

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

林洪沂^{1,2} 孟宪国^{1,2} 黄晓桦^{1,2} 许英朝^{1,2} 蔡丽娥^{1,2}

(¹ 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024)
(² 福建省高校光电技术重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要 可调谐单频光参变振荡器是一种非常理想的相干激光光源,具有调谐范围宽、相干性好、效率高和性能稳定可靠的优点,广泛应用于激光干涉计量、差分吸收雷达、光谱分析、光电对抗和生物医疗等各个领域。但是基于准相位匹配的普通光学参变振荡器由于宽的光参量增益和高功率抽运往往是多纵模运转,需要采用多种选频方法[种子注入、光栅及法布里-珀罗(FP)标准具]或者利用光学参变振荡器自身的运转特性(抽运阈值比、热自锁效应及热致光波导效应)来实现单频运转。详细分析了实现可调谐单频光学参变振荡器的各种技术和实验装置。

关键词 激光器;单频光参变振荡器;可调谐激光;热自锁效应;热致光波导效应

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060005

Realization of Quasi-Phase-Matched Tunable Single-Frequency Optical Parametric Oscillator

Lin Hongyi^{1,2} Meng Xianguo^{1,2} Huang Xiaohua^{1,2} Xu Yingchao^{1,2} Cai Li'e^{1,2}

(¹ School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)
(² Fujian Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)

Abstract A tunable single-frequency optical parametric oscillator (OPO) based on quasi-phase-matching is an ideal coherent light source with, high efficiency, good coherence, wide tunable spectral range and reliable and stable performance. It is widely used in laser interference measurement, laser differential absorption radar, spectral analysis, optoelectronic countermeasure, laser medicine etc. Due to the wide optical parametric gain and high power pump, most OPOs are often operated in multiple longitudinal modes, and a variety of methods are needed to achieve single-frequency operation. These methods include frequency selection method (such as injection-seed, grating and Fabry-Pérot etalon) and the operation characteristics of the OPO system itself (pump threshold ratio, thermal self-locking effect and thermal waveguide effect). This paper analyzes the realization of tunable single-frequency OPO.

Key words lasers; single-frequency optical parametric oscillator; tunable laser; thermal self-locking effect; thermal waveguide effect

OCIS codes 140.3600; 140.3570; 230.4320; 140.3580

1 引言

光学参变振荡器(OPO)是利用双折射晶体(如KTP、KTA等)或者周期性极化晶体(如周期性极化晶体PPLN、PPKTP、PPLT等)的非线性效应来实现频率变换的器件。它既是光学频率变换器件,又是波长可调谐的激光光源,具有调谐范围宽、效率高、性能稳定可靠及结构简单紧凑等优点^[1~4]。相对于其他可调谐激光光源(钛宝石激光器、染料激光器、泛频一氧化碳激光器、Tm:YAG激光器等),OPO是一种非常有竞争力、

收稿日期: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-04-01; **网络出版日期**: 2013-05-28

基金项目: 福建省教育厅 A 类科技项目(JA12248)和福建省自然科学基金(2011J05161)资助课题。

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

E-mail: linyi0714@163.com

有前途的可调谐相干辐射源,广泛地应用于物理学、天文学、激光分离同位素、自由空间通信、痕量气体和蒸气检测、光电对抗和生物医学等各个领域,因此 OPO 一直是激光技术研究的热点^[3,4]。

但在一些特殊的应用场合如遥感、光谱分析、差分吸收雷达等,为了提高光谱准确度和分辨率需要窄线宽或者单频的高功率可调谐激光作为光源。为了满足这些要求,必须采用种种方法限制光参变振荡的纵模数量,抑制大多数谐振频率的起振,实现单纵模运转。同时,对 OPO 自身来说,单纵模运转意味着参量光噪声低,即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、非线性晶体和调谐元件等)造成损伤,从而延长 OPO 的工作寿命。实现 OPO 单频运转,一直是科研人员努力的方向。

