

# 两路纳秒脉冲光纤激光相干合成的实验研究

粟荣涛 周朴\* 马阎星 王小林 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** 报道了两路纳秒脉冲光纤激光的相干合成(CBC)实验。利用主振荡功率放大(MOPA)结构搭建两路全保偏光纤激光放大器,利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对两路放大器进行相干合成,获得了重复频率 10 MHz、脉冲宽度 10 ns、平均功率 50 mW 的脉冲激光输出。系统闭环时目标圆孔内能量提高了 1.76 倍,远场光斑条纹对比度提高了 4.38 倍。

**关键词** 激光器;光纤激光器;脉冲激光;相干合成;随机并行梯度下降算法

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102004

## Coherent Beam Combining of Two Nanosecond Fiber Pulse Lasers

Su Rongtao Zhou Pu Ma Yanxing Wang Xiaolin Xu Xiaojun

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

**Abstract** An experiment of coherent beam combining (CBC) of pulse laser in master oscillator power amplifier (MOPA) configuration using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is reported. An output power of 50 mW is obtained by CBC of two pulse lasers with repetition rate of 10 MHz and pulse duration of 10 ns. When the system evolves from open-loop to closed-loop, the energy encircled in the target is enhanced by a factor of 1.76, and the fringe visibility of the long exposure pattern is increased by a factor of 4.38.

**Key words** lasers; fiber laser; pulse laser; coherent beam combining; stochastic parallel gradient descent algorithm

**OCIS codes** 140.3510; 230.4480; 030.1640

## 1 引言

高功率脉冲激光在医疗、遥感、机械加工和非线性光频转换等领域有着广泛应用。光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、散热性能优良、系统结构紧凑等优点。但是,由于受非线性效应、热损伤、热透镜效应等影响,单根光纤的输出功率受到限制<sup>[1]</sup>,这种限制在脉冲光纤激光器中更为突出。光束合成是突破单根光纤激光输出功率极限,提高激光输出功率的有效手段。目前,国内外研究人员已经采用光谱合成<sup>[2,3]</sup>、偏振合成<sup>[4,5]</sup>以及相干合成<sup>[6,7]</sup>等方法实现了脉冲光纤激光的光束合成。其中,相干合成能够在获取高的激光输出功率的同时保持良好的光束质量,实现近衍射极限的激光输出,是一种倍受

关注的技术途径<sup>[8,9]</sup>。相干合成的关键在于实现各路激光的相位锁定,实现相位锁定的方法主要有被动锁相<sup>[10,11]</sup>和主动锁相<sup>[12]</sup>,主动锁相方案在向大功率、多数目激光合成方面具有很强的扩展能力。目前报道的主动锁相相干合成主要针对连续激光展开,常用的主动相位控制方法主要有外差法<sup>[13]</sup>、多抖动法<sup>[14]</sup>、单抖动法<sup>[15]</sup>和随机并行梯度下降(SPGD)法<sup>[16]</sup>等。2010年,Wang等<sup>[17]</sup>利用基于SPGD算法的主动锁相方案对两路脉冲激光进行了相位锁定,使合成光束光斑主瓣内的能量提高了1.616倍,获得了脉宽 10  $\mu$ s、重复频率 21 kHz、平均功率几十毫瓦的脉冲激光。

主振荡功率放大器(MOPA)结构通过对中、低

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-27

作者简介: 粟荣涛(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: surongtao@126.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学等方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

\* 通信联系人。E-mail: zhoup203@163.com

功率的高品质种子光进行多级放大,实现高功率高光束质量的激光输出,广泛应用于高能激光领域<sup>[18,19]</sup>。基于 MOPA 结构的主动相位控制光纤激光相干合成方案,在充分发挥 MOPA 结构优点的同时,克服单根光纤的功率限制,成为当前激光领域的学科前沿和研究热点。2011 年 2 月, L. Lombard 等<sup>[20]</sup>报道了基于多抖动法和 MOPA 结构的两束脉冲激光相干合成实验。本文利用 SPGD 算法,实现了基于 MOPA 结构和主动锁相方案的两路脉冲光纤激光相干合成,获得了重复频率 10 MHz、脉宽 10 ns 的脉冲激光输出,平均功率为 50 mW。

