

# 单谐振光参变振荡器稳定性分析

林洪沂<sup>1,2</sup> 许英朝<sup>1,2</sup> 孟宪国<sup>1,2</sup> 黄晓桦<sup>1,2</sup> 檀慧明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024

<sup>2</sup>福建省高校光电技术重点实验室, 福建 厦门 361024

<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 性能稳定可靠的宽调谐光参变振荡器(OPO)是一种非常理想的相干光源,具有最佳的相干性和调谐范围,对于光谱分析、激光干涉计量、遥感、差分吸收雷达等具有重要意义。谐振腔结构、聚焦参数、抽运阈值比、热效应、群速度色散以及其他非线性效应都会影响光参变振荡器的稳定性。详细分析了影响光参变变换稳定性的各种因素,并指出实现单频运转是减弱输出波长噪声最有效的办法。

**关键词** 激光器;单谐振光参变振荡器;可调谐激光;稳定性;热效应

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.011402

## Stability Analysis of Single-Resonant Optical Parametric Oscillator

Lin Hongyi<sup>1,2</sup> Xu Yingchao<sup>1,2</sup> Meng Xianguo<sup>1,2</sup> Huang Xiaohua<sup>1,2</sup> Tan Huiming<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology,  
Xiamen, Fujian 361024, China

<sup>2</sup>Fujian Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

<sup>3</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** A stable and reliable optical parametric oscillator (OPO) with the best coherence and tunable spectral range is an ideal laser source. It is widely used in spectrum analysis, laser interference measurement, remote sensing, laser differential absorption radar, etc. The structure of resonant cavity, focusing parameters, pump threshold ratio, thermal effect, group velocity dispersion and other nonlinear effects affect the stability of the OPO system. Various factors which influence the stability of optical parametric transformation are analyzed, the most effective way to eliminate the noise of the OPO system is pointed out, which is the realization of single frequency operation.

**Key words** lasers; single-resonant optical parametric oscillator; tunable laser; stability; thermal effect

**OCIS codes** 140.3580; 140.3600; 190.4360

## 1 引言

宽光谱激光的产生途径有很多,最常见最突出的是激光器,如近红外波段工作的钛蓝宝石激光器和可见光波段工作的染料激光器。它们的增益是通过受激辐射来实现的,调谐范围受激光工作介质能级的限制。还有一种是可调谐激光光源:光参变振荡器(OPO)<sup>[1]</sup>。它是一种利用非线性晶体[如周期性极化铌酸锂(PPLN)、掺氧化镁周期性极化铌酸锂(PPMgLN)、周期性极化钽酸锂(PPLT)、周期性极化钛氧磷酸钾(PPKTP)等]的二阶非线性效应来实现频率变换的器件,其增益来自于光抽运非线性效应,调谐范围仅受非线性晶体透明范围的限制。OPO具有调谐范围宽、转换效率高、结构简单等优点,广泛应用于天文学、物理学、激光分离同位素、痕量气体和蒸气检测、光电对抗、自由空间通信和生物医学等领域<sup>[2-5]</sup>。

收稿日期: 2014-07-23; 收到修改稿日期: 2014-08-14; 网络出版日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11304259)、福建省教育厅A类科技项目(JA12248,JA12255)

作者简介: 林洪沂(1982—),男,博士,副教授,主要从事全固态激光与非线性频率变换技术等方面的研究。

E-mail: linyi0714@163.com

OPO的噪声特性是衡量OPO性能的重要指标之一。噪声低,意味着输出功率稳定性好,在遥感、光谱分析、差分吸收雷达以及科学实验等很多实际应用中都有严格的要求。同时,对OPO自身来说,噪声低意味着参变光不会出现较大的功率波动,不会对腔内光学元件(如介质膜系、非线性晶体、调谐元件等)造成损伤,从而延长了OPO的工作寿命<sup>[1]</sup>。提高OPO系统的稳定性,一直是科研人员努力的方向。

