

光参量振荡器和光参量放大器实现窄谱宽中 红外激光输出

赵志刚 沈利沅 姜洪波 刘斌 项震 刘崇

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 高增益和抽运光谱宽等因素会使光参量振荡器输出的参量光谱线大幅展宽。通常在腔内插入标准具、光栅等元件以控制谱宽, 但会引入损耗, 导致激光器输出阈值增大, 转换效率和输出功率降低。报道了一种不使用任何谱宽压缩元件获得窄谱宽高功率中红外激光输出的方案。该方案将窄谱宽和高功率分离, 分别获取。搭建了 $1.064\ \mu\text{m}$ Nd:YAG 主振荡功率放大结构的窄谱宽抽运源。通过调节光参量振荡器中 PPMgLN 晶体内的抽运光功率和光斑直径, 实现晶体内增益强度的控制, 从而有效控制中红外激光谱宽。在光参量振荡器中, 当抽运光功率约为 3 倍阈值时, 获得了 $0.7\ \text{W}$ 、谱宽小于 $1.12\ \text{nm}$ 的 $2.9\ \mu\text{m}$ 种子光, 再通过两级光参量放大器后, 最终获得 $6.27\ \text{W}$ 、光光转换效率 15.7% 的 $2.9\ \mu\text{m}$ 激光输出, 谱宽基本保持不变。

关键词 激光器; 中红外激光; 光参量振荡器; 光参量放大器; 窄谱宽

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1001008

Output of Mid-Infrared Laser with Narrow Spectral Width in Implementation of Optical Parametric Oscillator and Oscillator Power Amplifier

Zhao Zhigang Shen Lifeng Jiang Hongbo Liu Bin Xiang Zhen Liu Chong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Factors such as high gain and spectral width of pump laser will significantly broaden the output parametric spectra of optical parametric oscillators (OPO). Etalons, gratings and other components are usually used to control the spectral width, however, loss will be imported, and thus the output threshold of lasers will increase and the conversion efficiency and the output power will decrease. A scheme for obtaining mid-infrared laser with narrow spectral width and high power is reported, in which the spectral width compression components are not used. The proposed scheme obtains narrow spectral width and high power respectively. A narrow-spectral-width pump source with a $1.064\ \mu\text{m}$ Nd:YAG main oscillator power amplifier (OPA) structure is built. By adjusting the power and the diameter of the pump light spot in PPMgLN crystal of the optical parametric oscillator, we can control the gain intensity in the crystal and the spectral width of mid-infrared laser. In the optical parametric oscillator, when the pump power is about three times of the threshold, $0.7\ \text{W}$, $2.9\ \mu\text{m}$ seed laser with spectral width less than $1.12\ \text{nm}$ is obtained. The seed light is amplified through two optical parametric amplifiers, and $6.27\ \text{W}$, $2.9\ \mu\text{m}$ laser output is finally obtained, when the light conversion efficiency is 15.7% and the spectral width remains unchanged.

Key words lasers; mid-infrared laser; optical parametric oscillator; optical parametric amplifier; narrow spectral width

OCIS codes 140.3460; 190.4970; 190.4410

收稿日期: 2016-04-21; 收到修改稿日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61575172)、浙江省自然科学基金(LZ15F050001)、中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室开放基金(2014HEL04)、中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 赵志刚(1984—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: 18537960296@163.com

导师简介: 刘崇(1978—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: chongliu78@hotmail.com(通信联系人)

1 引 言

3~5 μm 波段的窄谱宽高功率激光源在医疗、遥感、分子检测和军事对抗等领域有着广泛应用,一直是研究热点^[1-2]。光参量振荡器(OPO)具有输出功率高、调谐范围宽、光束质量好等独特优势,是目前获得中红外激光的常用方式^[3]。根据抽运激光的工作方式,窄谱宽 OPO 可以分为以下几种类型:1)连续波 OPO,即利用连续单频激光源抽运 OPO,可获得窄谱宽高功率连续激光输出^[4];2)低重复频率脉冲抽运 OPO,通过单频脉冲抽运同时利用单频种子光注入锁定 OPO,可获得窄脉宽高功率的单频脉冲参量激光输出^[5];3)高重复频率高功率脉冲抽运 OPO,使用窄谱宽的纳秒脉冲 OPO,并通过 OPO 内部选频器件压缩谱宽,实现窄谱宽参量激光输出^[6-17]。

