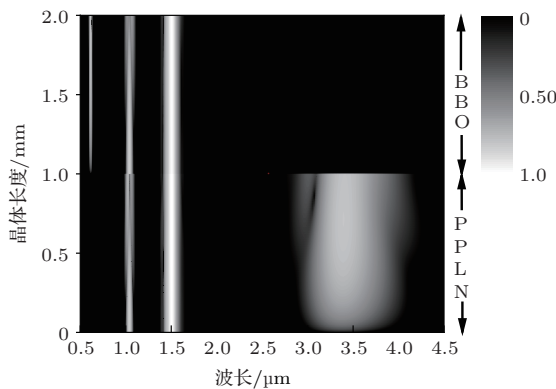


图 2 腔内和频动力学过程数值模拟图

实验中, 在 OPO 腔内插入一块分光平片作为信号光的耦合输出以便测量信号光调谐特性. 在  $M_3$  后测量闲频光的功率和光谱. 信号光和闲频光光谱的调谐是通过改变 MgO:PPLN 晶体的周期和调谐 OPO 的腔长来实现的. 在 2 W 的抽运功率下, 信号光输出波长为 1502 nm 时获得最大输出功率 374 mW, 转换效率为 18.7%, 脉冲宽度为 144 fs, 其傅里叶变化极限脉宽为 90 fs.

信号光和闲频光调谐光谱如图 3(a), (b) 所示.

图3(a)为理论计算得到的信号光和闲频光光谱随着铌酸锂周期变化的曲线,图3(b)为实验中得到的在不同周期最佳输出功率情况下的信号光和闲频光光谱调谐曲线. 实验中得到的信号光脉冲宽度是抽运光脉冲宽度的两倍,主要是由于抽运光和信号光在PPLN中的群速度失配导致.

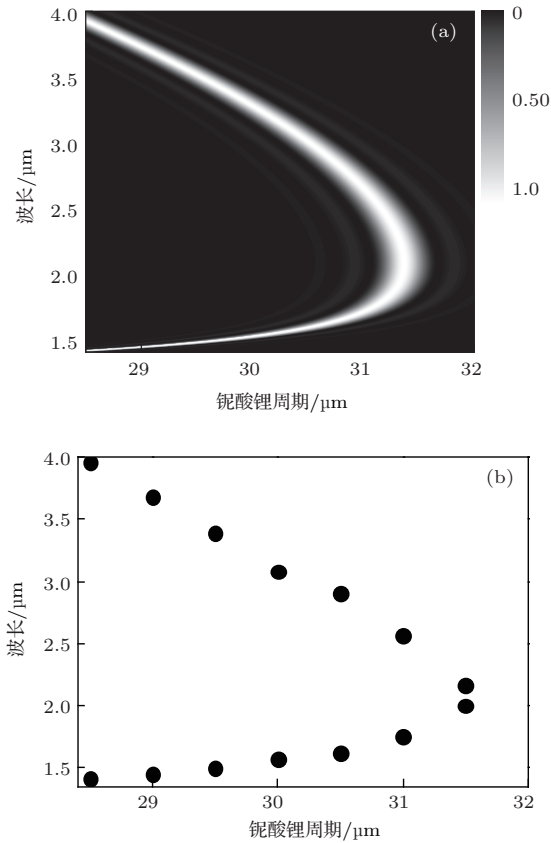


图3 (a) 理论计算得到的信号光和闲频光光谱随着铌酸锂周期变化的曲线; (b) 实验得到的信号光和闲频光光谱随着铌酸锂周期变化的曲线

对于腔内和频, 信号光耦合输出平片被移除以增强腔内信号光功率, 在OPO稳定运转的情况下, 插入BBO晶体作为内腔和频晶体, BBO晶体长度为2 mm, 晶体表面镀1060 nm高透膜, 切割角为 $\theta = 23.2^\circ$ , 采用I类相位匹配( $d_{\text{eff}} = 2 \text{ pm/V}$ ), 重新调整腔长即可获得OPO的重新振荡.