## 2 影响OPO稳定性的因素

影响OPO稳定性的因素有很多,如抽运阈值功率比、谐振腔结构、热效应、群速度色散以及其他的寄生非线性效应。

### 2.1 抽运阈值比

尽管OPO已经实现了四十余年,其稳定性还没有得到很好的诠释。早在1969年,Kreuzer认为,若抽运源为完美单频光时,OPO效率 $\eta$ 完全由抽运阈值比 $I_{\text{ratio}}$ 决定,抽运光的功率绝对值并不起决定作用。如图1所示,效率 $\eta$ 开始随 $I_{\text{ratio}}$ 增加而迅速增大,在 $I_{\text{ratio}}=2.5$ 时,可以达到100%。随后 $\eta$ 随着 $I_{\text{ratio}}$ 增加而减小。在 $I_{\text{ratio}}=4.6$ 时,效率减为80%,此时闲频光的输出功率最大,且为单频光,功率很稳定。但是当抽运光超过阈值的4.6倍时,闲频光便开始多纵模运转,输出功率变得很不稳定<sup>[6]</sup>。

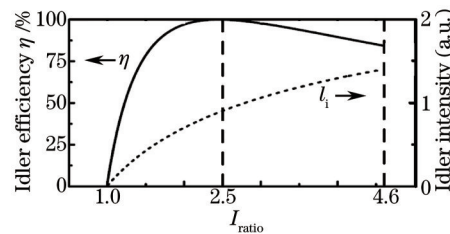


图1 根据Kreuzer理论计算的转换效率(实线)、闲频光的输出功率(虚线)与抽运阈值比的关系

Fig.1 Relationship between calculated conversion efficiency based on kreuzer's theory (full line), output power of idler frequency (dash line) and pump threshold ratio

因此,对于确定功率的抽运源,为了获得最大功率的单频闲频光稳定输出,可以让振荡阈值调整到一个优化值(阈值并不是越小越好)。如选择合适的输出耦合镜,调整非线性晶体的长度,或者选择适宜的非线性系数。Sowade等<sup>[6]</sup>将晶体长度减小一半,在同样抽运功率下,可以使稳定输出的单频闲频光功率增加两倍。

### 2.2 群速度色散

2010年,Phillips等<sup>[7]</sup>发展了OPO稳定性理论,提出当 $I_{\text{ratio}}$ 达到一定值时,平面波单谐振OPO会表现出一种时间调制的非稳定性<sup>[7]</sup>。考虑到抽运光、信号光和闲频光三者完全自洽的相互作用,在一些光谱区域,这个稳定性抽运阈值比 $I_{\text{ratio}}$ 要小于以前的预测值4.6;在一些特殊的情况下,这个值甚至接近于1,这就阻碍了OPO单频的高效运转。并且,具体分析特定光谱区域的非稳定性,会发现群速度失配和群速度色散对其有重要的影响。

Phillips认为所有相互作用的波都是变化的,这些场的包络面以群速度移动。计算谐振光的噪声在谐振腔内一次往返过程中是否增减时,群速度色散起了决定性作用。因而,稳定性不但与输入的抽运功率有关,还与群速度有关。1064 nm抽运的PPLN-OPO非稳态抽运阈值比 $I_{\text{ratio}}$ 与谐振光波长的关系如图2所示,图

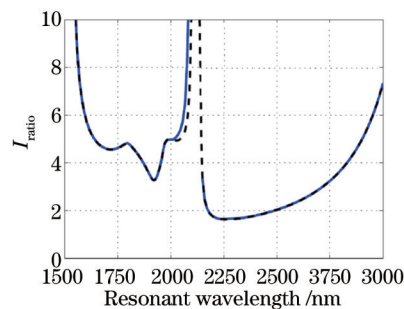


图2 非稳态抽运阈值比与谐振光波长的关系

Fig.2 Relationship between instability pump threshold ratio and resonant wavelength

中非线性晶体 PPLN 长度为 5 cm, 腔内损耗为 1%, 由图 2 可知, 非稳定性阈值与谐振光波长密切相关。若谐振光的波长越短, 非稳阈值越大, OPO 越稳定<sup>[7]</sup>。

### 2.3 晶体对光的吸收

晶体对于抽运光、信号光、闲频光的吸收会产生很多热效应, 也会严重影响 OPO 系统的稳定性。

#### 2.3.1 改变阈值

在典型准相位匹配 OPO 系统中, 单程往返的参变增益仅为 1% 量级。这就要求在谐振光波范围内, 非线性晶体具有很高的透射率。若信号光吸收损耗为  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ , 就会使 OPO 阈值达到 10 W 以上。

