

10 W 级中红外光学参量振荡器偏振合成技术

尚亚萍 李 霄* 王 鹏 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 开展了双光束中红外光学参量振荡器(OPO)的偏振合成实验研究,数值分析讨论了偏振合成过程中单元光束束腰半径和系统低阶像差对合成光束质量的影响。在此基础上,最终实现了10 W 3.78 μm 中红外激光的稳定输出。与此同时,利用刀口法对偏振合成前后单元光束及合成光束的光束质量分别进行了测量。结果表明:合成光束质量达到1.2。

关键词 非线性光学; 光学参量振荡器; 偏振合成; 光束质量

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1019001

Polarized Combination of Mid-Infrared Optical Parametric Oscillator at 10 W Levels

Shang Yaping Li Xiao Wang Peng Xu Xiaojun

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Polarized combination of dual-beam mid-infrared optical parametric oscillator (OPO) is studied experimentally. Effects of the beam waist radius and system low-order aberration on the beam quality of the combined laser are analyzed numerically. A mid-infrared laser with output power of 10 W at 3.78 μm is obtained. Meanwhile, the beam quality of both unit and combined beams is measured respectively based on the knife-edge method. The results indicate that the quality of the combined beam achieves 1.2.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillators; polarized combination; beam quality

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 130.3060; 140.3580

1 引 言

3~5 μm 中红外波段的相干光源在环境监测、医疗诊断、激光光谱学研究、自由空间光通信、激光雷达以及红外干扰等领域均具有重要的应用价值^[1-4]。全固态中红外激光器以其结构紧凑、全电工作、稳定可靠等优势成为实现中红外激光输出的有效途径。其中,光学参量振荡器(OPO)以其宽调谐范围、高功率、窄线宽、高光束质量等优点成为实现3~5 μm 中红外激光输出的重要手段^[5-17]。

光学参量振荡技术属于二阶非线性频率变换。近年来,随着全固态近红外激光光源的飞速发展,尤其是高功率、准单频光纤激光器的迅猛发展,加上非线性晶体制造工艺的日趋成熟,中红外光学参量振荡技术取得了一系列突破性进展,中红外激光输出向着更高功率水平不断迈进^[12-17]。2012年,中国工程物理研究院 Peng 等^[12]采用1 μm Nd:YAG 脉冲激光抽运氧化镁掺杂的周期极化铌酸锂(PPMgLN)晶体光学参量振荡技术,获得了平均功率为27.4 W的3.91 μm 的中红外激光输出;2013年,澳大利亚国防科技中心的 Hemming 等^[13]采用 Ho:YAG 脉冲激光抽运 ZnGeP₂(ZGP)光学参量振荡技术,实现了平均功率为30.2 W的中红外激光输出,斜率效率达到63%,信号光光束质量 M^2 为1.3;同年,国防科学技术大学实现了基于自主研发准单频连续光纤放大器抽运的34.2 W的中红外 OPO,波长可调谐范围覆盖3.1~3.9 μm ,是目前公

收稿日期:2016-05-27;收到修改稿日期:2016-06-23

作者简介:尚亚萍(1989—),女,博士研究生,主要从事中红外固体激光器方面的研究。E-mail: shangyaping44@163.com

导师简介:许晓军(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

* 通信联系人。E-mail: crazy.li@163.com

开报道的最高功率水平的连续波中红外可调谐 OPO^[14]；2014 年，哈尔滨工业大学报道利用 Ho:YAG 脉冲激光抽运 ZGP 光学参量振荡的实验，获得 41.2 W 的高功率中红外激光输出^[15]；2015 年，Peng 等^[16]同样采用 1 μm Nd:YAG 脉冲激光抽运 PPMgLN 晶体光学参量振荡技术，在自由运转情况下实现了平均功率为 71.6 W、波长为 2.907 μm 的闲频光输出，斜率效率达到 26.7%，在腔内加入体布拉格光栅 (VBG) 进行线宽压窄技术后，最终实现 51.7 W 的中红外激光输出，输出中红外激光线宽小于 0.7 nm，实验测得中红外激光在 x 和 y 方向上的光束质量因子 M^2 分别为 5 和 7。Hemming 等^[17]还在报道中指出：量子亏损导致的热效应和非线性晶体自身的激光损伤特性是制约中红外 OPO 功率提升最主要的因素。