本文详细分析了实现可调谐单频 OPO 的各种技术和实验装置,包括种子注入、光栅和法布里-珀罗(FP)标准具等选频方法,以及利用 OPO 自身运转特性和抽运阈值比、热自锁效应和热致光波导效应的方法。

2 单频的实现

在连续或者长脉冲抽运的 OPO 中,采用单纵模激光器抽运和环形腔结构,较容易获得单频激光输出;但是在纳秒脉冲或者高功率多纵模抽运 OPO 中,由于内在的高增益,往往获得很宽的光谱带宽。此时只有采用选频技术,才可以获得信号光或闲频光的单频激光输出。

线宽压缩技术包括主动和被动两种形式。主动方式主要有注入种子法。注入种子是一种非常有效的线宽压缩方法,它会提高 OPO 的运转性能,但是需要复杂的反馈锁定电路和不同波长的单纵模种子源。它的调谐范围受单纵模种子源的制约。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,仅仅使一个谐振腔模式起振,获得单纵模输出。但是这种腔内选频元件通常会增加损耗,降低 OPO 的性能,如增加振荡阈值和降低转换效率等。另外,也可以利用 OPO 系统自身的运转属性(如抽运阈值比、热自锁效应和热致光波导效应等)来实现单频运转。

2.1 注入种子法

高功率或者纳秒脉冲 OPO 往往线宽较宽,频率不稳定或多纵模运转。利用注入种子锁定,可由一个功率较小,但是窄线宽、单频运转和频率稳定的激光器来控制一个高功率或者动态调谐 OPO 的光谱宽度和光束质量。

直腔 OPO 不易实现种子注入,一般采用环形腔结构。对于单谐振 OPO,与无种子注入时相比,种子激光可以极大地提高 OPO 的单色性,增加腔内信号光初始光功率,从而极大地降低 OPO 阈值,同时提高单频光的输出功率。He 等^[5]采用廉价的多纵模 Nd:YAG 激光器作为抽运源,单频可调谐半导体激光作为种子(图 1),获得了高质量单频信号光输出,信号光线宽为 120 MHz(9.6×10^{-4} nm)。由于种子激光调谐的限制,信号光的调谐范围仅有 7.5 THz(约 60 nm)。由于抽运源为多纵模,输出的闲频光也是多纵模运转。

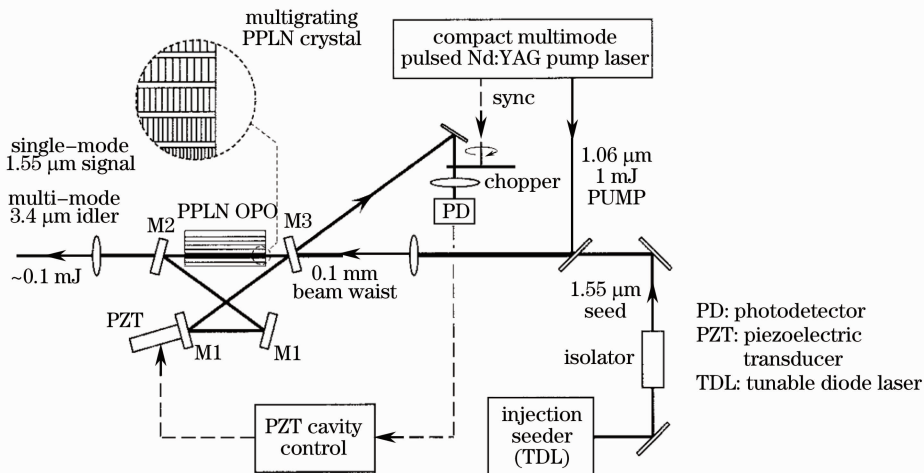


图 1 注入种子选频环形腔 OPO^[5]

Fig. 1 Injection-seeded ring-cavity OPO^[5]

2.2 标准具法

OPO 按谐振腔结构可分为线性腔和环形腔两类。

2.2.1 线形腔结构 FP 标准具选频

线形腔所需的反射镜较少,调整容易,结构简单。但是由于抽运光、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信号光与闲频光重新转变回抽运光而增加 OPO 的不稳定性。而且,这种逆转换对晶体表面的反射和各器件引起的相移很敏感,增加了光谱不稳定性,影响其纯度。