PPLN 具有较大的非线性系数, 较宽的透明光谱范围和可以实现准相位匹配的结构, 因此以 PPLN 为例来分析其性能。PPLN 晶体通常在  $2.4\sim 2.9 \mu\text{m}$  是透明的<sup>[2-3]</sup>, 但是文献[8]报道了在这个范围内的吸收峰如图 3 实线所示, 这是由  $\text{H}^{-1}$  杂质造成的。由于存在损耗, 即使采用 20 W,  $1.5 \mu\text{m}$  的抽运光, 也不可能克服阈值, 形成信号光  $2.6 \mu\text{m}$  和闲频光  $3.5 \mu\text{m}$  的振荡。通过高温退火除去  $\text{H}^{-1}$ , 可以有效地降低  $2.6 \mu\text{m}$  附近的吸收, 实现 OPO 有效运转<sup>[8]</sup>。

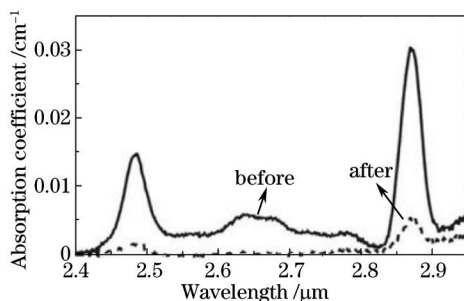


图3 经高温退火处理前后的铌酸锂吸收系数光谱图

Fig.3 Absorption coefficient spectra of lithium niobate before and after the high-temperature annealing process

#### 2.3.2 各种热效应

光的吸收不仅会提高抽运阈值, 也会使晶体温度升高, 折射率发生改变, 即热光效应。温度变化会导致温度梯度和产生的参变光的频率发生漂移。甚至, 对于吸收小于  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  的谐振光波, 会引起输入-输出的双稳态和 200 GHz 的频率漂移<sup>[1]</sup>。

对于 OPO, 晶体吸收部分参变光会在自身内部产生温度梯度分布从而出现热透镜、热自锁、热致光波导、热致双稳态、热致相位失配、热致双折射等多种热效应<sup>[9-13]</sup>。

热透镜、热致相位失配、热致双折射对于 OPO 系统通常是不利的。热透镜效应, 可以在晶体中产生纵向和横向的温度梯度, 纵向的温度梯度可以引起参变光之间的相位失配, 影响 OPO 的参变增益、稳定性和输出光的光束质量<sup>[9]</sup>。热致双折射效应会影响光束质量, 使光斑发生畸变。

有时热效应产生的热自锁和热致光波导却是有益的。如热致光波导可以明显地改善 OPO 输出功率和谐振腔的稳定性, 提高转换效率, 同时可以有效地消除纵向温度梯度, 降低热致相位失配, 实现单频光输出<sup>[9-10]</sup>。热自锁效应可以明显地改善谐振光的稳定性, 通过精确地控制温度和利用热自锁效应, 在不采用标准具的情况下也有可能实现谐振光的单频输出<sup>[13]</sup>。

降低晶体的热效应方法有: 1) 用优化的信号光输出耦合镜来代替信号光全反镜, 实现信号光输出, 以减少腔内信号光的功率, 降低信号光的吸收。2) 采用吸收系数小的非线性晶体, 如 PPMgLT 代替 PPMgLN 晶体。在  $1\sim 7.5 \mu\text{m}$  波段, 对于同样厚度的 PPLT 透射率比 PPLN 要好, 尤其是在大于  $4.5 \mu\text{m}$  波段, PPLT 的吸收系数要小很多<sup>[1]</sup>。3) 对晶体的不同部位进行不同的温度控制。如采用双区温控炉对 PPLN 晶体分区加热, 人为地提供一个合适的纵向温度梯度, 可以有效地提高信号光的功率和光束质量的稳定性<sup>[14]</sup>。4) 采用反转畴占空比为 50% 的非线性晶体。热致折射率的改变主要来自于热释电效应。与普通单畴晶体相比, 在周期性极化的多畴晶体中, 热释电效应较弱。这是因为占空比为 50% 的多畴极化晶体可以交替改变热释电常数的正负, 有效地减小热释电效应。