为了降低在大功率注入情况下热效应对激光系统的影响，提高输出激光的光束质量及整机的抗激光损伤性能，开展多光束合成技术研究具有十分重要的应用价值。光束合成技术通常可以分成相干合成和非相干合成两种^[18-21]。其中，相干合成技术需要精确控制单元光束的波长、偏振及相位等特性，对阵列光源的控制难度较大；而非相干合成技术作为典型的非相干合成技术，只需对激光器单元的偏振特性进行调控，再利用偏振合束元件就可以实现输出功率的提升，该技术不需要对单元光束的相位、振幅等进行锁定，具有操作简便、稳定性好等一系列优点，这大大拓展了该技术的实际应用范围。

本文从最基本的双光束中红外 OPO 的偏振合成技术研究出发，数值计算并讨论了偏振合成过程中单元光束束腰半径和系统倾斜像差对合成光束质量的影响。在此基础上，最终实现了 10 W 级 3.78 μm 中红外激光的稳定输出。基于现有实验设备，利用刀口法对偏振合成前后的光束分别进行了光束质量测量。结果表明：合成光束质量达到 1.2，实现了良好的合成效果。这一工作的开展为进一步获得高光束质量的更大功率的中红外 OPO 提供了思路。

2 理论分析及数值模拟

2.1 双光束偏振合成理论

双光束偏振合成的基本原理如图 1 所示。单元激光器准直输出相互独立的线偏振激光 (P 光和 S 光)，通过整形系统使得两路线偏振光的偏振方向互相垂直，再利用偏振合束元件将两路光合成一束，从而实现偏振合成。

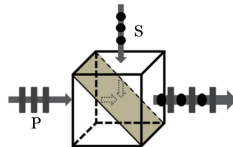


图 1 偏振合成基本原理图

Fig. 1 Schematic of the polarized combination technology

假定 OPO 输出中红外激光为标准基模高斯光束，两光束的束腰都位于 $z=0$ 的平面上，束腰半径分别为 w_{0i} ($i=1,2$)，在传播距离 z 处，单元光束电场强度表达式为

$$E_i(x, y, z) = \exp\left[-\frac{r_i^2}{w_i^2(z)}\right] \exp\left\{-i\left[kz - \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi w_{0i}^2}\right) + \varphi_i\right]\right\} \exp\left[-ik \frac{r_i^2}{2R_i(z)}\right], \quad (1)$$

其中 $i=1,2$ ； k 为波数且 $k=2\pi/\lambda$ ； $r_i=\sqrt{x^2+y^2}$ 是极坐标系下的径向坐标； w_{0i} 是基模高斯光束的束腰半径； $w_i(z)=w_{0i}\sqrt{1+\left(\frac{\lambda z}{\pi w_{0i}^2}\right)^2}$ 是与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的束腰半径； $R_i(z)=z\left[1+\left(\frac{\pi w_{0i}^2}{\lambda z}\right)^2\right]$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径。

由于偏振合成属于典型的非相干合成，合成光束光场强度表示为两单元光束光强的线性叠加，即

$$I(x, y, z) = I_1 + I_2 = \sum_i \exp\left[-\frac{2r_i^2}{w_i^2(z)}\right], \quad (2)$$