在腔内信号光和抽运光的和频实验过程中, 我们增加了另一路抽运光, 由 $M_3$ 进入OPO, 与腔内的信号光进行和频(图1中虚线框中所示), 这和以往一般利用OPO残余的抽运光进行和频不同<sup>[14]</sup>. 使用半波片和偏振分束片来优化分配OPO和SFG的抽运光功率, 可以获得最大效率的和频光功率输出. 使用偏振分束片后的半波片控制SFG抽运光的偏振态, 以实现在BBO中的I类相位匹配. SFG

抽运光经焦距为200 mm的透镜 $L_1$ 和焦距为100 mm的透镜 $L_2$ 缩束, 从而与腔内信号光的模场匹配, 调节扫描延迟线使得SFG抽运光与信号光在BBO晶体中时间上重合便可得到SFG的输出.

微微调节BBO的相位匹配角便可得到晶体的最佳和频相位匹配条件, 得到高功率和频光的输出. 在最佳SFG功率输出的情况下, 仍然有微弱的非相位匹配倍频光输出(约几毫瓦). 在之前的报道中, OPO剩余的抽运光被用来与腔内的信号光进行和频, 抽运光同时被参量过程和SFG过程消耗, 而两者之间的相对比例决定着OPO和SFG的输出特性, 因此OPO的输出特性比较复杂. 增加另一路SFG抽运光使得OPO和SFG的输出相对简单, 也更加的稳定, 而OPO抽运光和SFG抽运光的比例是得到高功率SFG的关键参数. 如果OPO的抽运光功率太小, 腔内信号光太弱甚至达不到振荡阈值. 如果SFG的抽运功率太小, 那么SFG抽运光和信号光的非线性效率也会很低. 所以, 在总抽运功率一定的条件下, SFG的最大输出需要优化OPO抽运功率与SFG抽运功率的比值. 在OPO单独运转的时候, 腔内的信号光功率 $P_{\text{si}}$ 可以表示为

$$P_{\text{si}} = \eta (P_{\text{p}}^{\text{OPO}} - P_{\text{t}}), \quad (1)$$

其中 $\eta$ 为腔内功率增加的斜效率系数,  $P_{\text{p}}^{\text{OPO}}$ 为OPO的抽运功率,  $P_{\text{t}}$ 为其阈值. 总抽运功率为 $P_{\text{p}}$ , 则和频抽运光功率 $P_{\text{p}}^{\text{sum}}$ 为

$$P_{\text{p}}^{\text{sum}} = P_{\text{p}} - P_{\text{p}}^{\text{OPO}}, \quad (2)$$

和频效率正比于腔内信号光和和频抽运光的乘积, 结合(1)和(2)式可得

$$P_{\text{sum}} \propto \eta (P_{\text{p}}^{\text{OPO}} - P_{\text{t}}) (P_{\text{p}} - P_{\text{p}}^{\text{OPO}}). \quad (3)$$

因此和频的输出功率随着OPO的抽运功率成开口向下的抛物线趋势, 当OPO抽运功率

$$P_{\text{opt}}^{\text{OPO}} = (P_{\text{t}} + P_{\text{p}})/2 \quad (4)$$

时, 获得最佳和频效率.

如图4(a)中的实线所示, SFG波长可以从610 nm到668 nm连续调谐输出. 在不同PPLN周期下调谐腔长实现信号光的调谐, 微微调谐BBO的相位匹配角, 相位匹配角调谐的范围为 $20^\circ$ — $21^\circ$ , 调谐角度同时优化腔镜即可得到最优化的输出. 图4(a)中的点虚线表示在OPO抽运功率为2 W, 和频光抽运功率为1 W时, 和频输出功率