### 2.3.3 光折变效应

光不但可以通过加热晶体来改变折射率,也可以通过光折变效应来改变晶体的折射率。这里,电荷载体由于光照重新分配,引起空间变化的电场,继而由于电光效应改变晶体折射率<sup>[15]</sup>。折射率改变量为

$$\Delta n \propto \frac{j_{\text{phv}}}{\rho_{\text{ph}} + \rho_{\text{d}}}, \quad (1)$$

式中  $\Delta n$  为晶体折射率改变量,  $j_{\text{phv}}$  为光伏电流,与光激发杂质浓度如  $\text{Fe}^{2+}$  成正比,  $\rho_{\text{ph}}$  为光电导率,  $\rho_{\text{d}}$  为暗电导率。这种光折变效应会导致激光光束产生强烈的畸变,因而也称为光损伤或者光折变损伤。(1)式指出有三种方法可以减少光损伤:1) 加热晶体,来增加暗电导率;2) 掺杂氧化镁(MgO)粒子来增加光电导率;3) 通过热电处理和光学清洗,减少光激发载流子浓度。目前,加热或掺杂 MgO 是减少光损伤最常用的方法<sup>[11]</sup>。

总之,晶体对光的吸收,大部分是无益的,会影响 OPO 的阈值,改变参变光的频率稳定性,也会严重影响输出功率的稳定性,劣化输出光的光束质量。在实验过程中,需要改变谐振腔的结构或优化制冷来合理的处理热效应。

## 2.4 非线性效应的影响

在 OPO 系统中,除了抽运光通过光参变过程产生信号光与闲频光以外,还存在其他多种二阶非线性效应(级联 OPO、逆转换、基于双折射相位匹配和高阶准相位匹配的混频效应等),甚至三阶非线性效应(受激拉曼散射、四波混频、受激布里渊散射等)。这些非线性混频效应也会对 OPO 的稳定性产生许多不利的影

### 2.4.1 级联 OPO

对于周期性极化晶体,如 PPLN、PPLT、PPKTP 等高非线性系数增益介质,有时会产生二阶参变振荡(图 4)<sup>[16-17]</sup>。即一阶 OPO 产生的信号光  $\omega_s$ ,在一定条件下,可以充当抽运光,来产生二阶光参变振荡  $\omega_{i2}$ 、 $\omega_{s2}$ 。

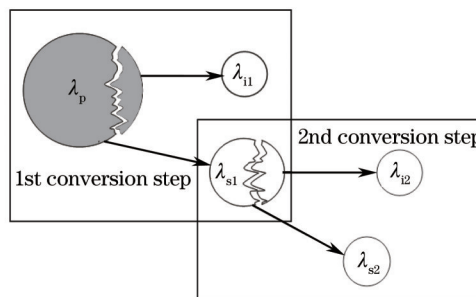


图4 二阶级联 OPO 示意图

Fig.4 Sketch map of second order cascaded OPO

如周期  $28.5 \mu\text{m}$  的 PPLT 晶体,采用波长为  $1064 \text{ nm}$  脉冲 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器抽运,通过一阶 OPO,可以产生  $1.445 \mu\text{m}$  信号光和  $4.03 \mu\text{m}$  闲频光;在相同周期下满足相位匹配,  $1.445 \mu\text{m}$  信号光又可以产生  $2.091 \mu\text{m}$  信号光和  $4.685 \mu\text{m}$  闲频光<sup>[17]</sup>。

级联 OPO 会降低系统的效率,尤其会影响信号光的功率稳定性和 OPO 系统的光谱稳定性。为了保证仅有一个信号光在谐振腔内振荡,可以在谐振腔内部插入布儒斯特棱镜或者选用二阶信号光高透的腔镜等方法,增加二阶信号光的损耗,消除级联 OPO<sup>[18]</sup>。

### 2.4.2 逆转换

在光参变振荡过程中,信号光和闲频光由于增益作用被不断放大,当其振幅与抽运相差不大时,抽运光能量开始明显衰减,能量从抽运光流向参变光。若信号光和闲频光能量过大,那么在振荡过程中不仅得不到增益,反而会使抽运光被放大,能量从参变光流向抽运光,此即为逆转换<sup>[19]</sup>。

