

## 基于内腔的调 Q 锁模光参量振荡器的研究

王 静<sup>1</sup>, 梁 健<sup>2</sup>, 宋 朋<sup>1</sup>, 张海鹏<sup>1</sup>, 周 城<sup>1</sup>

(1. 济南大学 物理科学与技术学院, 山东 济南 250022;  
2. 山东大学(威海) 网络与信息管理中心, 山东 威海 264209)

**摘 要:** 为了实现内腔型光参量振荡器(OPO)的调 Q 锁模脉冲输出, 通过设计并匹配 OPO 谐振腔和基频激光腔的腔长, 满足了同步泵浦条件, 最终在实验上得到了信号光的调 Q 锁模输出; 在实验中, 采用氩灯泵浦 Nd:YAG 作为基频激光, 以 KTP 晶体为非线性转换介质, 采用电光开关作为调 Q 手段, 测量了 OPO 的近红外信号光的输出波形、输出能量、光谱构成等输出特性。在泵浦能量 12.8 J、调制频率 20 kHz 时, 得到了锁模深度为 100% 的信号光输出, 并发现信号光锁模脉冲重复率依赖于基频激光; 得到了调 Q 锁模信号光输出能量随泵浦能量、电光调制频率的变化关系。

**关键词:** 调 Q 锁模; 内腔光参量振荡; 同步泵浦

中图分类号: TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1105008

## Q-switched mode-locking optical parametric oscillator with intra-cavity

Wang Jing<sup>1</sup>, Liang Jian<sup>2</sup>, Song Peng<sup>1</sup>, Zhang Haikun<sup>1</sup>, Zhou Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Technology, Jinan University, Jinan 250022, China;  
2. Network and Information Management Center, Shandong University, Weihai 264209, China)

**Abstract:** By matching the length of the OPO cavity and the fundamental laser cavity, the Q-switched mode-locking intra-cavity Optical Parametric Oscillator (OPO) was realized. The design of fundamental laser and OPO cavity proved synchronously pumping and the Q-switched mode-locking signal pulse was experimentally obtained. The signal profile, output energy and spectroscopy were also measured in experiment. It is concluded that the repetition of signal mode-locking pulse depends on the fundamental and the depth of mode lock can reach 100% with 12.8 J pump energy and 20 kHz electro-optical (EO) repetition. The output energy of signal light depends on the pump energy and EO repetition.

**Key words:** Q-switched mode-locking; intra-cavity optical parametric oscillator; synchronously pumping

收稿日期: 2016-03-12; 修订日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61308057); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012DX003);  
济南大学科研基金(XKY1225)

作者简介: 王静(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光锁模技术及非线性转换技术方面的研究。Email: ss\_wangj@ujn.edu.cn

## 0 引言

1.57  $\mu\text{m}$  激光因处于大气窗口且属于人眼安全激光,因而在通讯、测距等领域有较广泛的用途。光学参量振荡器(Optical Parameter Oscillator, OPO),由于能够在较宽频谱范围内实现连续可调谐波长的输出<sup>[1-2]</sup>,成为实现人眼安全激光脉冲输出的重要手段<sup>[3-4]</sup>。近几年来,锁模泵浦 OPO 成为光参量振荡技术发展的重要分支<sup>[5]</sup>。

腔型设计一直是各种 OPO 研究工作的重点,同步泵浦是锁模泵浦 OPO 腔型设计时必须考虑的问题。现有的锁模 OPO 的腔型大多为外腔<sup>[6]</sup>,即 OPO 腔在基频激光腔的外部,外腔调节简单,易实现同步泵浦,被广泛地应用在超短脉冲 OPO 实验上。外腔又分为环形腔和线型腔,环形腔的光路单向通过非线性晶体,避免了非线性逆转换,更适用于双谐振(DRO)OPO,但其振荡阈值大,并增加了调节难度。对单谐振 OPO 来说,人们更倾向于简便的线型腔。内腔 OPO 将非线性谐振腔置于基频激光腔内部,充分利用基频激光腔内的高密度光子数,能大大提高转换效率,因此,复合内腔被广泛地用在连续和纳秒 OPO 上<sup>[7]</sup>,但超短脉冲泵浦的内腔 OPO 少见报道。另外,共享腔型也能满足同步泵浦的要求,且在实验中观测到了锁模深度小于 10% 的波形,由于腔长和稳定性等原因,锁模深度和重复率都不高<sup>[8]</sup>。