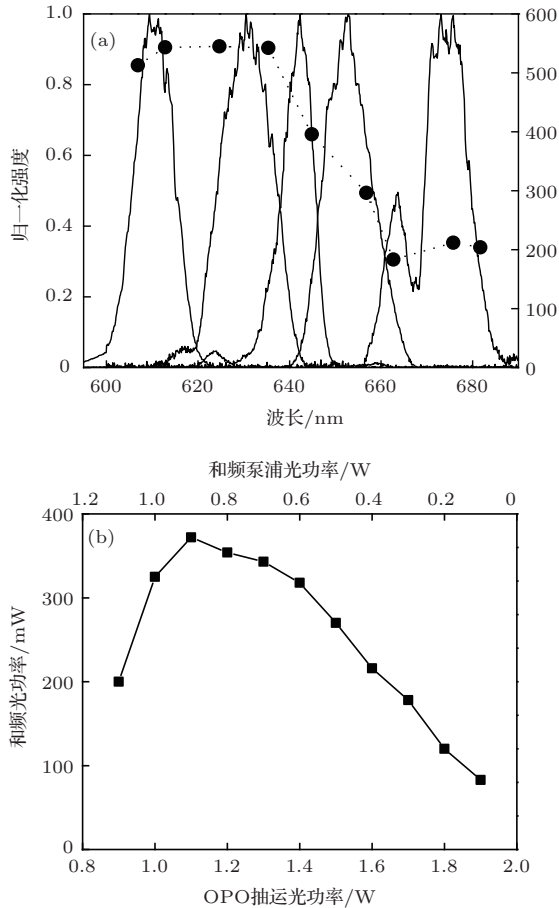


图4 (a) SFG 光谱调谐范围从 610 到 668 nm(实线), OPO 抽运功率 2 W, SFG 抽运功率 1 W 时, SFG 输出波长和功率变化情况(点虚线); (b) 总抽运功率 2 W 时, SFG(615 nm 处)的输出功率随 OPO 抽运功率变化的特性曲线

随波长的变化情况, 其中最大输出功率为波长 615 nm 处的 545 mW, 转换效率为 18.1%. 在 640 nm 处功率突然下降一半, 这是由于随着信号光波长的增加, 抽运光与信号光群速度失配增加, 从而使得信号光脉宽展宽, 同时腔内功率降低, 和频效率也相应的降低. 当和频光波长为 615 nm 时, 信号光与和频光在 2 mm BBO 中的走离时间大约是 230 fs, 抽运光与信号光的走离时间约为 30 fs, 因此和频光的脉冲宽度大约为 300 fs. 图 4(b) 所示为 SFG 与 OPO 的抽运光功率总和为 2 W 时, SFG 的输出功率与抽运分配功率的关系. 此时 OPO 的振荡阈值功率为 868 mW, 高于无腔内和频时的 287 mW 的振荡阈值, 主要是因为和频过程造成信号光的非线性损耗. 从图中可以看出, 从阈值开始随着 OPO 抽运功率的升高, SFG 输出功率逐渐增加, 且在 OPO 抽运功率为 1.1 W 时, SFG 的输出功率最高达到 372 mW, 相应的转换效率为 18.6%, 由 (4) 式理论

计算得到的最佳 OPO 抽运功率为  $P_{\text{opt}}^{\text{OPO}} = 1.14$  W, 与实验一致. 继续增加 OPO 的抽运光功率, SFG 输出功率开始下降. 和频光波长的调谐是通过调节腔长和 PPLN 周期调谐信号光得到的. 当固定 OPO 抽运功率为 2 W, SFG 抽运功率为 2.1 W 时, 在 615 nm 处可以得到最大为 694 mW, 转换效率为 16.9% 的和频光输出.