逆转换是影响参变光输出稳定性以及光束质量的关键因素,随光斑分布和时间而变化,逆转换现象很难消除。逆转换过程与空间、时间以及三种光的功率密度密切相关,可以通过控制这些因素来调节逆转换过程。

实际中可以通过很多方法降低逆转换,如采用特殊的谐振腔型(如环形腔),尽量减少谐振腔中的闲频光,降低逆转换;另外通过非共线相位匹配或者非共线谐振,也可以降低逆转换。

### 2.4.3 基于高阶准相位匹配与双折射相位匹配的混频效应

通常在周期性极化晶体中,不但存在一阶准相位匹配的光参变变换过程,而且还存在高阶准相位匹配和双折射相位匹配的非线性效应<sup>[20]</sup>。

如图5所示,对于1064 nm抽运的PPMgLN晶体,除了产生信号光和闲频光(一阶准相位匹配)以外,还会有较强的可见光伴随输出,分别是抽运光倍频(SH,双折射相位匹配)、信号光倍频(二阶准相位匹配)、信号光与抽运光和频(SF,双折射相位匹配)、信号光三倍频(TH,五阶准相位匹配)以及信号光倍频与抽运光的和频(八阶准相位匹配)等混频效应产生的。其中抽运光的倍频(532 nm绿光)阈值低于OPO阈值;信号光与抽运光和频及信号光倍频阈值略高于OPO阈值,而其他混频阈值则需要较大的抽运功率。

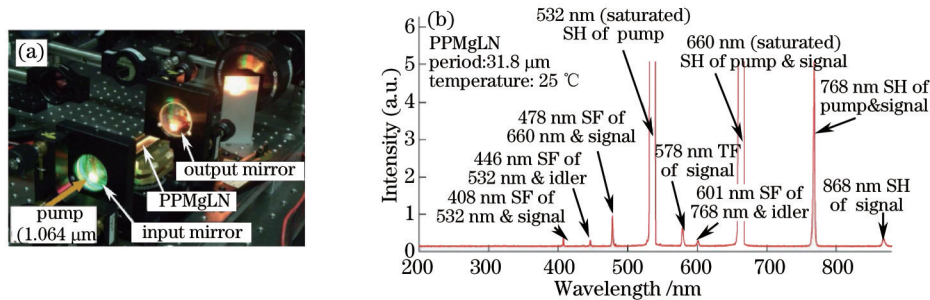


图5 (a)伴随信号光与闲频光输出的可见光和(b)所对应的光谱

Fig.5 Visible light along with the signal and idler light and (b) corresponding spectrum

这些寄生混频效应会降低系统的效率,影响信号光和闲频光输出功率的稳定性,甚至引起非线性晶体的损伤与断裂<sup>[21]</sup>。可以采用性能更优良的晶体如PPMgLT替代PPMgLN来降低寄生振荡。

### 2.4.4 受激拉曼散射

当一束能量很高的激光(如信号光)通过非线性晶体时,在一定条件下会产生受激拉曼散射,即散射光谱相对入射光有一定频移量,此频移量对应于晶体内部某些确定的能级跃迁频率,例如非线性晶体中光学声子的频率。若频率减小则为斯托克斯散射,若频率增加则为反斯托克斯散射。

在单谐振OPO系统中,一般只有谐振光才会出现受激拉曼散射(对于信号光单谐振OPO,则为信号光;而对于闲频光单谐振OPO,则为闲频光),而非谐振光和抽运光比较难<sup>[22-24]</sup>。对于信号光单谐振OPO系统来讲,拉曼散射会降低信号光输出功率,影响信号光功率稳定性和光谱稳定性<sup>[22]</sup>。但是受激拉曼散射也可以作为信号光功率限制器,稳定谐振腔内部信号光的光功率,使闲频光的功率更稳定<sup>[23]</sup>。

减少受激拉曼散射的办法主要有:1)降低谐振腔内部的信号光功率;2)增加谐振腔斯托克斯光和反斯托克斯光的透过率<sup>[24]</sup>;3)采用光栅作为输出耦合镜。