在高功率脉冲抽运 OPO 中,为了压缩谱宽,相继引入多种技术。在 OPO 腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具是最简单有效的方法之一,但由于引入了插入损耗,阈值增大,转换效率和输出功率明显降低。并且当增益光谱范围大于标准具的自由光谱范围时,将出现多模振荡^[6-8]。与此同时,光栅也被用于谱宽控制。起初用于实验研究的是闪耀光栅,由于中红外光栅难以实现高密度刻蚀,OPO 腔内光斑通常很小,光谱分辨率受到极大限制,效果并不理想^[9-11],后来闪耀光栅被结构简单紧凑、损耗较小的体布拉格光栅(VBG)取代。VBG 技术比标准具技术转换效率高,但衍射损耗仍然会对输出功率产生很大影响,并且造价昂贵。此外,现阶段技术成熟的 VBG 是以光致热折变(PTR)玻璃为基质的,透射波段为 400~2700 nm,波长更长的中红外波段不再适用^[12-15]。还有电光偏振模式转换器法,反应时间短,没有增加系统损耗和光路复杂性,很有发展潜力,只是由于技术原因,目前还处于研究完善阶段^[16-17]。

本文针对高重复频率高功率脉冲抽运 OPO,通过分析影响参量激光谱宽的各种因素,研究了一种结合 OPO 和光参量放大器(OPA)获得窄谱宽高功率参量激光输出的方法。设计了一种不使用任何谱宽压缩元件的方案,获得了窄谱宽高功率 2.9 μm 激光输出。理论分析表明,造成参量光谱线展宽的主要原因是腔内高增益。针对这个问题,搭建了窄谱宽的抽运源,并调节 OPO 中通过晶体的抽运光功率和光斑大小,有效控制腔内增益强度,获得了窄谱宽的种子光。再经过两级功率放大,最终实现平均功率 6.27 W(文中激光输出功率均指平均功率)、光光转换效率 15.7%、波长 2.9 μm 激光输出,并且谱宽基本保持不变,解决了窄谱宽和高功率在中红外激光器中难以兼得的问题。

2 理论分析

理想状态下,OPO 输出的参量光谱宽等于参量自发辐射谱宽,但由于高增益,抽运光谱宽、发散角和偏轴参量放大等因素的影响,OPO 实际输出的参量光谱宽远大于自发辐射谱宽。李港^[18]的研究证明,参量光谱宽的展宽量和抽运光谱宽成正比。抽运光的谱宽越窄,对参量光谱宽带来的影响越小,因此在实验中选择谱宽尽量窄的抽运源,才会达到最佳的输出效果。在抽运光的发散角范围内,晶体内不同光线的波矢方向不同,引起了相位匹配角的变化,进而造成满足相位匹配条件的参量光波长发生改变,使得输出参量光谱被展宽。但对基于准相位匹配(QPM)技术的 PPMgLN-OPO 而言,相位匹配角 $\theta_p = 90^\circ$,抽运光发散角对参量光谱宽产生的影响可以忽略^[18]。参量光从噪声中起振,除轴向以外,傍轴附近的参量噪声在抽运光的范围内也会被放大,形成参量光输出,造成光谱展宽。研究表明,偏轴参量放大导致的展宽量约为 10^{-4} nm 量级^[19],可忽略不计。

低增益时,在相位失配量 $\Delta k \neq 0$ 处参量光一般不会起振或者输出激光十分微弱。但随着抽运功率的增加, $\Delta k \neq 0$ 处也会因高增益而产生参量光,从而引起谱线展宽。高增益下相位失配引起的谱宽展宽量为^[18]

$$\Delta\omega = \left| \frac{d\omega}{dk} \right| |\Delta k| = \frac{|\Delta k|}{2\pi(n_s - n_i)}, \quad (1)$$

$$\Delta k = 2\sqrt{g \ln 2/l}, \quad (2)$$

式中 ω 为波数, k 为波矢, g 为增益系数, l 为晶体长度, n_s 和 n_i 分别为信号光和闲频光的有效折射率。由(2)式可知,OPO 腔内抽运光越强,增益系数 g 越大,相位失配量 Δk 也越大,相应的参量光谱宽也就越宽。如第 4 节分析所示,当取典型值 $2gl = 30$,晶体长度 $l = 50$ mm 时,闲频光的展宽量达 5 nm。由此可知,腔内高

