

高稳定紧凑型内腔连续光参量振荡器

李宇昕, 李世凤, 居盼盼, 赵刚, 吕新杰, 秦亦强

(南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了改善内腔连续光参量振荡器(IC-OPO)输出功率不稳定, 弛豫振荡严重等问题, 对 IC-OPO 进行了改进: (1) 采用热透镜补偿设计, 改善模式匹配; (2) 使用光阑限模, 抑制高阶模振荡; (3) 在腔内加入 KTP 晶体, 利用二次谐波产生(SHG)过程的非线性损耗抑制弛豫振荡。通过改进, 获得了稳定的紧凑型 2.2~4.2 μm 的可调谐连续波中红外光源。输出功率波动标准偏差(RMS) 0.52%, 峰值波动范围 1.8%, 光束质量因子 $M^2=1.72$, 弛豫振荡得到有效抑制。当腔内不加入 KTP 晶体时, 阈值(808 nm)仅为 1.5 W。据笔者所知, 该阈值为国内相关工作报道中的最低值。

关键词: 光参量振荡器; 内腔; 连续波; 弛豫振荡抑制

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0406004

Highly stable compact intra-cavity continuous-wave optical parametric oscillator

Li Yuxin, Li Shifeng, Ju Panpan, Zhao Gang, Lv Xinjie, Qin Yiqiang

(College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210000, China)

Abstract: An Intra-cavity Continuous-Wave Optical Parametric Oscillator (IC-OPO) was developed in order to resolve problems inherent in IC-OPO such as instability of output power, long-lived bursts of relaxation-oscillations, etc. First, compensative design of thermal lens effect was devised to improve pattern matching. Second, an aperture slot was used to suppress the oscillations of high-order transverse mode. Finally, by placing a KTP crystal in the cavity for the purpose of SHG, the relaxation oscillation was suppressed by nonlinear loss. After these improvements, the compact tunable infrared to mid-infrared (2.2–4.2 μm) continuous source with high-stability was obtained. The amplitude stability of output power is 0.52% (RMS) and peak-to-peak amplitude stability is less than $\pm 1.8\%$. The beam quality M^2 is 1.72. Especially, a series of observations show that the relaxation-oscillation is suppressed effectively. Without KTP crystal, the threshold (808 nm) is as low as 1.5 W.

Key words: OPO; intra-cavity; continuous-wave; relaxation-oscillation suppression

收稿日期: 2016-08-14; 修订日期: 2016-09-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030127); 港澳台科技合作专项(S2014GAT015)

作者简介: 李宇昕(1991-), 男, 硕士生, 主要从事全固态光参量振荡器工程化方面的研究。Email: liyuxin@nju.edu.cn

导师简介: 吕新杰(1979-), 男, 硕士生导师, 博士, 主要从事非线性频率变换方面的研究。Email: lvxinjie@nju.edu.cn

0 引言

3~5 μm 波段连续波中红外激光在激光通信、光谱分析、气体探测、激光遥感领域有重要应用价值^[1-6]。产生连续波中红外激光的方法有很多,目前主要有半导体量子级联激光器,离子掺杂光纤激光器,基于非线性光学晶体变频的光参量振荡器(OPO)等。其中,内腔式结构的连续波光参量振荡器产生中红外激光具有结构紧凑,阈值低,输出功率高,波长调谐范围广等优点,近年来得到了国内研究者的关注^[7]。

2008 年,天津大学姚建铨教授课题组在国内首次实现了采用周期极化铌酸锂(PPLN)的连续波内腔单共振振荡器(SRO),获得了 155 mW 的 3.86 μm 输出,稳定性为 $\pm 8\%$ ^[8]。2011 年,林洪沂等使用线性内腔 PPLN-OPO 获得了 370 mW 的中红外和 540 mW 的近红外输出^[9]。2013 年,苏辉等报道了 V 型腔结构的内腔连续波光参量振荡器,实现了闲频光 2.3~3.7 μm 可调谐输出,功率稳定性(RMS)5%^[10]。2015 年,于永吉等同样采用 V 型腔结构,设计了端面泵浦的 1.57 μm /3.84 μm 双波长内腔连续光参量振荡器,中红外输出 RMS=3%^[11]。IC-OPO 虽然由于采用了腔内泵浦结构使阈值降低、结构紧凑,但是由于 OPO 腔在激光腔内部产生延迟反馈,造成了严重的弛豫振荡^[12-13]进而使稳定性变差,影响了 IC-OPO 的实际使用价值。