调 Q 锁模激光是介于调 Q 激光和连续锁模激光之间的动力学过程,调 Q 包络类同于调 Q,调 Q 包络内的锁模脉冲串类同连续波锁模激光。与调 Q 激光和连续波锁模激光相比,调 Q 锁模激光具有更高的峰值功率<sup>[9]</sup>。因此,调 Q 锁模激光泵浦的 OPO 有望获得更高的转换效率和更高的峰值功率。OPO 调 Q 锁模输出国际上少见报道,仅有的报道是关于外腔调 Q 锁模<sup>[10]</sup>。

论文拟利用电光 (EO) 调 Q 锁模激光作基频激光光源,常规的 KTP 作为非线性晶体,设计 OPO 腔长与基频激光谐振腔长以满足同步泵浦条件,实现调节简单的、折叠腔 OPO 的 1.57  $\mu\text{m}$  信号光锁模输出。测量调 Q 锁模 OPO 的输出能量、波形图、光谱图等输出特性,并揭示同步泵浦下内腔 OPO 的运转机制。

## 1 实验设置

实验中所采用的调 Q 锁模泵浦内腔 OPO 装置图如图 1 所示。泵浦光源采用氙灯泵浦源,激光增益介质是 20 cm 长的 Nd<sup>3+</sup>:YAG,基频光波长为 1064 nm 而信号光是 1573 nm;非线性晶体是 20 cm 长的 KTP 晶体,按照 II 型非临界相位匹配进行切割,切割角为沿 x 轴方向( $\theta=90^\circ$ 和 $\varphi=0^\circ$ ),以保证非线性晶体的最大非线性系数和沿光轴无走离效应,非线性晶体用锡箔包紧置于铜块中,通过水循环和温控半导体制冷片制冷,温度控制在 22  $^\circ\text{C}$ 。电光调制器采用退压式的双 RTP 晶体(尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 5.3 mm)结构,两块 RTP 晶体以 z 轴(光轴方向)为中心旋转到通光方向互相垂直的位置,电极放置在 x-y 平面上(垂直光轴方向),这种双晶体结构的设计可以抵消因温度的变化引起的晶体的双折射效应,电光开关时间约为 8 ns。在实验中,当调制频率在 10 kHz 以下时,参量转换过程不明显,因此,主要采用的电光调制频率  $f_p=15\text{ kHz}$ 、20 kHz。

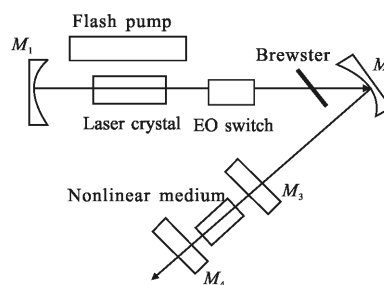


图 1 调 Q 锁模泵浦内腔 OPO 实验装置图

Fig.1 Experimental setup of Q-switched mode-locking intra-cavity OPO

腔型采用图 1 所示的折叠线型腔,输入镜  $M_1$  镀有 1  $\mu\text{m}$  的高反膜和 808 nm 高透膜,曲率半径为 50 cm;  $M_2$  镀 1  $\mu\text{m}$  高反膜,曲率半径为 100 cm;OPO 端镜  $M_3$  镀有 1  $\mu\text{m}$  增透、1.3~1.5  $\mu\text{m}$  高反膜,输出镜  $M_4$  镀有 1  $\mu\text{m}$  高反膜、1.3~1.5  $\mu\text{m}$  部分反射膜( $R_s=85\%$ )和 3.3~4.8  $\mu\text{m}$  的增透膜, $M_3$  和  $M_4$  均为平镜; $M_1M_2$  间距为 30 cm, $M_2M_4$  为 21 cm,其中  $M_1$  和  $M_4$  之间形成基频激光腔, $M_3M_4$  之间成 OPO 振荡腔。