## 2 实验原理

SPGD 算法由美国陆军实验室 Voronstov 等在

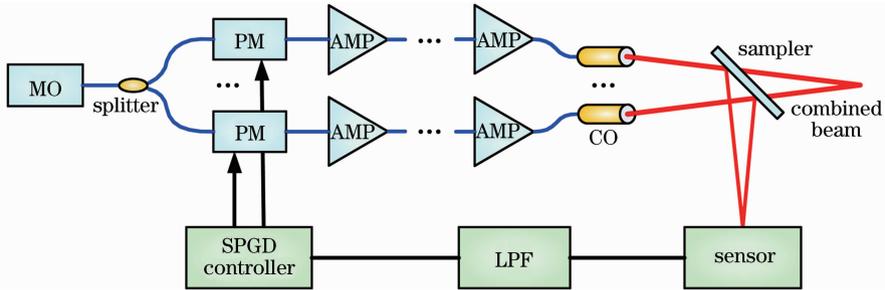


图 1 基于 SPGD 算法和 MOPA 结构的脉冲激光相干合成系统结构

Fig. 1 System setup for coherent beam combining of pulse laser in MOPA configuration using SPGD algorithm

系统应用 SPGD 算法使性能评价函数  $J$  达到唯一极值,从而达到消除系统中的相位噪声、实现各光束相干合成的目的。双向扰动 SPGD 算法的执行过程(第  $k$  次迭代时)如下:

1) 随机生成扰动向量  $\delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}^{(k)}$ ,其中  $\delta u_i$  相互独立,满足均值为零、方差相等且概率密度关于均值对称。

2) 依次将正向 ( $\delta \mathbf{u}^{(k)}$ ) 和负向 ( $-\delta \mathbf{u}^{(k)}$ ) 的扰动施加到相位调制器上,通过性能评价函数传感器获得扰动引起的性能评价函数变化量  $\delta J^{(k)}$ 。

$$\delta J^{(k)} = \frac{J_+^{(k)} - J_-^{(k)}}{2} = \frac{J(\mathbf{u}^{(k)} + \delta \mathbf{u}^{(k)}) - J(\mathbf{u}^{(k)} - \delta \mathbf{u}^{(k)})}{2}. \quad (1)$$

3) 根据性能评价函数变化量  $\delta J^{(k)}$  更新控制参数  $\mathbf{u}$ ,进行第  $k+1$  次迭代,直至算法结束。其中控制参数的更新按

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma \delta \mathbf{u}^{(k)} \delta J^{(k)} \quad (2)$$

进行,式中  $\gamma$  为步进增益。随机扰动向量  $\delta \mathbf{u}$  和性能评价函数  $J$  的选取将对 SPGD 算法产生重要影响。

1997 年提出<sup>[21]</sup>,近年来广泛应用于自适应光学系统。 $N$  路基于 SPGD 算法和 MOPA 结构的脉冲激光相干合成的系统结构如图 1 所示。主振荡激光器 (MO) 输出光束通过分束器 (splitter) 后被分为  $N$  路,每一路先后经过相位调制器 (PM) 和多级光纤激光放大器 (AMP),相位调制器和光纤放大器分别起到相位控制和功率放大的作用。经过放大后的光束经过准直器 (CO) 后形成阵列光束,分光镜 (sampler) 提取小部分合成光束,由性能评价函数传感器 (sensor) 生成性能评价函数  $J$ ,作为算法控制器 (SPGD controller) 的反馈信号,算法控制器执行算法并利用向相位调制器施加控制信号,实现对各路激光的相位控制。

常见的随机扰动分布有伯努利分布、离散均匀分布、均匀分布和正态分布。文献[22]通过仿真发现,当  $\delta \mathbf{u}$  服从伯努利分布时具有最快的收敛速度。该文献还讨论了用于相干合成的评价函数  $J$  对算法收敛性的影响,其中  $J = \iint_s I(x, y) dx dy$  具有较好的收敛性, $s$  小于或等于远场中央主瓣的面积。在连续激光的相干合成中,通常用光电探测器探测到的合成光束的主瓣能量作为系统评价函数  $J$ , $J$  中携带了各路激光相位噪声信息。然而,在脉冲激光的相干合成中,改参数不仅包含了相位噪声信息,还携带了光强本身的起伏信息。光纤放大器的相位噪声频率一般在 1 kHz 以下,对于重复频率高于 1 kHz 的脉冲激光,则可以通过低通滤波的方法去除性能评价函数  $J$  中携带的光强起伏信息,利用连续激光相干合成的方法实现对脉冲激光的相干合成。