IC-OPO 输出不稳主要有两个原因:首先,为了获得及较高的腔内功率,高效的实现参量过程,IC-OPO 的基波光谐振腔 Q 值通常很高。一般前后腔镜都对基波光镀有高反膜,同时为了降低基波光损耗,腔内光学元件都镀增透膜处理。这使得腔中基波光损耗极低,很易出现高阶横模振荡。这些高阶横模,降低了 OPO 的转换效率,损害了 OPO 过程的产生的参量光的光束质量,更严重的是,在 IOPO 长时间工作过程中,因微小的外界扰动(温度、湿度的微小变化,机械振动等),基波光的横模在这些高阶模之间跳模,造成了参量光输出功率的剧烈波动。另一方面,由于激光工作介质的上能级粒子寿命短于腔内基波光光子寿命,加之腔内的能量在激光晶体,基波光,信号光之间流动,IC-OPO 中的弛豫振荡无法在短时间内被有效抑制。2010 年,David J.M. Stothard

等提出,通过在 IC-OPO 腔内加入倍频晶体,利用 SHG 过程的非线性损耗可以有效抑制弛豫振荡^[13]。

文中采用热透镜补偿设计了直线型的 IC-OPO,利用小孔光阑限进行横模选择,采用腔内插入倍频晶体方法对抑制了弛豫振荡。获得了低阈值、高稳定紧凑型的内腔连续波中红外激光器。

1 实验装置

实验采用单共振线型腔,结构如图 1 所示。最左端是 Coherent 公司生产的 808 nm 半导体激光器,由芯径 800 μm 的光纤耦合输出。光泵浦光通过耦合透镜组,聚焦到激光晶体前端面。激光晶体采用掺杂浓度为 0.3% 的 a 轴切割的 Nd:YVO₄,尺寸 4 mm×4 mm×6 mm,前端面镀有 808 nm 的增透膜和 1 064 nm 的高反膜,后端面镀有 1 064 nm 的增透膜。激光晶体放置在紫铜热沉中,通水冷却,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$ 。晶体后放置大小位置精确可调的孔状光阑,用来限制基波光横模模式。图中 Lens 为腔内透镜,焦距 100 mm,双面镀有 1 064 nm 增透膜,用来调整腔内基波光(1 064 nm)在非线性晶体处光束半径大小,从而提高转换效率以及降低阈值。M1 为平面镜,双面镀有 1 064 nm 高透膜(透过率>97.5%),右侧镀有 1.3~2.0 μm 高反膜(透过率<0.5%)。为了减少腔镜对输出中红外激光的吸收损耗,选用 CaF₂ 平凹透镜作为 OPO 谐振腔和基波光谐振腔的后腔镜(M2),曲率半径 100 mm,左侧镀有 1 064 nm 高反膜(透过率<0.1%),1.3~2.0 μm 高反膜(透过率<0.5%),双面镀有 2.1~5 μm 高透膜(透过率>90%)。

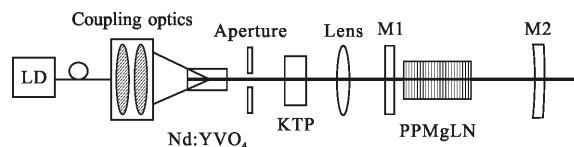


图 1 单共振线型腔 IC-OPO 结构示意图

Fig.1 Configuration of linear singly resonant IC-OPO

实验中采用自行研制的周期极化掺镁铌酸锂(PPMgLN, 掺杂浓度 4.6%) 作为 OPO 非线性晶体。这是因为 PPLMgN 晶体有极大的二阶非线性系数 25.2 pm/V(1 064 nm),透射光谱范围宽 0.33~5.5 μm ,以及非常高的抗损伤阈值。实验中使用了两块 PPMgLN 晶体,一块极化周期为 31 μm ,尺寸 1 mm×