式中 $i=1,2$ 。

2.2 系统误差对合成光光束质量的影响

光束合成的最终目的是在保持良好光束质量的前提下提高输出光能量,所以从合成光束的远场峰值光强以及光束质量两个方面着手,即从光束亮度出发来评价合成效果。目前,有关激光光束质量的评价参数很多,但由于实际激光系统的复杂性以及应用目的的不同,人们对这些评价参数还没有统一的定论。常见的几种光束质量评价参数有:衍射极限倍数 β 因子、斯特列尔比 R_{SR} 、桶中功率比 R_{BQ} 、光束传输因子 f_{BPF} 以及 M^2 因子等^[22-23]。该文采用常用的 β 因子来评价合成光的光束质量。

在光束合成过程中,单元光束束腰半径、系统低阶像差等因素均会影响合成光远场光束质量。下面采用 β 因子作为评价参数对影响光束偏振合成效果的多种因素进行较为全面地分析,通过数值模拟的方法拟合出光束质量与各影响因素之间的定标关系。

2.2.1 单元光束束腰半径的影响

假定在双光束偏振合成过程中,单元光束的光场强度相同,而两光束的出射束腰半径存在一定的差异,那么合成光束远场光束质量会因两单元激光出射束腰半径的不同而产生不同程度的劣化。如图 2 所示,(a1)、(b1)、(c1)分别表示束腰半径为 $w_{01}=3\text{ mm}$ 基模高斯光束的近场和远场光强分布;(a2)、(b2)、(c2)分别表示束腰半径为 $w_{02}=6\text{ mm}$ 基模高斯光束的近场和远场光强分布;(a3)、(b3)、(c3)分别表示合成光束近场和远场光强分布,其光强是两单元光束光强的简单线性叠加。

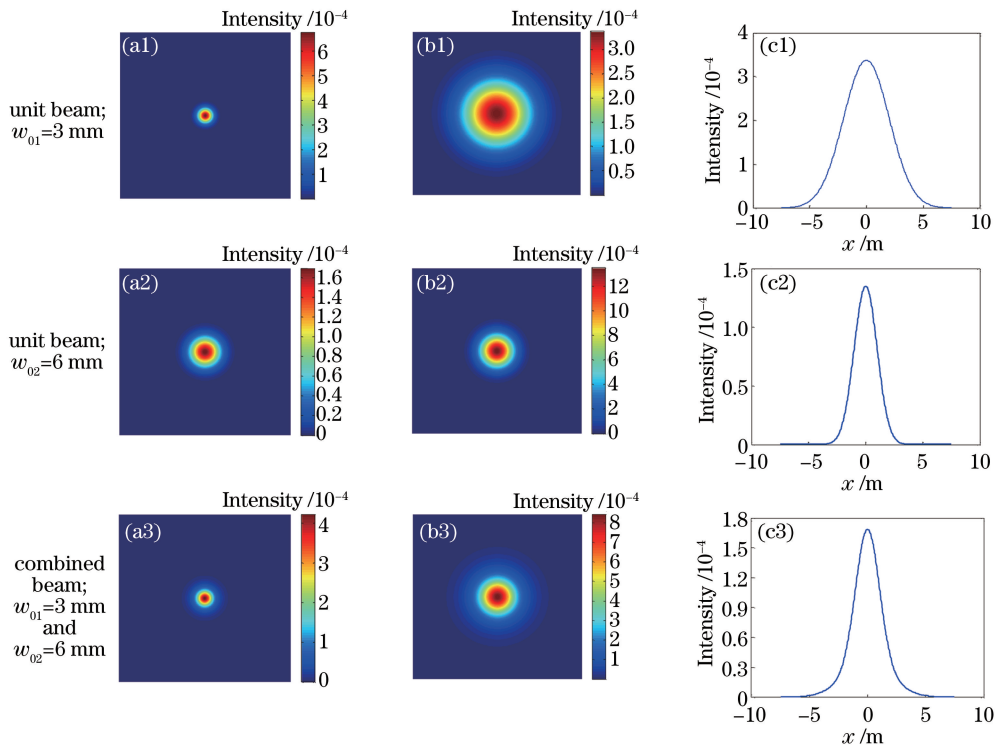


图 2 (a1)~(a3) 近场光强二维分布图;(b1)~(b3)远场光强二维分布图;(c1)~(c3)远场光强 x 方向分布图

Fig. 2 (a1)-(a3) Near-field intensity two-dimensional distributions;