为了实现同步泵浦,并使信号光调 Q 包络下的重复频率依赖于基频光,必须要满足基频激光腔  $L_{34}$  与 OPO 腔光学长度  $L_{34}$  一致或成倍数关系,即:

$$L_{14} = n \times L_{34} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

实验中所采用基频激光腔长为 51 cm, OPO 腔长为 3 cm。

测量仪器采用 MAX 500AD 激光功率计 (COHERENT Inc., USA) 测量输出信号光的平均输出功率, 用 TED620B 存储示波器 (TeKtronix Inc. U. S. A) 测量输出信号光波形及重复率等, 用硅、锗探测器分别探测基频光和信号光波形, 并用型号为 SP300I (Acton Research Corporation, 美国) 的光谱仪测量输出光谱图。

## 2 实验结果分析

图 2 给出了氙灯泵浦能量 12.8 J、EO 调制频率 20 kHz 时的信号光调 Q 锁模输出波形及脉冲序列图。从图 2(a) 可以看出: 调 Q 包络脉冲宽度为 54 ns, 锁模深度达到 100%; 从图 2(b) 的脉冲序列图可以看出: 信号光锁模脉冲时间间隔大概为 3.4 ns, 满足基频激光锁模脉冲时间间隔的公式。表达式为:

$$\Delta\tau = \frac{2L_f}{c} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\tau$  为锁模脉冲重复率;  $L_f$  为基频激光的单程光程;  $c$  为光速。说明信号光的锁模脉冲重复率依赖于基频激光。

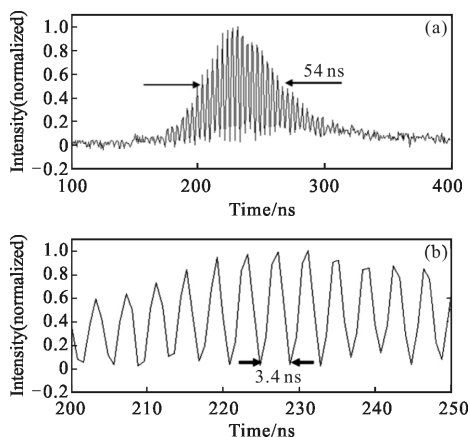


图 2 信号光的调 Q 锁模和脉冲序列图

Fig.2 Profile of Q-switched mode-locking signal light

图 3 是实验测得在两个电光调制频率输出信号光的调 Q 包络单脉冲能量, 图 4 是平均输出功率随时间的变化关系图。可以看出, 在同一个输出镜透过率和泵浦能量下, 随着调制频率的减少, 输出单脉冲能量增加, 泵浦阈值随着调制频率的减少而增加; 当

调制频率为 15 kHz 时, 阈值为 10.3 J, 当调制频率为 20 kHz 时, 阈值为 11.1 J; 调制频率在 10 kHz 以下时, 参量输出光能量较低, 锁模效果不明显, 可能是因为基频光峰值功率低影响非线性转换效率和锁模深度。由于激光介质中的热效应和基频光本身的饱和效应, 在泵浦能量大于 23 J 时, 输出信号光的调 Q 包络单脉冲能量趋于饱和。

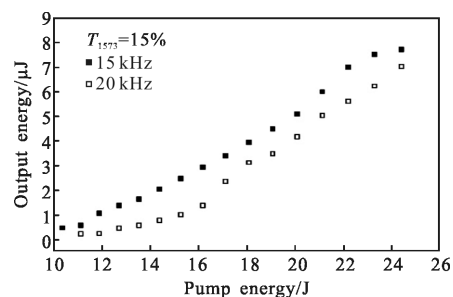


图 3 信号光调 Q 包络单脉冲能量

Fig.3 Signal Q-switched pulse energy

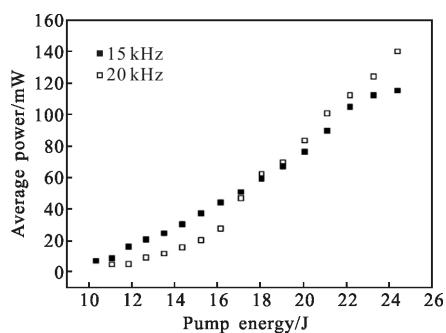


图 4 平均输出功率

Fig.4 Signal output average power

图 5 是调制包络脉冲宽度随着输入能量的变化, 可以看到调制脉冲宽度随着输出能量的增大而减小, 其中在泵浦能量为 24 J、调制频率为 15 kHz 时, 得到最低的脉冲宽度为 30.2 ns。