### 3 结 论

本文设计了基于光子晶体光纤飞秒激光器 MgO:PPLN 晶体和 BBO 晶体的腔内和频光学参量振荡器, 获得了 610—668 nm 连续可调谐的腔内 SFG 的输出. 当抽运光功率为 4.1 W 时, 最高输出平均功率为 694 mW, 转换效率达 16.9%. 并且获得了 1450—2200 nm 的信号光及 2250—4000 nm 的闲频光连续可调谐输出. 接下来, 将提高光纤激光器的输出功率来抽运 OPO, 以获得更高平均功率的可调谐飞秒脉冲. 并且将利用这种双抽运腔内和频结构的 OPO 获得可调谐高功率的紫外激光的输出. 该实验实现了高功率, 宽调谐的飞秒激光源, 为更多的研究和实验提供了有力的工具.

### 参考文献

- [1] Zumbusch A, Holtom G R, Xie X S 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4142
- [2] Ruebel F, Haag P, Lhuillier J A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 011122
- [3] Lin X C, Zhang Y, Kong Y P, Zhang J, Yao A Y, Hou W, Cui D F, Li R N, Xu Z Y, Li J 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 98
- [4] Zhang B G, Yao J Q, Zhang H, Zang G Y, Xu D G, Wang T, Li X J, Wang P 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1077
- [5] Pavel N, Shoji I, Taira T, Mizuuchi K, Morikawa A, Sugita T, Yamamoto K 2004 *Opt. Lett.* **29** 830
- [6] Kontur F J, Dajani I, Lu Y, Knize R J 2007 *Opt. Express* **15** 12882
- [7] Yin M, Zhou S H, F G Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234206 (in Chinese)[阴明, 周寿桓, 冯国英 2012 物理学报 **61** 234206]
- [8] Liu H K, He B, Zhou J, Dong J J, Wei Y R, Lou Q H 2012 *Opt. Lett.* **37** 388
- [9] Wu B, Cai S S, Shen J W, Shen Y H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2684 (in Chinese)[吴波, 蔡双双, 沈剑威 2007 物理学报 **56** 2684]
- [10] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese)[刘博文, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6921]



- [11] Lin S T, Lin Y Y, Tu R Y, Wang T D, Huang Y C 2010 *Opt. Express* **18** 2361  
 [12] Chaitanya K S, Kimmelma O, Ebrahim Z M 2012 *Opt. Lett.* **37** 1577  
 [13] Ellingson R J, Tang C L 1993 *Opt. Lett.* **18** 438  
 [14] Shirakawa A, Mao H W, Kobayashi T 1996 *Opt. Commun.* **123** 121

# High power red to mid-infrared laser source from intracavity sum frequency optical parametric oscillator pumped by femtosecond fiber laser\*

Zhang Li-Meng   Hu Ming-Lie<sup>†</sup>   Gu Cheng-Lin   Fan Jin-Tao   Wang Qing-Yue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 11 October 2013; revised manuscript received 28 October 2013 )

## Abstract

A femtosecond laser source tuned from red to mid-infrared is demonstrated. It is based on intracavity sum frequency generation of a MgO-doped periodically poled LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator synchronously pumped by mode-locked Yb large-mode-area photonic crystal fiber, which has high average power and high repetition rate. The optical parametric oscillator has a wide spectral tuning range from 1450—2200 nm (for the signal) and 2250—4000 nm (for the idler) while the wavelength of the pump is 1040 nm. In the experiment, the output power of 374 mW at 1502 nm is achieved when the pump power is 2 W and the slope efficiency is 18.7%. In addition, 166 mW idler at 3.4 μm are achieved. By using a β-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> for intracavity sum frequency generation, the femtosecond pulse over 610—668 nm is obtained. A 694 mW average output power of sum frequency generation is achieved for 4.1 W pump, representing 16.9% conversion efficiency at 615 nm.

**Keywords:** optical parametric oscillator, fiber laser, mid-infrared, intracavity sum frequency generation

**PACS:** 42.65.Yj, 42.55.Wd, 42.65.Ky

**DOI:** 10.7498/aps.63.054205

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101, 2010CB327604), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61322502, 61205131, and 11274239).

† Corresponding author. E-mail: [huminglie@tju.edu.cn](mailto:huminglie@tju.edu.cn)