(b1)-(b3) far-field intensity two-dimensional distributions; (c1)-(c3) far-field intensity x -directional distributions

从图 2 中可以看出,由于参与偏振合成的两光束出射束腰半径的差异,合成光束远场光强分布不再是标准高斯型分布,其光束质量表现出一定程度的劣化。以两光束出射束腰半径比值为参变量,数值计算出合成光束远场光束质量随单元光束束腰半径比值的曲线,如图 3 所示。结果表明:随着束腰半径比值的增大,合成光束远场光束质量越来越差,且光束质量与束腰半径比值之间基本上呈线性关系。在偏振合成过程中,若只考虑单元光束束腰半径的影响,那么只需保证参与合成的两光束的束腰半径比值小于 1.8,合成光束远场光束质量便能维持在 1.5 以下。

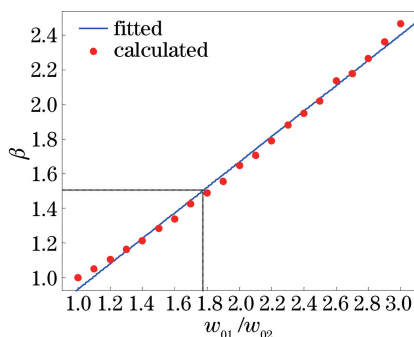


图 3 合成光束远场光束质量随出射光束腰半径比值的变化曲线
Fig. 3 Combined beam quality versus the beam waist radius ratio

2.2.2 系统倾斜像差的影响

在偏振合成过程中,理想情况下,参与合成的 P 光和 S 光均为正入射,经过偏振合束器件后两光束的传播方向一致。但在实际合成过程中,入射光束总会有微小的倾斜,随着光束的传播,在横截面内两光斑不再重合,从而有部分光束不能有效地参与合成。用 σ 来表示系统倾斜像差,假定偏振合成中两单元光束出射束腰半径大小相同(均为 $w_0 = 3 \text{ mm}$),当系统倾斜像差取值不同时,合成光束远场光强分布如图 4 所示。

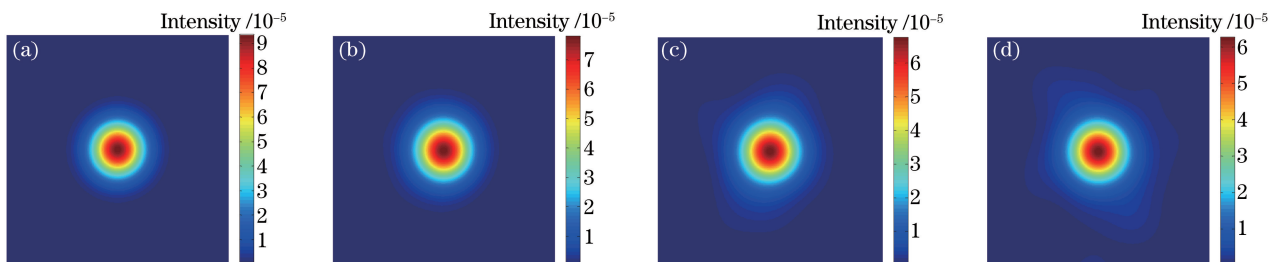


图 4 不同系统倾斜像差下的合成光束远场光强分布。(a) $\sigma = 0$; (b) $\sigma = 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$; (c) $\sigma = 4 \times 10^{-4} \text{ rad}$; (d) $\sigma = 6 \times 10^{-4} \text{ rad}$
Fig. 4 Far-field intensity distributions of the combined beam under different system tilt aberrations.
(a) $\sigma = 0$; (b) $\sigma = 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$; (c) $\sigma = 4 \times 10^{-4} \text{ rad}$; (d) $\sigma = 6 \times 10^{-4} \text{ rad}$