### 2.4.5 四波混频

四波混频是在非线性晶体中四个光波相互作用所引起的非线性光学效应,它起因于介质的三阶非线性极化<sup>[25]</sup>。在OPO系统中,其产生的主要原因有:1)相互作用的四个光波满足相位匹配条件,其中信号光与闲频光的二次谐波作为中间作用场;2)周期性极化晶体(如PPKTP)参变增益的带宽比较宽,尤其在兼并点附近,其产生的辐射场会被光参变过程放大。

四波混频对OPO系统稳定性的影响主要表现在:1)产生新的波长,使原有信号的光能量受到损失,影响系统的稳定性;2)若产生的新波长与原有某波长相同或重叠,会对输出功率产生严重的干扰。

总之,利用普通的谐振腔结构(驻波腔和环形腔),OPO很难减小非线性效应。为了减少非线性效应的影响,需要通过改变谐振腔镜的镀膜特性(增加干扰光的透射率)或者引入色散器件(光栅、棱镜等)来实现。

## 2.5 谐振腔结构

在单谐振、双谐振、三谐振三类OPO系统中,单谐振OPO光谱和功率稳定性最好。单谐振OPO可以分为线形腔与环形腔两类。单谐振线形腔,由于抽运光、信号光与闲频光在腔内往返两次经过非线性晶体,在反向通过时有可能导致逆转换,增加OPO不稳定性。而且,这种逆转换对各器件引起的相移和晶体表面的反射很敏感,也会增加光谱非稳定性。单谐振环形腔OPO抽运光、信号光与闲频光三者谐振腔中只通过一次非线性晶体,大大减少了逆转换的可能性,同时环形腔也可以方便地置入标准具等选频器件实现单频

运转,因而得到了广泛的应用<sup>[10]</sup>。

单谐振 OPO 又可以分为内腔和外腔两类<sup>[1-3,26]</sup>。内腔 OPO 腔内抽运功率密度高,阈值低,但是抽运光吸收严重,容易使 OPO 稳定性变差,不适合大功率输出<sup>[1,26]</sup>。外腔 OPO 抽运光功率密度相对较低,抽运光的吸收与寄生非线性效应相对较弱,功率和光谱稳定性比较好<sup>[2,3]</sup>。

## 2.6 聚焦参数和模式匹配

谐振腔的共焦参数  $b$  对于优化光束聚焦,优化抽运光束和输出光空间模式的模式重叠有重要作用,共焦参数严重影响光参变增益和振荡阈值。

对于双镜对称腔,若腔镜的曲率半径为  $r$ ,谐振腔有效长度为  $L_{\text{eff}}$ ,则共焦参数  $b$  为

$$b = \sqrt{2L_{\text{eff}}(2r - L_{\text{eff}})} . \quad (2)$$

聚焦参数  $\xi = L_c/b$ , 取值范围为  $1 \leq \xi \leq 7$ 。增加  $\xi$  值,可以有效地减少阈值,但是会引起输出功率和光谱的不稳定性<sup>[27]</sup>。兼顾阈值和稳定性  $\xi$  理论优化值为 2.8,经验优化值为 2。

实际中,抽运光与信号光之间模式匹配,可以通过聚焦抽运光来实现。热透镜效应会影响模式匹配,导致 OPO 多纵模运转,影响输出功率和光谱的稳定性。在高功率抽运时,需要考虑热透镜效应对模式匹配的影响。

另外,抽运源的输出功率稳定性、光谱线宽、外界环境等因素也会影响 OPO 系统的稳定性。

## 3 实现单频运转

大量文献指出,消除或减少 OPO 输出波长噪声最简单有效的方法就是迫使 OPO 实现单频运转<sup>[28-32]</sup>。单频 OPO 能量更集中,光谱和功率更稳定,在高分辨光谱学、相干通讯、激光雷达等领域具有特殊的应用价值。

在长脉冲或者连续抽运 OPO 中,采用环形腔结构单频激光器抽运,在低抽运功率时较易实现单频运转。但是在高功率或者纳秒脉冲多纵模抽运 OPO 系统中,由于内在的高增益,往往会导致光谱带宽很宽。此时需要采用选频技术,才可以获得信号光或闲频光的单频激光输出。