增益对 OPO 输出参量光谱宽的影响非常大。

上述分析表明,抽运光发散角和偏轴参量放大对基于 QPM 技术的 PPMgLN-OPO 输出的参量光谱线造成的展宽都可以忽略不计。选择谱宽尽量窄的优质抽运源,可将抽运光谱宽引起的展宽量降至最低。在这种情况下,影响中红外激光谱宽最主要的因素就是腔内高增益。因此,实验中可以通过调整 OPO 腔内抽运功率和光斑直径大小,有效控制增益强度,得到窄谱宽小功率的种子光输出。再利用 OPA 提升功率,即可实现窄谱宽高功率中红外激光输出。

3 实验装置

根据上述理论分析搭建实验装置,如图 1 所示。首先设计 Nd:YAG 主振荡功率放大(MOPA)结构的 1.064 μm 线偏激光抽运源。在重复频率为 10 kHz 时,输出功率为 71 W,脉冲宽度为 80 ns,谱宽约为 0.05 nm,光束质量因子(M^2)小于 1.5。输出的 1.064 μm 激光经过两次分束,分别作为 OPO 和两级 OPA 的抽运源。

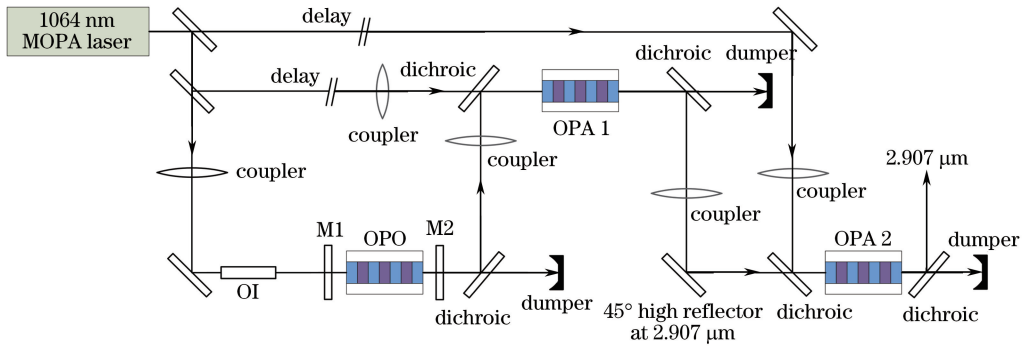


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

抽运光经第二次分束后,其中一束经耦合镜调整光斑大小,进入 OPO。OPO 采用平平腔、信号光单谐振结构。腔镜 M1 镀 1.064 μm 减反膜,1.6~1.9 μm 和 2.6~3.1 μm 高反膜,腔镜 M2 镀 1.064 μm 高反膜,2.6~3.1 μm 高透膜和 1.6~1.9 μm 镀 65% \pm 5% 的反射膜。为防止剩余抽运光返回抽运源,OPO 前使用隔离器(OD)进行隔离。参量光从 OPO 输出后,1.064 μm 和 1.679 μm 的光进入吸收池,2.907 μm 的种子光经耦合镜调整光斑大小后,和第二次分束的另一束抽运光(经过光路延迟和耦合镜调整光斑大小后)同步进入 OPA 1。经 OPA 1 放大后的 2.907 μm 种子光再次调整光斑大小,和第一次分束后的其中一束抽运光进入 OPA 2 进行二次放大。最终得到窄谱宽高功率的 2.907 μm 激光输出。

实验中使用的三块 PPMgLN 晶体和温控炉都由台湾 HCP 公司提供,晶体尺寸为 1 mm \times 1 mm \times 50 mm,MgO 掺杂浓度为 5%(物质的量分数),极化周期 $\Lambda = 31.5 \mu\text{m}$,晶体两端面对信号光、闲频光、抽运光均镀有增透膜。由于温度变化会导致晶体输出的参量光波长发生改变,为了保持晶体温度的均匀性和稳定性,提高实验精度,将晶体安装在温控炉中,调谐范围为 0~200 $^{\circ}\text{C}$,控温精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