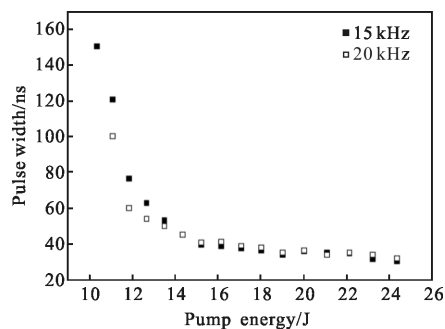


图 5 调 Q 包络脉冲宽度

Fig.5 Q-switched pulse width

图 6 是在氙灯泵浦能量 12.8 J、EO 调制频率 20 kHz 时所测得的光谱图, 可以得到此时信号光中心波长约为 1 573.157 nm。

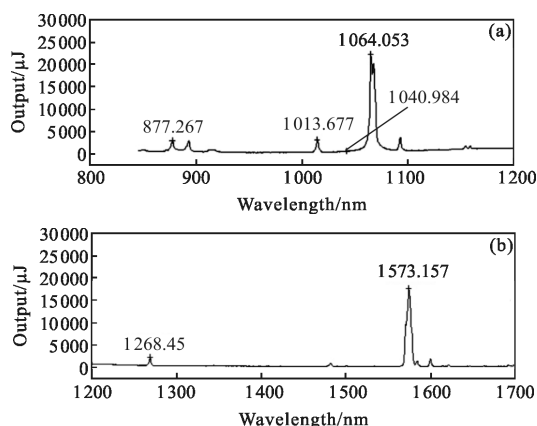


图 6 基频激光及信号光的光谱图

Fig.6 Spectroscopy of fundamental laser and signal light

### 3 结 论

为了利用基频激光腔内的高光子数密度, 并使锁模泵浦 OPO 腔调谐简单化, 通过设计 OPO 振荡腔与基频激光谐振腔长, 并使后者腔长为前者腔长的整数倍以满足同步泵浦条件, 实现了内腔式 OPO 的 1.57 μm 信号光调 Q 锁模输出。同时对信号光的输出特性进行了测量, 发现近红外信号光的锁模深度可以达到 100%, 并且揭示了信号光的锁模机理, 即其脉冲重复率依赖于基频光; 另外, 论文还给出了输出能量随泵浦能量、EO 调制频率的关系图, 发现输出能量随泵浦能量的升高而增加, 调制频率为 15 kHz 的工作阈值为 10.3 J, 小于 20 kHz 时的工作阈值。并得到了 22 °C 下 OPO 的输出光谱图, 对锁模泵浦 OPO 的发展具有参考意义。

### 参 考 文 献:

[1] Li Peng, Li Yuanji, Zhang Kuanshou. Stable low noise 1.5 μm laser generated by a singly resonant optical parametric

oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12: 78–84.

[2] Shao Zhenhua, Zhu Haiyong, Ye Yanlin, et al. 1.65 μm RTP–OPO intra-cavity driven by LD end-pumped Nd:YAP laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 34–40. (in Chinese)

[3] Zhong K, Guo S, Wang M, et al. A non-critically phase matched KTA optical parametric oscillator intracavity pumped by an actively Q–switched Nd:GYSGG laser with dual signal wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 17–20

[4] Li Zhongyang, Zhang Yunpeng, Bing Pibin, et al. Investigation on high-order cascaded parametric processes in terahertz parametric oscillator with a noncollinear phase-matching scheme [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 66–70. (in Chinese)

[5] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(4): 58–62. (in Chinese)

[6] Tian Jinrong, Liu Jinghui, Song Yanrong, et al. Advances and applications of dual-wavelength optical parametric oscillators[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(5): 95–99. (in Chinese)

[8] Chen Y, Tsai L. Comparison between shared and coupled resonators for passively Q–switched Nd:GdVO4 intracavity optical parametric oscillators [J]. *Appl Phys B*, 2006, 82(3): 403–406.

[7] Su Hui, Li Zhiping, Duan Yanmin, et al. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 101–105. (in Chinese)

[9] Wang Jiaxian, Lin Zhenghuai, Zhang Pei, et al. Nonlinear optical properties of nanometer semiconductor compound films and their applications to lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 52–55. (in Chinese)

[10] Derryck Reid T, McGowan C, Ebrahimzadeh M. Characterization and modeling of a noncollinearly phase-matched femtosecond optical parametric oscillator based on KTA and operating to beyond 4 pm [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(1): 1–9.