Schlup 等^[6]采用单频 Nd:YAG 激光器作为抽运源,获得了单频激光输出(图 2)。未选频时,自由运转的信号光线宽为 2 nm;腔内插入标准具,线宽可以减小到 500 MHz(3.8×10^{-3} nm)。通过改变 PPLN 晶体周期和温度,可以实现信号光 $1.449 \sim 1.594 \mu\text{m}$ 单频激光输出。

2.2.2 环形腔结构 FP 标准具选频

环形腔 OPO 的抽运光、信号光与闲频光三者在谐振腔中只一次通过非线性晶体,大大减少了信号光与闲频光重新转变回抽运光的可能性,同时环形腔也可以方便地置入标准具等选频器件,因而得到了广泛的应用。

Samanta 等^[7]采用线宽小于 25 MHz(2.4×10^{-5} nm)的 Nd:YVO₄ 倍频 532 nm 单频激光器作为抽运源,采用环形腔结构(图 3),获得了单频激光输出。信号光 966 nm 线宽仅为 2.9 MHz(9.0×10^{-6} nm);由于抽运源为单频输出,所以波长为 1184 nm 的闲频光同样也为单频输出,线宽 5.8 MHz(2.7×10^{-5} nm)。通过改变 MgO:PPLT 晶体的温度,实现了信号光 848~978 nm 和闲频光 1167~1427 nm 宽带可调谐单频激光输出。

采用标准具可以提供稳定的单纵模运转,但是会增加谐振腔内的损耗,且这种损耗与标准具的旋转角有关。标准具的走离损耗也会增加 OPO 阈值,而且在标准具角度调谐过程中,会引起功率较大变化。在宽波长扫描时,标准具 OPO 普遍存在跳模现象,这会导致不必要的光谱重叠。标准具的调谐范围等于其自由光谱范围,通过减小标准具的厚度可以增加调谐范围,但是这也会降低标准具的频率选择特性。另外,很显然标准具也不能应用于整块 OPO 谐振腔中。

2.3 光栅法

光栅是非常好的色散器件,广泛地应用于激光器的选频。常用的衍射光栅有掠入射光栅、Littrow 光栅和布拉格光栅等。

2.3.1 掠入射光栅

如图 4 所示,抽运源采用单频 $1.064 \mu\text{m}$ 种子注入 Nd:YAG 激光器。信号光的 0 级衍射构成了信号光输出,掠入射光栅的入射角有一个最佳值 88.6° ,减小入射角会引起多纵模运转,但是加大入射角会导致效率下降,而且也不会提高单纵模运行的稳定性^[8]。

这个结构可以同时实现近红外信号光与中红外闲频光单频输出,其调谐范围靠近简并点(两者频率相同)附近。采用此装置在靠近简并点 $1.80 \mu\text{m}$ 处,信号光的线宽小于 250 MHz (2.7×10^{-3} nm, 此时增益带宽为

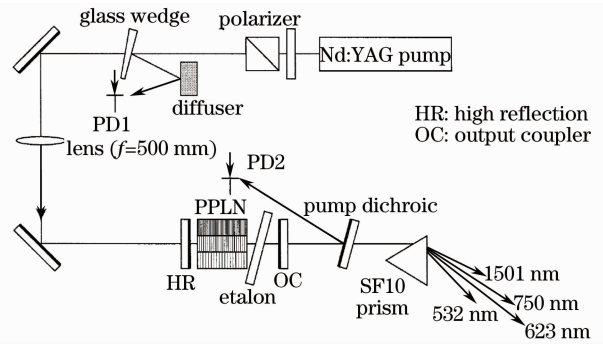


图 2 线形腔结构的标准具选频^[6]

Fig. 2 FP etalon linear-cavity OPO for frequency selection^[6]