实现单频运转的技术包括主动和被动两种形式。主动方式主要为种子注入法<sup>[28-29]</sup>。种子注入是一种非常有效的线宽压缩方法,它会提高 OPO 的光谱和功率稳定性,但是需要复杂的反馈锁定电路和不同波长的单频种子源。He 等<sup>[28]</sup>采用多纵模 Nd:YAG 激光器作为抽运源,单频可调谐半导体激光作为种子,获得了波长稳定性高的信号光输出,信号光线宽为  $9.6 \times 10^{-4}$  nm。种子注入 OPO 的输出波长稳定性甚至比单频抽运源抽运的普通 OPO 还要好。

被动选模结构简单,通过在谐振腔内使用一个频率选择元件(如标准具、衍射光栅),仅仅使一个谐振腔模式起振,就可以获得单纵模输出<sup>[30-33]</sup>。但是这种腔内选频元件通常会增加损耗,降低 OPO 的性能。Samanta 等<sup>[30]</sup>采用线宽小于 25 MHz 波长为 532 nm 的单频激光器作为抽运源,获得了单频激光输出:信号光 966 nm 线宽仅为 2.9 MHz。由于抽运源为单频输出,闲频光同样也为单频输出,其线宽为 5.8 MHz。Vainio 等<sup>[31]</sup>采用线宽 70 kHz 单频 1064 nm 激光器作为抽运源,并用一个利特罗光栅实现单频输出。

## 4 结 论

详细介绍了影响 OPO 输出稳定性的各种因素,即谐振腔结构、聚焦参数、抽运阈值比、热效应(热透镜、热自锁、热致光波导、热致双稳态、热致相位失配、热致双折射)、群速度色散以及其他非线性效应(级联 OPO、受激拉曼散射、逆转换、基于双折射相位匹配和高阶准相位匹配的混频效应),并分析了其产生的机理和解决办法。指出实现单频运转是提高波长输出稳定性的最有效的方法之一,对提高 OPO 系统的稳定性,具有重要的实用意义。

## 参 考 文 献

- 1 I Breunig, D Haertle, K Buse. Continuous-wave optical parametric oscillators: recent developments and prospects[J]. Appl Phys B, 2011, 105(1): 99-111.
- 2 Chang Jianhua, Yang Zhenbo, Lu Zhou, *et al.*. A novel multi-wavelength mid-infrared difference frequency generation laser source based on PPLN[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002009.