4 实验结果分析

调整 OPO 前的耦合透镜,使通过晶体中心的抽运光斑直径分别为 0.5, 0.7, 0.9 mm。然后,抽运功率从 0.5 W 调节至 10 W,记录不同光斑直径下的 OPO 阈值和信号光谱宽[用半峰全宽(FWHM)表示]变化幅度,如表 1 所示。图 2 所示为三种光斑直径时闲频光输出功率与抽运功率的关系。

表 1 不同抽运光斑直径下的参量光输出参数

Table 1 Parameters of output laser at different pump spot diameters

Diameter /mm	0.5	0.7	0.9
Threshold /W	0.9	2	2.98
Spectral width /nm(at 1.679 μm)	0.25~0.82	0.23~0.43	>0.5

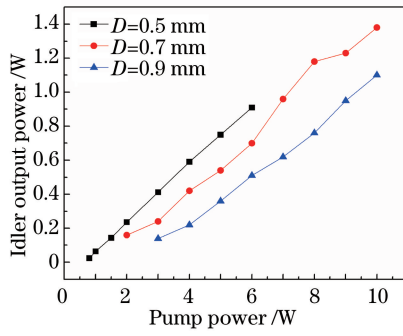


图 2 不同光斑直径时抽运功率和闲频光输出功率的关系

Fig. 2 Idler output power versus pump power at different spot diameters

通过比较可知,当抽运光斑直径为 0.5 mm 和 0.7 mm 时,在各自的阈值附近,信号光谱宽基本一致。随着抽运功率增大,光谱仪监测显示:0.5 mm 抽运光斑的信号光谱宽迅速展宽,抽运功率达到 5 W 时,信号光谱线展宽至 0.82 nm;但 0.7 mm 抽运光斑的信号光谱线展宽速度随抽运功率增大变化相对较慢。如图 3 所示,当抽运功率约为 3 倍阈值时,信号光的谱宽和抽运功率在阈值附近时的谱宽相当。抽运功率调节至 10 W 时,展宽量增大到 0.43 nm。而当光斑直径为 0.9 mm 时,阈值和谱宽比 0.5 mm 和 0.7 mm 光斑直径时要大。综合考虑图 2 所示三种不同光斑直径时的闲频光输出功率,实验最终选取抽运光斑直径为 0.7 mm。

当 OPO 中通过晶体中心的抽运光斑直径为 0.7 mm,测量抽运功率为 2, 6, 10, 14 W 时,信号光的输出谱线,如图 3(a)~(d)所示。当抽运功率在阈值附近时,信号光谱线很窄,但效率和输出功率很低。当增大抽运功率到 6 W 时,只有轴向附近的参量光会进一步被放大,谱宽基本保持不变,但是效率和输出功率不断提高。继续增大抽运功率,OPO 腔内增益变大, $\Delta k \neq 0$ 处的参量光也参与谐振,光谱仪监测显示信号光谱线出现展宽,效率和输出功率同步增大。再调节抽运功率到 14 W 时,OPO 腔内增益很高,引起输出谱线大幅展宽。同时,随着抽运功率的增大,热效应使得晶体温度发生变化,进而引起极化周期发生微小的变化,导致输出参量光中心波长产生一定的偏移。实验中,当抽运功率为 6 W 时,信号光谱宽约为 0.25 nm,近似等于计算得到的抽运光谱宽引起的谱线展宽量。