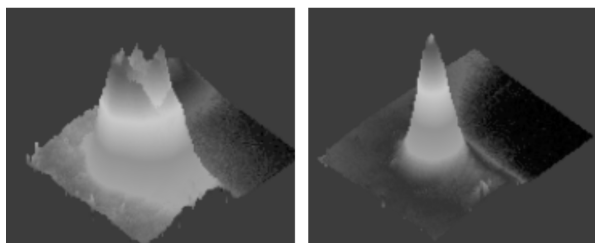
5 mm×40 mm;另一块为多周期晶体,共有 8 个通道,周期分别为 31.52、30.81、30.19、29.66、29.16、28.7、28.29、27.9 μm,尺寸为 1 mm×20 mm×40 mm。晶体放置于控温炉中调节温度,控温炉温度调节范围 40~200 °C,控制精度高于±0.1 °C。

为了抑制 IC-OPO 中的弛豫振荡,在 OPO 前腔镜 M1 前加入 KTP 晶体。KTP 晶体双面镀有 1064 nm 增透膜,切割角度 $\theta=90^\circ$, $\Phi=23.5^\circ$,尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,同样置于紫铜热沉中,使用温控水箱通水控温,控制精度约±0.1 °C。

考虑到热透镜效应对谐振腔内的光束传播的影响,光学谐振腔采用了热透镜补偿设计:首先使用“非稳腔法”测量了激光晶体在不同泵浦条件下的热透镜焦距;然后根据测量结果,使用 ABCD 矩阵法对腔内光束传播情况经数值模拟;最后参照模拟结果,精确搭建了光学系统。该装置结构简单紧凑,全长仅 20 cm 左右。

2 实验结果与分析

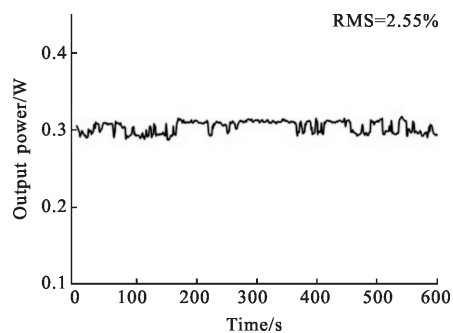
使用极化周期 31 μm 的 PPMgLN 晶体,温度控制在 40 °C。当 LD 泵浦功率为 8 W 时,精确调整光阑位置和孔径大小,使用 CCD 相机观察输出基波光(1064 nm)能量分布,如图 2 所示。由结果可知,基波光的横模模式得到了有效改善,高阶模振荡得到抑制。随着基波光横模的改善,IC-OPO 参量光输出功率的稳定得到很大提升,10 min 内功率波动 RMS 约 0.5%,峰值波动范围 1.8%(见图 3)。用狭缝法测量闲频光的光束质量,结果如图 4 所示。经过计算,输出光束的 M^2 为 1.72,光束质量良好。这主要是因为基波光接近基模,与参量光有良好的模式匹配。



(a) 无光阑 (a) No aperture (b) 加入光阑限模 (b) Aperture enabled

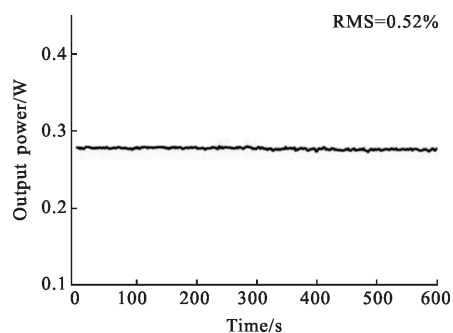
图 2 基波光 3D 能量分布图

Fig.2 Three-dimensional energy distribution of fundamental light



(a) 无光阑

(a) No aperture



(b) 加入光阑限模

(b) Aperture enabled

图 3 10 min 内 3.17 μm 闲频光功率稳定性测量

Fig.3 Stability measurement of 3.17 μm idler output power over 10 min

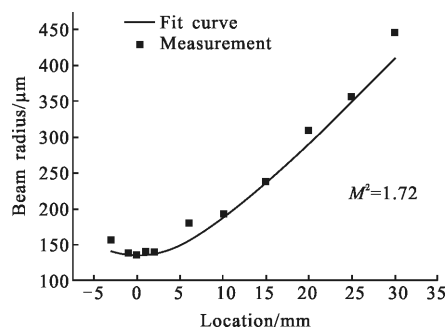


图 4 狭缝法测量 3.17 μm 闲频光光束质量($M^2=7.12$)