从图 4 中可以看出,随着系统倾斜像差的不断增大,合成光束远场光强分布畸变越来越严重。采用 β 因子作为光束质量评价参数,数值计算合成光束远场光束质量随系统倾斜像差的变化曲线,如图 5 所示。计算结果表明:当系统倾斜像差小于 $4.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 时,合成光束远场光束质量维持在 1.5 以内,随着系统倾斜像差的继续增大,合成光束远场光束质量急剧下降。由此可以得出:系统倾斜像差对合成光光束质量的影响非常大。在偏振合成过程中,一定要保证两光束的同轴性,这是决定实验合成效果的关键。

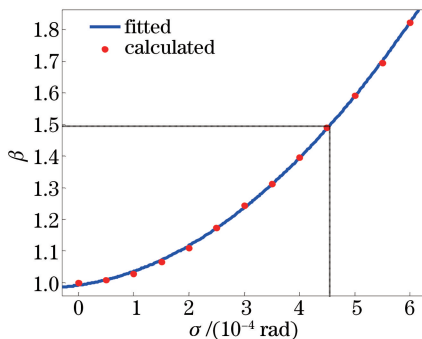


图 5 合成光束远场光束质量随系统倾斜像差的变化曲线
Fig. 5 Combined beam quality versus the system tilt aberration

3 实验装置

双光束 10 W 级中红外 OPO 偏振合成实验装置,如图 6 所示。

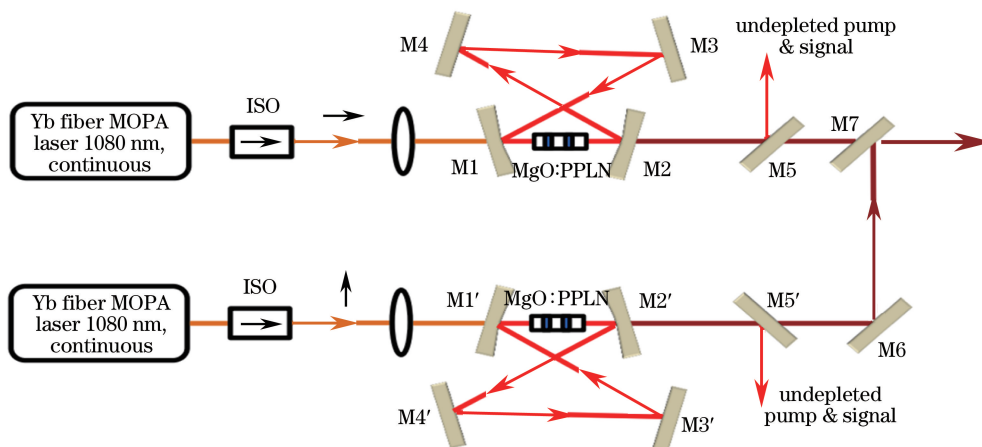


图 6 中红外光学参量振荡器偏振合成实验装置

Fig. 6 Experimental setup of the mid-infrared OPO polarized combination

实验中,两路 OPO 的抽运源均是课题组自主搭建的全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构连续波偏光纤放大器,中心波长为 1080 nm,输出线偏振光功率最大为 50 W。在光纤激光器之后放置隔离器(ISO),以防止回光对光纤抽运源稳定性的影响。在实验中,通过偏振分光元件选择特定的偏振方向对光参量振荡器进行抽运,以实现最大的非线性转换效率。用一个焦距为 100 mm 的透镜将准直后的抽运光聚焦到 MgO:PPLN 晶体中心,该晶体为掺 MgO(MgO 的掺杂摩尔分数为 5%)的周期性极化 LiNbO₃(PPLN)。