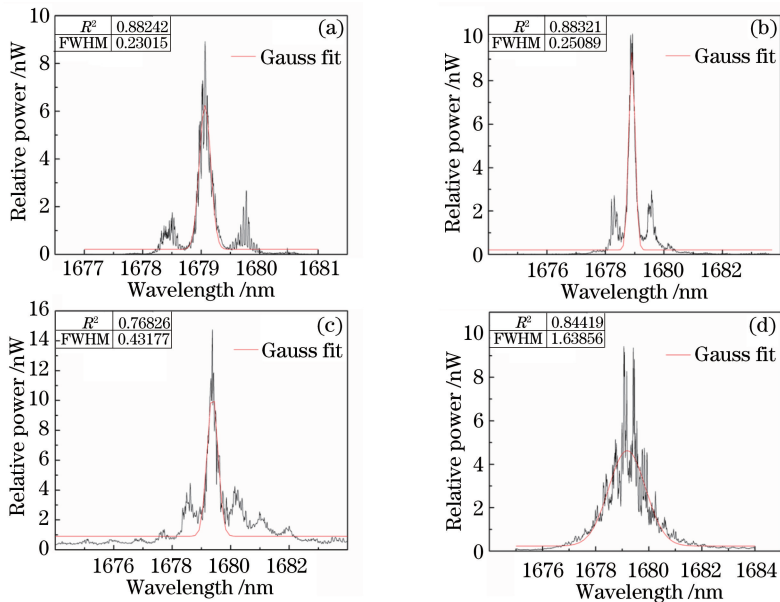


图 3 不同抽运功率下的信号光谱线。(a) 2 W; (b) 6 W; (c) 10 W; (d) 14 W

Fig. 3 Spectra of signal light at different pump powers. (a) 2 W; (b) 6 W; (c) 10 W; (d) 14 W

LiNbO_3 是负单轴晶体,当温度为 45 °C 时,由 PPMgLN 晶体的 e 光折射率赛尔迈耶尔方程^[20],计算得到 1.064 μm 抽运光、1.679 μm 信号光和 2.907 μm 闲频光的折射率分别为 2.1538、2.1326、2.0983。高增益

时取典型值 $2gl=30^{[18]}$, 晶体长度 $l=50$ mm。由(1)式和(2)式, 计算得到高增益引起的信号光和闲频光谱线展宽量分别为 1.700 nm 和 5.098 nm。

抽运光谱宽引起的参量光谱线展宽量为^[18]

$$\Delta\omega = \frac{d\omega}{dk}\Delta k = \frac{n_p - n_i}{n_s - n_i}\Delta\omega_p, \quad (3)$$

式中 $\Delta\omega_p$ 为抽运光谱宽, n_p 为抽运光折射率。实验中抽运光谱宽为 0.05 nm, 根据(3)式, 计算得到抽运光谱宽引起的信号光和闲频光谱线展宽量分别为 0.2281 nm 和 0.6837 nm。

对比实验测量值和理论计算值, 说明此时参量光的谱线展宽主要由抽运光谱宽引起。腔内增益对参量光谱宽带来的影响十分微弱, 信号光谱线得到了有效控制。同时, 由于抽运光、信号光和闲频光满足能量守恒关系($1/\lambda_p=1/\lambda_s+1/\lambda_i$, $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别为抽运光、信号光和闲频光波长), 闲频光谱宽也得到了间接控制。根据参考文献[8]的相关理论, 由信号光谱宽 0.25 nm, 抽运光谱宽 0.05 nm, 计算得到闲频光谱宽为 0.38~1.12 nm。同时由图 4(a)可知, 随着抽运功率的增大, 参量光输出功率也相应增大, 并未出现饱和。但为了获得窄谱宽的种子光, 同时兼顾转换效率和输出功率, 抽运功率选定在 6 W。最终 2.907 μm 种子光的输出功率为 0.7 W, 谱宽小于 1.12 nm, 光束质量因子 M^2 在水平和垂直方向分别为 2.17 和 2.26。

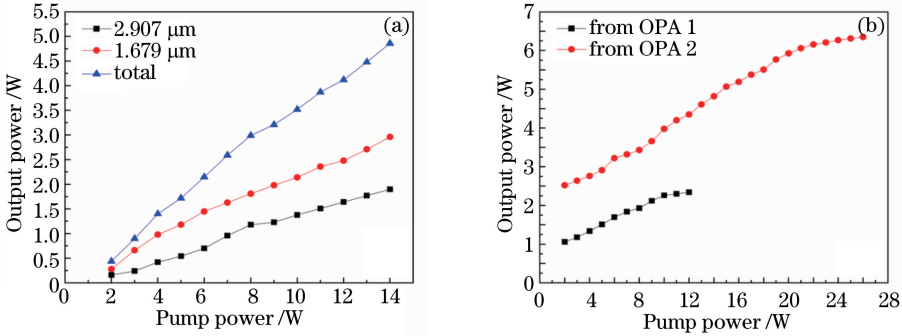


图 4 (a) OPO 和(b) OPA 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power of (a) OPO and (b) OPA versus pump power