Fig.4 Beam quality measurements of 3.17 μm idler by slit method ($M^2=7.12$)

在上述实验条件下,研究闲频光输出功率与 LD 泵浦功率的关系(图 5)。由图中黑色曲线可知,当腔内不加入 KTP 时,阈值仅为 1.5 W (808 nm),为国内相关工作报道中的最低值,表明基波光在非线性晶体处模式匹配良好,有很高的功率密度。LD 泵浦功率为 10 W 时效率达到最大值 4.7%,12 W 时可获得最高输出 0.55 W,与设计预期相符,表明

谐振腔结构设计良好,光路搭建精确。应当指出的是,因为实验条件所限,OPO 前腔镜 M1 没有镀 2.1~5 μm 闲频光高反膜层,因此实际获得的闲频光功率约为测量数值的两倍,泵浦光到闲频光的转换效率实际可达 9%。

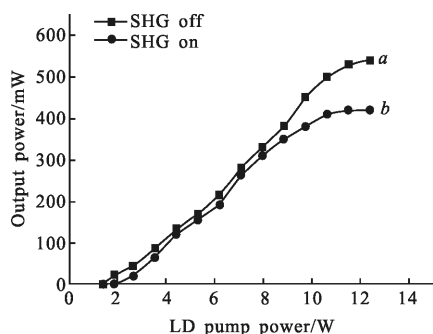


图 5 3.17 μm 闲频光输出功率随 LD 泵浦功率的变化

Fig.5 3.17 μm idler output power versus LD pump power

通过使用高速光电探测器 (THORLABS, PDA10CS-EC)对基波光功率波动进行测量,观察了 IC-OPO 中的弛豫振荡。由图 6(a)可见,当外界环境发生无法避免的微小扰动时,IC-OPO 出现难以抑制的、剧烈的弛豫振荡,进而可能造成长期稳定性的降低。为了解决这一问题,在谐振腔中插入控温的 KTP 晶体。由图 6(b)、(c)可知,加入 KTP 晶体后,系统稳定性得到了很大的提升,即使系统受到比较强烈的扰动 (例如轻轻敲击光路),也能迅速恢复稳定状态。为了进一步观察 SHG 对弛豫振荡的抑制作用,使用斩波器以 685 Hz 的频率对腔内基波光经行高速斩波,如图 6(d)、(e)所示。由结果可知,加入 KTP 晶体后,SHG 过程带来的非线性损耗确实有效的抑制了系统的弛豫振荡,弛豫振荡结束时间(T_{stop})从 200 μs 以上下降到 40 μs 以内。对加入 KTP 晶体后闲频光的输出功率进行测量,实验结果为如图 5 中曲线 b 所示——加入 KTP 对腔内基波光有一定损耗,起振阈值增加到 2.6 W。用于抑制弛豫振荡的 SHG 过程对基波光的非线性损耗很小 (约 0.1%~0.5%),造成阈值升高及效率下降的主要原因是:KTP 晶体的 SHG 过程为二类相位匹配,谐振腔中基波光通过 KTP 后,偏振方向发生改变,起到了相位延迟片的作用。对于偏振方向平行于 Nd:YVO₄ 晶体 c 轴方向的基波光,可以在 PPMgLN 晶体中有效的实现参量转换过程;对于偏振方向垂直于 Nd:YVO₄