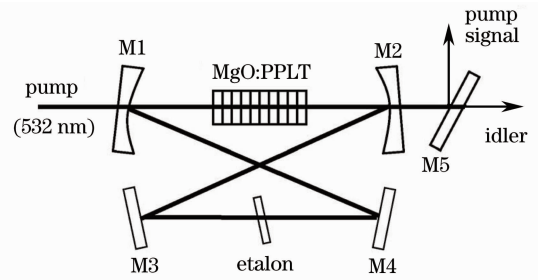


图 3 环形腔结构的标准具选频^[7]

Fig. 3 FP etalon ring-cavity OPO for frequency selection^[7]

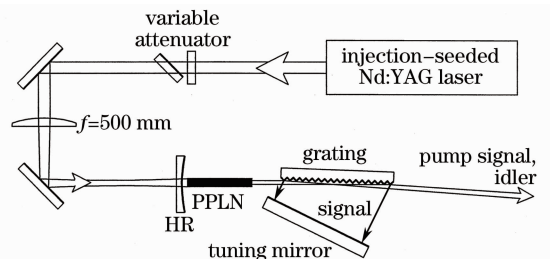


图 4 掠入射光栅 OPO^[8]

Fig. 4 Setup of the OPO based on a grazing incidence diffraction grating^[8]

30 nm)。通过改变 PPLN 晶体周期,可以实现信号光 $1.48\sim 1.80\ \mu\text{m}$ 和闲频光 $2.61\sim 3.82\ \mu\text{m}$ 宽带调谐单频激光输出。掠入射光栅选频效果良好,但是会引入非常高的衍射损耗,引起阈值的大幅度增加。

2.3.2 Littrow 光栅

Vainio 等^[9]采用线宽 70 kHz($2.6\times 10^{-7}\ \text{nm}$)单频 1064 nm 激光器作为抽运源,使用四镜线性谐振腔,并用一个 Littrow 光栅代替全反镜来实现单频输出。其中光栅仅仅对信号光是 Littrow 结构(即衍射角等于入射角),不会把闲频光反射到谐振腔内,排除了双谐振运转。实验装置和调谐特性如图 5 所示。

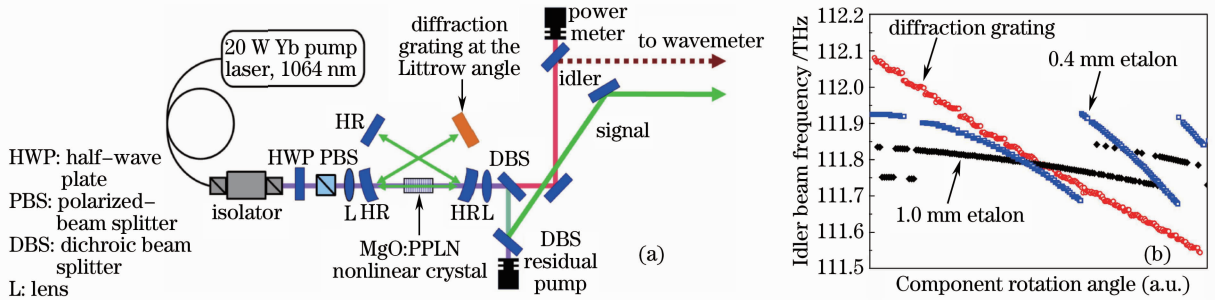


图 5 (a) Littrow 光栅 OPO 实验装置以及 (b) 标准具衍射光栅调谐特性对比^[9]

Fig. 5 (a) Experimental setup of the OPO based on a Littrow diffraction grating and (b) tuning characteristics in comparison with etalon OPOs^[9]

光栅固定在旋转平台上,通过光栅平台的旋转,改变光纤的入射角,以实现闲频光调谐。对于固定的 MgO:PPLN 周期和温度,通过改变角度,可以实现 500 GHz 的调谐(13 nm,即 $2697\sim 2684\ \text{nm}$)。而采用厚度为 1.0 mm 的标准具调谐范围为 3 nm,厚度为 0.4 mm 的标准具调谐范围为 6 nm。另外频率与光栅旋转角的线性关系比标准具好[图 5(b)]。但是采用光栅选频往往会增加阈值,降低斜率效率。