为了提高效率, 实验对 OPA 1 的抽运光路进行了适当延迟, 使种子光和抽运光在 OPA 中时域同步, 同时调整种子光和抽运光的束腰直径均为 0.7 mm, 并且在 OPA 晶体中心处重合。当抽运功率增大到 10 W 时, 2.907 μm 激光输出功率为 2.26 W, 如图 4(b)所示, 光光转换效率为 15.6%, M^2 在水平和垂直方向分别为 2.52 和 2.48。信号光谱线基本没有发生变化, 如图 5(a)所示。在此基础上, 增加了二级 OPA 放大。为了有效利用晶体尺寸和抽运功率, 抽运光和经一级放大后的闲频光光斑大小由 OPA 1 时的 0.7 mm 调整到 0.84 mm。抽运功率调节到 24 W 时, 2.907 μm 激光功率从 OPA 1 时的 2.26 W 被放大到 6.27 W, 脉冲宽度为 64 ns, 总光光转换效率为 15.7%。光斑半径和抽运功率比 OPA 1 时更大, 因此光束质量进一步恶化, M^2 在水平和垂直方向变为 3.25 和 3.86。抽运功率和闲频光输出功率的关系曲线如图 4(b)所示。同时测量了 OPA 2 输出的信号光谱线, 如图 5(b)所示, 对比图 3(b)可知, 谱宽基本没有变化。由此推断, 2.907 μm 闲频

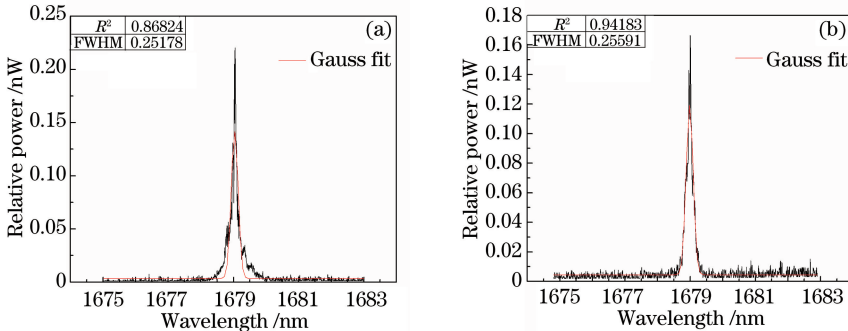


图 5 (a) OPA 1 和(b) OPA 2 输出的信号光谱线

Fig. 5 Spectra of signal light from (a) OPA 1 and (b) OPA 2

光的谱线也不会发生展宽。说明低功率下 OPA 对参量光谱线几乎没有影响,在保证窄谱宽的前提下,获得了高功率输出,证明了实验方案具备可行性。

表 2 是近年来报道的获得窄谱宽中红外激光输出的几种方法的详细信息。对比可知,本文设计的 OPO+OPA 方式获得的中红外激光输出的谱宽与采用选频器件得到的谱宽基本接近。如果两级 OPA 换为大尺寸晶体,可预测输出功率会大幅度提高。

表 2 几种获得窄谱宽中红外激光输出的方法比较

Table 2 Comparison of several methods obtaining mid-infrared laser with narrow spectral width

Author	Structure	Output power	Spectral width	M^2
Samanta <i>et al.</i> ^[7]	OPO-F-P	1.59 W (idler)	3.13×10^{-5} nm/1.159 μ m	
Peng <i>et al.</i> ^[8]	OPO-F-P	6.3 W (idler)	0.3~0.63 nm/2.98 μ m	
Lin <i>et al.</i> ^[11]	OPO-blazed grating	30 μ J (signal)	1.95 nm/1.56 μ m	
He <i>et al.</i> ^[14]	OPO-VBG	4.3 W (total)	0.55 nm/2.129 μ m	3.2 4.2 \perp
Peng <i>et al.</i> ^[15]	OPO-VBG	51.7 W (idler)	<0.7 nm/2.907 μ m	About5 about7 \perp

5 结 论

实验结果与理论分析基本吻合,证明了所提出的方案具备可行性。该方案将高功率和窄谱宽分离,分别获取。通过调整 OPO 中抽运功率和光斑大小,有效控制腔内增益强度,获得 0.7 W、谱宽小于 1.12 nm 的种子光,再用两级 OPA 提高功率,最终得到 6.27 W、光光转换效率 15.7% 的 2.907 μ m 激光输出,谱宽基本保持不变。本文方案对于几纳秒至几百纳秒量级的抽运脉冲激光,都可以获得窄谱宽中红外激光输出。对于超短脉冲抽运激光,则要考虑峰值功率过高容易造成晶体损伤。非线性晶体生长工艺和中红外镀膜技术难度很大,因此大幅提高输出功率非常困难。在此技术背景下,下一阶段工作将在 OPA 中使用 3 mm 厚度的晶体,多级 OPA 串接,以寻求窄谱宽、高输出功率的突破。