两路 OPO 均采用信号光单谐振四镜环形腔结构,由两组凹面镜(M1、M2 及 M1'、M2')和两组平面镜(M3、M4 及 M3'、M4')组成。凹面镜曲率半径为 100 mm,由于普通 K9 玻璃材料会对中红外闲频光产生强烈吸收,因此使用 CaF₂ 作为镜片的基质材料。腔镜 M1、M1' 表面镀有对抽运光高透、对闲频光和信号光高反的多层介质膜;M2、M2' 为输出耦合镜,输出耦合率为 10%,即对信号光的反射率为 90%;M3、M3' 及 M4、M4' 都是平面反射镜,对腔内存在的参量光均具有极高的反射率。非线性晶体 MgO:PPLN 长、宽、厚度分别为 50,4,1 mm,晶体两端面进行了抛光处理并镀有对抽运光、信号光和闲频光均增透的多层介质膜。最终输出的参量激光中包含信号光、中红外闲频光以及未经消耗的剩余抽运光,经中红外滤光片(M5、M5', 镀有对信号光和抽运光均为 45°高反的多层介质膜)后只获得中红外激光输出。其中一路中红外激光经金镜 M6 全反射后与另一路中红外激光相遇,并利用中红外偏振片 M7(在 3.5~3.9 μm 处 P 偏振光透射率大于 95%,S 偏振光反射率大于 99.9%)实现两路激光的同轴偏振合成。

4 实验结果分析

为了避免外界环境对 OPO 振荡腔的干扰,确保系统的稳定输出,对于 OPO 振荡腔采取了封装措施。实验最终获得了 12 W 的中红外激光输出,在此基础上,对输出激光功率进行 40 min 的功率稳定性测试,测量结果如图 7 所示,可以看出,该系统的功率输出稳定性非常好,这为利用该技术开发高功率中红外激光的



图 7 合束激光功率稳定性测量曲线

Fig. 7 Power stability of the combined laser

产品打下了基础。

实验中采用中红外波长计(测量范围 $1.3\sim 5\ \mu\text{m}$)对合束激光波长进行了测量,如图 8 所示。由于合成激光功率较高,在测量输出光波长时须在功率计前加装一片中红外增透镜片将反射光衰减至 $5\ \text{mW}$ 。

为了检验合成实验效果,采用刀口法对光束合成前后的光束质量分别进行了测量,并对测量数据进行一定的拟合分析,计算出两单元激光的光束质量分别是 1.1 和 1.6,合束光光束质量为 1.2。图 9 为合成光光束质量测量及拟合结果。