晶体 c 轴方向的基波光,由于该方向 PPMgLN 有效非线性系数小,难以有效地实现参量转换过程。通过选择 KTP 晶体长度和进行适当的温度控制 (该实验中采用 5 mm 长 KTP 晶体,控温在 20 °C),可以调节基波光的相位延迟量,使基波光平行于 c 轴的偏振分量最大化,从而将损耗控制在可接受的范围内^[14]。该温度下前文所述切割角度的 KTP 晶体满足 SHG 相位匹配条件。该实验中选用 KTP 作为倍频晶体,而不选择 LBO, BBO 等不会产生偏振损耗的一类相位匹配倍频晶体,是因为:(1) KTP 非线性系数大,较短的长度就可以获得较好的抑制弛豫振荡的效果;(2) 相位匹配温度低,可在较宽的范围内实现匹配;(3) 价格便宜,化学性质稳定,不易潮解。这些优势使 KTP 晶体更适合用于工程化、实用化的 IC-OPO 激光器。

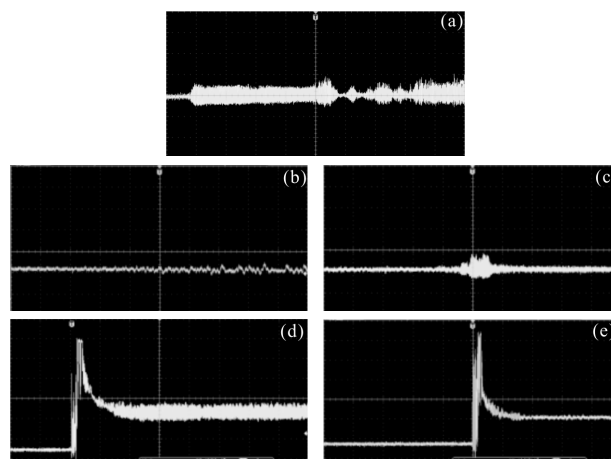


图 6 (a)SHG off, 弛豫振荡剧烈且难以抑制;(b)SHG on, 弛豫振荡得到抑制;(c)SHG on, 外界扰动后,系统快恢复稳态;(d)SHG off, 弛豫振荡结束时间远大于 200 μs;(e)SHG on, 结束时间小于 40 μs

Fig.6 (a) SHG off, spontaneous and long-lived bursts of relaxation oscillations occurred;(b) SHG on, relaxation oscillations were suppressed;(c) SHG on, after a disturbance system regained a steady state quickly;(d) SHG off, $T_{stop} \gg 200 \mu s$;(e) SHG on, $T_{stop} < 40 \mu s$

为了拓展波长调谐范围,实验中还使用了另一块多通道 PPMgLN 晶体,通过改变通道和调节温度,实现了信号光 1.4~2.0 μm,闲频光 2.2~4.2 μm 连续调谐,其中部分通道的温度调谐曲线(60~160 °C)如图 7 所示。将图 7 中结果与根据 Sellmeier 方程和准相位匹配条件的理论计算值比较,发现测量值与理

论值存在 40~60 °C 的偏差。这是因为：一方面，在 IC-OPO 工作过程中，PPMgLN 晶体被加热膨胀，极化周期变长；另一方，非线性晶体在工作过程中温场成阶梯分布，控温炉测温探头处温度和晶体通光中心温度有一定差异。

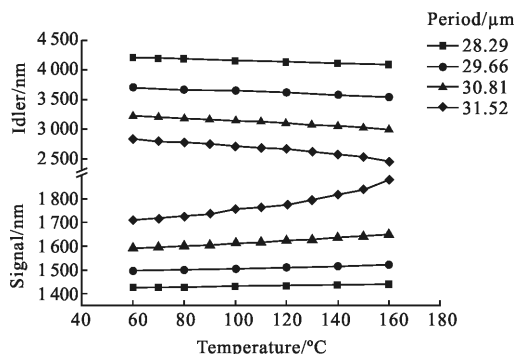


图 7 多通道 PPMgLN 晶体波长温度调谐曲线

Fig.7 Temperature-tuning curves of OPO at different grating periods of PPMgLN

使用高分辨率成像光谱仪对 IC-OPO 参量光谱进行测量，以 1 602 nm 信号光为例，光谱线宽 0.5 nm，在实验中光谱始终保持较好的稳定性，除参量光外没有其他波峰产生，表明输出的激光具有较好的单色性。