采用光栅的调谐范围和采用高反镜的调谐范围一样,不受限制。通过改变 MgO:PPLN 晶体周期和温度,可以实现信号光 $1.54\sim 1.76\ \mu\text{m}$ 和闲频光 $2.7\sim 3.45\ \mu\text{m}$ 的宽带调谐单频激光输出。

2.3.3 布拉格体光栅

对于单频 OPO,衍射光栅相比于标准具最大的优势在于光栅可以在信号光与闲频光简并点附近实现单频运转。在简并点附近,对于固定温度和周期,OPO 的增益范围可以达到几百吉赫兹,对于简单的标准具是不能实现单纵模运转的(在这种情况下,在增益范围内,可以存在多个标准具模式)。而光栅仅有一个反射最大值,在简并点附近也有很好的频率选择性。

Vainio 等^[10]采用连续可调谐单频钛宝石激光器作为抽运源,布拉格体光栅作为选频元件,如图 6 所示,在信号光与闲频光简并点附近实现了两者的单频运转,其频率差仅为 0.5 THz(约 4 nm)。信号光与闲频光的线宽仅为 80 MHz(约 $6.7\times 10^{-4}\ \text{nm}$)。通过改变抽运光波长和晶体温度,信号光与闲频光的调谐范围约为 55 nm。此 OPO 非常有价值,如通过光外差技术,可以产生连续太赫兹场。

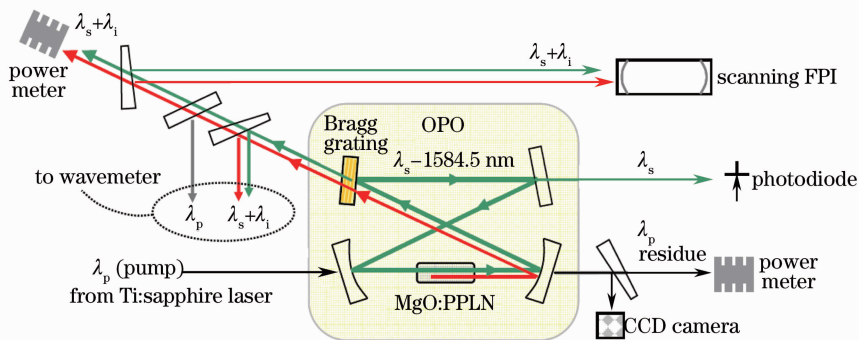


图 6 布拉格体光栅 OPO 实验装置图^[10]

Fig. 6 Experimental setup of the OPO based on a Bragg volume grating^[10]

2.4 限制抽运阈值比

早在1969年, Kreuzer认为若抽运源为单频光, 则OPO效率 η 完全由抽运阈值比 R_1 决定^[11]。如图7所示, 效率 η 开始随 R_1 增加而迅速增大, 在 $R_1=2.5$ 时, 可以达到最大值100%。随后 η 随着 R_1 的增加而逐渐减小。在 $R_1=4.6$ 时, 效率减小为80%, 此时闲频光的输出功率最大, 且为单频光。但是当抽运光超过阈值的4.6倍, 闲频光便开始多纵模运转^[12]。

因此, 对于一个确定功率抽运源, 为了获得单频闲频光最大功率输出, 可以使振荡阈值调整到一个优化值(阈值并不都是越小越好), 例如选择合适的输出耦合镜、调整晶体的长度或者选择恰当的非线性系数。Sowade等^[13]将晶体长度减小一半, 在同样的抽运功率下, 可以使单频闲频光的输出功率增加2倍。

但是一般情况下抽运阈值比达不到理论值4.6, 在高功率激光抽运下, OPO很少可以单频运转^[14]。

2.5 利用热效应

对于OPO, 其谐振腔中非线性晶体由于吸收部分参量光会在内部产生温度梯度分布, 从而出现热透镜、热致相位失配、热致双折射、热自锁、热致双稳态和热致光波导等多种热效应^[15~18]。热透镜、热致相位失配和热致双折射对于OPO系统是不利的, 会影响OPO的参量增益、输出光的稳定性和光束质量, 不利于OPO单频运转^[16]。