实验结果表明:偏振合成技术能够在保持高光束质量的前提下,实现高功率的中红外激光输出。该技术是实现高功率、高光束质量中红外激光输出的有效途径。

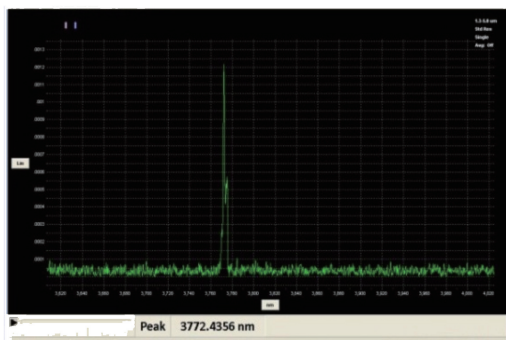


图 8 合束激光波长测量图

Fig. 8 Wavelength of the combined laser

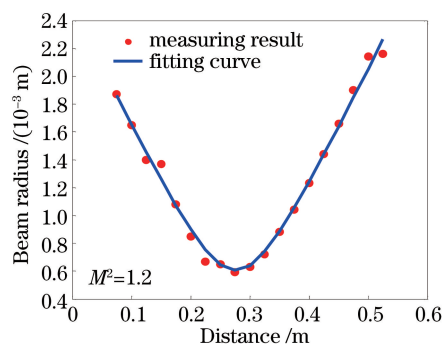


图 9 合束激光光束质量测量结果

Fig. 9 Measuring results and fitting curve of the combined laser beam quality

5 结 论

为解决光学参量振荡技术中热效应和非线性晶体自身的激光损伤特性等问题,以获得高功率、高光束质量的中红外激光输出,开展了低功率条件下双光束光参量振荡器偏振合成技术的实验研究。与此同时,数值计算出偏振合成系统中各种误差因素对合成光光束质量的影响,得出系统轴向一致性是确保实现良好合成效果的关键因素。实验中,对输出激光的稳定性、光谱特性以及光束质量等一系列光学特性进行了研究,为进一步开展更高功率的激光偏振合成实验提供了思路。

参 考 文 献

- Godard A. Infrared ($2\sim 12\ \mu\text{m}$) solid-state laser sources: a review[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8(10): 1100-1128.
- Mürtz M, Hering P. Mid-infrared coherent sources and applications[M]. Berlin: Springer, 2008: 535-555.
- Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(1): 1-6.
任国光, 黄裕年. 用激光红外干扰系统保护军用和民航机[J]. *激光与红外*, 2006, 36(1): 1-6.
- Geiser P, Willer U, Schade W. Picosecond mid-infrared LIDAR system[C]. 2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005, JTh1: JTh12.
- Henderson A, Stafford R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 767-772.
- Lin S T, Lin Y Y, Tu R Y, *et al.* Fiber-laser-pumped CW OPO for red, green, blue laser generation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2361-2367.
- Vainio M, Ozanam C, Ulvila V, *et al.* Tuning and stability of a singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator close to degeneracy[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 22515-22527.
- Sheng Q, Ding X, Shi C P, *et al.* Continuous-wave mid-infrared intra-cavity singly resonant PPLN-OPO under 880 nm in-band pumping[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 8041-8046.
- Miao Jieguang, Zhao Yanyan, Xu Zhijing, *et al.* Study on dynamic characteristics of the passively Q-switched intracavity optical parametric oscillators[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0902007.

- 苗杰光, 赵艳艳, 徐志敬, 等. 内腔式被动调Q光学参量振荡器动力学特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902007.
- 10 Zhao Gang, Jiang Xudong, Lü Xinjie, *et al.* Four-wavelength near and mid-infrared optical parameter oscillator based on superlattice[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502004.
- 赵 刚, 蒋旭东, 吕新杰, 等. 基于光学超晶格的四波长近-中红外光参量振荡器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502004.
- 11 Wang Li, Yang Jingwei, Cai Xuwu, *et al.* 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102008.
- 王 礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. 2.09 μm 纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102008.
- 12 Peng Y F, Wei X B, Li D M, *et al.* High-power mid-infrared tunable optical parametric oscillator based on 3-mm-thick PPMgCLN[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 87-90.
- 13 Hemming A, Richards J, Davidson A, *et al.* 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10062-10069.
- 14 许晓军, 李 霄, 尚亚萍, 等. 光纤激光抽运 34.2 W 连续波中红外光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809002-7.
- 15 Yao B Q, Shen Y J, Duan X M, *et al.* A 41-W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Ho:YAG laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6589-6592.
- 16 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.
- 17 Hemming A, Richards J, Davidson A, *et al.* A 27 W mid-IR laser source[C]. Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2011, SSFE: C607-C609.
- 18 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun, *et al.* Research progress of laser beam combining[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2773-2779.
- 刘泽金, 侯 静, 许晓军, 等. 激光相干合成的研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2773-2779.
- 19 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.* The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2221-2234.
- 刘泽金, 周 朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2221-2234.
- 20 Fan T Y, Sanchez A. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared[C]. SPIE, 2005, 5709: 157-164.
- 21 Sprangle P, Ting A, Peñano J, *et al.* Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(2): 138-148.
- 22 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643-1653.
- 冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1653.
- 23 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 773-778.
- 刘泽金, 周 朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.