3 结论

文中对改善 IC-OPO 输出性能进行了研究与探讨，采用谐振腔热透镜补偿设计、横模选择和加入倍频晶体等方法，改善腔内模式匹配，抑制基波光高阶模振荡，并且利用 SHG 过程的非线性损耗抑制弛豫振荡，有效地提升了 IC-OPO 系统的稳定性。

通过改进，获得了光束质量因子 $M^2=1.72$ ，功率波动标准偏差 0.52%，波长连续可调的单共振连续波内腔光参量振荡器(IC-OPO)。弛豫振荡结束时间被抑制到小于 40 μs，泵浦光到闲频光的转换效率可达 9%，泵浦光(808 nm)阈值仅为瓦级。使用周期分别为 31.52、30.81、30.19、29.66、29.16、28.7、28.29、27.9 μm 多通道的 PPMgLN 作为非线性晶体，闲频光调谐范围达到 2.2~4.2 μm，线宽小于 0.5 nm，有较好单色性。实验装置采用直腔结构，简单紧凑，能耗低，全长 20 cm 左右(不包括泵浦源)，可作为小型便携式的连续波中红外光源，具有一定实用价值。

参考文献：

- [1] Cong Rijin, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong, et al. Long wave infrared transmission in atmospheric channel[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 927-932. (in Chinese)
丛日进, 汪井源, 徐智勇, 等. 长波长红外光大气信道传输[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 927-932.
- [2] Tan Yuting, Li Jiakun, Jin Weiqi, et al. Model analysis of the sensitivity of single-point sensor and IRFPA detectors used in gas leakage detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2489-2495. (in Chinese)
谭雨婷, 李家琨, 金伟其, 等. 气体泄漏的单点探测器与红外成像检测的灵敏度模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2489-2495.
- [3] Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, Lv Jinguang, et al. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 277-298. (in Chinese)
梁静秋, 梁中翥, 吕金光, 等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 277-298.
- [4] Bi Yanmeng, Wang Qian, Yang Zhongzhi, et al. Advances on space-based hyper spectral remote sensing for atmospheric CO₂ in near infrared band[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 725-735. (in Chinese)
毕研盟, 王倩, 杨忠志, 等. 星载近红外高光谱 CO₂ 遥感进展[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 725-735.
- [5] Li Xiangxian, Xu Liang, Gao Minguang, et al. Fourier transform infrared greenhouse analyzer for gases and carbon isotope ratio[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2359-2368. (in Chinese)
李相贤, 徐亮, 高闽光, 等. 分析温室气体及 CO₂ 同位素比值的傅里叶变换红外光谱仪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2359-2368.
- [6] Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, et al. Dual-order overlapped Offner imaging spectrometer in middle- and long-wave infrared regions[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 965-974. (in Chinese)
张浩, 方伟, 叶新, 等. 中/长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 965-974.
- [7] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512. (in Chinese)
谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.

- [8] Ding Xin, Zhang Shaomin, Yao Jianquan, et al. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(1): 211–216.
- [9] Lin Hongyi, Xu Yingchao, Huang Xiaohua. Low threshold mid-infrared intracavity optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1098–1100. (in Chinese)
林洪沂, 许英朝, 黄晓桦. 内腔中红外低阈值 PPMgLN 光学参量振荡器[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1098–1100.
- [10] 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): 1404–1409. (in Chinese)
苏辉, 李志平, 段延敏, 等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1404–1409.
- [11] Yu Yongji, Chen Xinyu, Cheng Libo, et al. Continuous-wave 1.57 μm /3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224215. (in Chinese)
于永吉, 陈薪羽, 成丽波, 等. 基于 MgO:APLN 的 1.57 μm /3.84 μm 连续波内腔多参量振荡器研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(22): 224215.
- [12] Turnbull G A, Stothard D J M, Ebrahimzadeh M, et al. Transient dynamics of CW intracavity singly resonant optical parametric oscillators [J]. *Quantum Electron*, 1999, 35(11): 1336–1338.
- [13] Stothard D J M, Dunn M H. Relaxation oscillation suppression in continuous-wave intracavity optical parametric oscillators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1336–1348.
- [14] Sasaki T, Kojima T, Yokotani A, et al. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(21): 1665–1667.