- 常建华, 杨镇博, 陆 洲, 等. 一种新型的基于PPLN的多波长中红外激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002009.
- 3 Z Jiao, J Guo, G He, *et al.* Narrowband intracavity MgO:PPLN optical parametric oscillator near degeneracy with a volume Bragg grating[J]. Opt & Laser Technol, 2014, 56: 230–233.
- 4 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.* ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 070206.
- 魏 磊, 肖 磊, 韩 隆, 等. Tm:YAP激光抽运ZGP晶体光参量振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 070206.
- 5 P Mahnke, P Peuser, P Huke. Nd:YAG laser/KTiOAsO<sub>4</sub> (KTA) OPO system for laser ultrasound measurements on carbon-fiber-reinforced composite materials[J]. Appl Phys B, 2014, 116(4): 333–338.
- 6 R Sowade, I Breunig, J Kiessling, *et al.* Influence of the pump threshold on the single-frequency output[J]. Appl Phys B, 2009, 96(1): 25–28.
- 7 C R Phillips, M M Fejer. Stability of the singly resonant optical parametric oscillator[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(12): 2687–2699.
- 8 J R Schwesyg, C R Phillips, K Ioakeimidi, *et al.* Suppression of mid-infrared light absorption in undoped congruent lithium niobate crystals[J]. Opt Lett, 2010, 35(7): 1070–1072.
- 9 I H Bae, H S Moon, S K Kim, *et al.* Self-guided operation of singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator based on bulk MgO-doped PPLN[J]. Appl Phys B, 2012, 106(4): 797–801.
- 10 S T Lin, Y Y Lin, T D Wang, *et al.* Thermal waveguide OPO[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 1323–1319.
- 11 Liu Lei, Wang Xiaobo, Li Xiao, *et al.* Thermal-induced dephasing in mid-infrared continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 24–28.
- 刘 磊, 汪晓波, 李 霄, 等. 中红外连续波单谐振光学参量振荡器热致相位失配[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 24–28.
- 12 M Vainio, J Peltola, S Persijn, *et al.* Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators [J]. Appl Phys B, 2009, 94(3): 411–427.
- 13 M Vainio, J Peltola, S Persijn, *et al.* Singly resonant cw OPO with simple wavelength tuning[J]. Opt Express, 2008, 16 (15): 11141–11146.
- 14 A Godard, M Raybaut, T Schmid, *et al.* Management of thermal effects in high-repetition-rate pulsed optical parametric oscillators[J]. Opt Lett, 2010, 35(21): 3667–3669.
- 15 K Buse. Light-induced charge transport processes in photorefractive crystals I: Models and experimental methods[J]. Appl Phys B, 1997, 64(3): 273–281.
- 16 M Vaidyanathan, R C Eckardt, Vince Dominic, *et al.* Cascaded optical parametric oscillations[J]. Opt Express, 1997, 1 (2): 49–53.
- 17 M Katz, P Blau. Mid-IR OPO operating near room temperature based on vapor-transport equilibrated periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>[C]. Lasers and Electro-Optics, 2007: CThL5.
- 18 P Schlup, I T McKinnie, S D Butterworth. Single-mode, singly resonant, pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. Appl Opt, 1999, 38(36): 7398–7401.
- 19 Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. Back conversion in optical parametric process[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 024215.
- 刘建辉, 柳 强, 巩马理. 光参量过程中的逆转换问题[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 024215.
- 20 H H Abu-Safe. Investigation of multiconversion processes in periodically poled LiNbO<sub>3</sub>-based optical parametric oscillators [J]. Appl Opt, 2005, 44(34): 7458–7466.
- 21 H Ishizuki, T Taira. High energy quasi-phase matched optical parametric oscillation using Mg-doped congruent LiTaO<sub>3</sub> crystal[J]. Opt Express, 2010, 18(1): 253–258.
- 22 Yao Wenming, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.* Extra-cavity, all-solid-state continuous wave optical parametric oscillator and stimulated raman scattering in PPMgLN[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202008.
- 姚文明, 檀慧明, 王 帆, 等. 外腔全固态连续波PPMgLN光学参量振荡器与受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202008.
- 23 A V Okishev, J D Zuegel. Intracavity-pumped Raman laser action in a mid IR, continuous-wave (cw) MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. Opt Express, 2006, 14(25): 12169–12173.
- 24 A Henderson, R Stafford. Spectral broadening and stimulated Raman conversion in a continuous-wave optical parametric oscillator[J]. Opt Lett, 2007, 32(10): 1281–1283.

- 25 N Thilman, B Jacobsson, V Pasiskevicius, *et al.*. Study of a narrowband optical parametric oscillator at degeneracy with a transversely chirped bragg grating[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD). 2009: CWC1.
- 26 Y Duan, H Zhu, Y Ye, *et al.*. Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(5): 1314-1317.
- 27 W R Bosenberg, A Drobshoff, J I Alexander, *et al.*. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(10): 713-715.
- 28 Y He, B J Orr. Tunable single-mode operation of a pulsed optical parametric oscillator pumped by a multimode laser [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(27): 4836-4848.
- 29 Long Qiqiang, Zhong Kai, Hong Guanglie. Investigation on eye-safe ring-cavity KTP optical parametric oscillator with seed injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0614003.  
龙启强, 钟凯, 洪光烈. 种子注入环形腔人眼安全KTP参变振荡器的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0614003.
- 30 G K Samanta, M Ebrahim-Zadeh. Continuous-wave singly-resonant optical parametric oscillator with resonant wave coupling[J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 6883-6888.
- 31 M Vainio, M Siltanen, J Peltola, *et al.*. Continuous-wave optical parametric oscillator tuned by a diffraction grating[J]. *Opt Express*, 2009, 17(9): 7702-7707.
- 32 K L Vodopyanov, I Makasyuk, P G Schunemann. Grating tunable 4-14  $\mu\text{m}$  GaAs optical parametric oscillator pumped at 3  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Express*, 2014, 22(4): 4131-4136.
- 33 Lin Hongyi, Meng Xianguo, Huang Xiaohua, *et al.*. Realization of quasi-phase-matched tunable single-frequency optical parametric oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060005.  
林洪沂, 孟宪国, 黄晓桦, 等. 基于准相位匹配的可调谐单频光学参变振荡器的实现方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060005.

栏目编辑: 苏 岑