但有时热自锁效应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, 提高系统的转换效率, 同时可以有效地消除纵向温度梯度, 降低热致相位失配^[17,18]。热自锁效应可以明显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, 不采用标准具就有可能实现谐振光的单频输出^[17]。

Vainio等^[17]采用线宽仅70 kHz(2.6×10^{-7} nm)的1064 nm光纤激光器作为抽运源, 通过精确控制温度和利用热自锁效应, 获得了单频激光输出。抽运源的调谐范围为140 GHz(0.53 nm), 信号光保持固定不变, 通过改变抽运光波长和晶体的温度来实现单频闲频光的调谐。

Lin等^[18]采用线宽265 GHz(1 nm)的1064 nm光纤激光器作为抽运源, 采用独特的闲频光单谐振结构, 通过利用热致光波导获得了闲频光单频输出。闲频光线宽仅为5 MHz(1.7×10^{-4} nm), 通过改变晶体温度, 可以实现中红外3215~3245 nm的调谐。由于抽运光带宽较宽, 非谐振的信号光为多纵模运转。

3 结束语

总之, 种子注入可以提高系统的整体性能, 降低阈值提高效率, 但是结构复杂, 需要精确地控制谐振腔; 而采用光栅和标准具会增加阈值、降低效率, 但是结构简单, 利用OPO本身的属性, 需要精确控制温度和设计谐振腔。要根据不同的应用, 选择不同的方法实现单频调谐。

我国在单频OPO的研究水平上与国外还存在较大差距, 需要做出更大的努力, 缩小差距, 实现我国单频激光的快速发展。

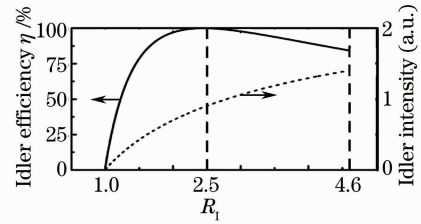


图7 根据Kreuzer理论计算的转换效率、闲频光的输出功率与抽运阈值比 R_1 的关系^[12]

Fig. 7 Calculated conversion efficiency and predicted idler intensity versus R_1 based on Kreuzer's theory^[12]

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Lin Hongyi, Tan Huiming, Cui Tiecheng *et al.*. Watt-level, mid-infrared, wide-tunable optical parametric oscillator[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(2): 196~199
林洪沂, 檀慧明, 崔铁成等. W级中红外宽调谐光学参量振荡器的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(2): 196~199

- 3 Wei Lei, Xiao Lei, Han Qian *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702006
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): 0702006
- 4 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
- 5 Yabai He, Brian 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
- 6 Philip Schlup, Stuart D. Butterworth, Iain T. McKinnie. Efficient single-frequency pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. *Opt. Comm.*, 1998, **154**(4): 191~195
- 7 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
- 8 Philip Schlup, Glenn W. Baxter, Iain T. McKinnie. Single-mode near- and mid-infrared periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. *Opt. Comm.*, 2000, **176**(1-3): 267~271
- 9 Markku Vainio, Mikael Siltanen, Jari Peltola *et al.*. Continuous-wave optical parametric oscillator tuned by a diffraction grating[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7702~7707
- 10 Markku Vainio, Cécile Ozanam, Ville Ulvila *et al.*. Tuning and stability of a singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator close to degeneracy[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(23): 22515~22527
- 11 L. B. Kreuzer. Single mode oscillation of a pulsed singly resonant optical parametric oscillation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**(8): 263~265
- 12 I. Breunig, D. Haertle, K. Buse. Continuous-wave optical parametric oscillators: recent developments and prospects[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **105**(1): 99~111
- 13 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
- 14 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
- 15 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
- 16 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. 中红外连续波单谱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
- 17 Markku Vainio, Jari Peltola, Stefan Persijn *et al.*. Singly resonant CW OPO with simple wavelength tuning[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11141~11146
- 18 Shoutai Lin, Yenyin Lin, T. D. Wang *et al.*. Thermal waveguide OPO[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1323~1329