参 考 文 献

- 1 Su Ning, Zhang Mao, Ren Gang, *et al.* Progress and applications of 3~5 μ m optical parametric oscillator[J]. Optical Technique, 2013, 39(4): 359-364.
苏 宁, 张 茂, 任 钢, 等. 3~5 μ m 光学参量振荡器研究进展及其应用[J]. 光学技术, 2013, 39(4): 359-364.
- 2 Zhang Dongyan, Wang Rongrui. Progress on mid-infrared lasers[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 487-491.
张冬燕, 王戎瑞. 高功率中红外激光器的进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 487-491.
- 3 Yao Jianquan, Xu Degang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 726-759.
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 726-759.
- 4 Zhao Jiaqun. Study on mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator technique based on MgO:PPLN crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 95-97.
赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 95-97.
- 5 Hong Guanglie, Zhang Yinchao, Tan Kun, *et al.* Optical parametric oscillatorbased differential absorption lidar for detecting carbon dioxide in troposphere[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(3): 9-12.
洪光烈, 张寅超, 谭 锐, 等. 基于参量振荡探测对流层 CO₂ 的差分吸收雷达[J]. 光电工程, 2005, 32(3): 9-12.
- 6 Schlup P, Butterworth S D, McKinnie I T. Efficient single-frequency pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. Optics Communications, 1998, 154(4): 191-195.
- 7 Samanta G K, Fayaz G R, Ebrahim-Zadeh M. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2623-2625.
- 8 Peng Y F, Wei X B, Xie G, *et al.* A high-power narrow-linewidth optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Laser Physics, 2013, 23(5): 055405.
- 9 Dunn M H, Ebrahimzadeh M. Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses[J]. Science, 1999, 286(5444): 1513-1517.
- 10 Schlup P, Baxter G W, McKinnie I T. Single-mode near-and mid-infrared periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. Optics Communications, 2000, 176(1): 267-271.

- 11 Lin S T, Chiang A C, Lin Y Y, *et al.* Compact narrow-Line diode-pumped Q-switched intracavity optical parametric oscillator with a grazing-incidence grating[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2006: JThC33.
- 12 Saikawa J, Fujii M, Ishizuki H, *et al.* High-energy, narrow-bandwidth periodically poled Mg-doped LiNbO₃ optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. Optics Letters, 2007, 32(20): 2996-2998.
- 13 Jacobsson B, Pasiskevicius V, Laurell F, *et al.* Tunable narrowband optical parametric oscillator using a transversely chirped Bragg grating[J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 449-451.
- 14 He G, Guo J, Jiao Z, *et al.* High-efficiency near-degenerate PPMgLN optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. Optics Letters, 2012, 37(8): 1364-1366.
- 15 Peng Y F, Wei X B, Nie Z, *et al.* High-power, narrow-bandwidth mid-infrared PPMgLN optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 30827-30832.
- 16 Huang C Y, Lin C H, Chen Y H, *et al.* Electro-optic Ti:PPLN waveguide as efficient optical wavelength filter and polarization mode converter[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2548-2554.
- 17 Chen Y H, Chang J W, Lin C H, *et al.* Spectral narrowing and manipulation in an optical parametric oscillator using periodically poled lithium niobate electro-optic polarization-mode converters[J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2345-2347.
- 18 Li Gang. Transformation and expansion of laser frequency: Practical nonlinear optical technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 220-227.
李 港. 激光频率的变换与扩展: 实用非线性光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 220-227.
- 19 Wei Xingbin. Study on mid-infrared optical parametric oscillator technique based on PPLN crystal[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010: 15-19.
魏星斌. 中红外 PPLN 光参量振荡技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010: 15-19.
- 20 Gayer O, Sacks Z, Galun E, *et al.* Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃[J]. Applied Physics B, 2008, 91(2): 343-348.