此外,为了获得理想的脉冲激光相干合成效果,还必须使各路脉冲激光保持时间上的同步,即保持各路光的光程差相等。通过光纤切割焊接和空间光路调节的方式很容易将各路光的光程差控制在几厘米以内,这相当于几百皮秒的延迟,对于脉宽远大于

几百皮秒的脉冲激光的相干合成, 光纤切割焊接和空间光路调节就能达到要求。对于脉宽较短的脉冲激光相干合成, 可以利用光纤延迟线进行精确调节, 使各路光的光程差更加精确地相等。

### 3 实验及分析

基于 SPGD 算法和 MOPA 结构的脉冲激光相干合成实验装置如图 2 所示。

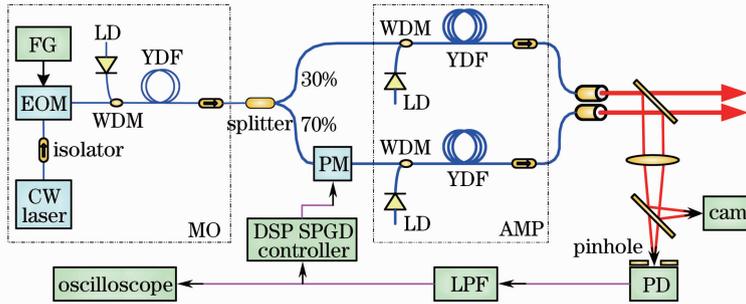


图 2 两路脉冲光纤激光相干合成实验装置

Fig. 2 Experimental setup for coherent beam combining of pulse fiber laser

主振荡器由一个电光调制脉冲激光器和预放大器组成。函数发生器(FG)驱动电光调制器(EOM)对工作波长为 1064 nm 的单频连续(CW)激光器进行调制, 产生重复频率 10 MHz、脉冲宽度约 10 ns、平均功率 1 mW 的脉冲种子光, 其波形如图 3 所示。种子光和激光二极管(LD)抽运光通过波分复用器(WDM)耦合进单模保偏掺 Yb 光纤(YDF)中放大到约 20 mW。

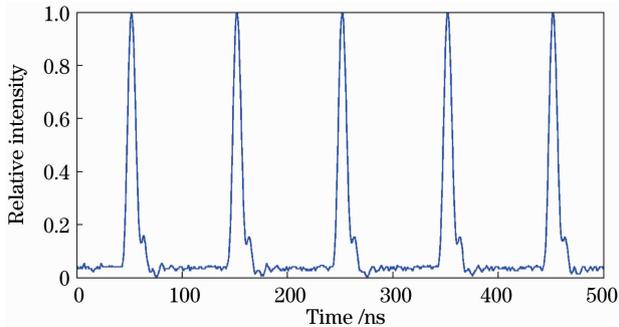


图 3 种子激光脉冲波形

Fig. 3 Pulse shape of the seed source

主振荡器输出的脉冲激光由分束器分为平均功率分别为 14 mW 和 6 mW 的两束光。平均功率分别为 14 mW 的一束先经过相位调制器(损耗约为 3.0 dB)后, 再由主放大器进行放大; 另一束直接经过主放大器进行放大。主放大器通过波分复用器将抽运光和信号光耦合进单模保偏 YDF, 将脉冲激光放大到 25 mW。

经过放大的两束激光通过准直器后形成阵列光束, 透镜对分光镜提取小部分阵列光束进行聚焦, 用于模拟远场光斑。利用另一个分光镜将经聚焦后的光再分为两束, 相机(cam.)置于其中一束光的后焦面上, 用于观察光束的远程光斑图样及相干合成效

果。在另一束光的后焦面上放置一个小孔光阑(pinhole), 其半径约为 200  $\mu\text{m}$ , 小于理想相干合成的主瓣直径。光电探测器紧贴小孔光阑放置, 探测到的信号首先经过低通滤波器(LPF), 低通滤波器截止频率为 20 kHz, 能够有效滤除频率为 10 MHz 的脉冲激光光强起伏信号, 保留频率低于 1 kHz 的相位噪声信息。滤波后的信号经过 A/D 转换, 作为性能评价函数  $J$  进入数字信号处理器(DSP)算法控制器, DSP 执行 SPGD 算法并生成相位控制信号, 该信号通过 D/A 转换和放大后施加给  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器用于相位控制。示波器(oscilloscope)用于观察相干合成光束的目标圆孔内部包含的能量随时间变化的关系。

相干合成的效果利用合成光束在目标孔径的平均光强(即性能评价函数  $J$ )和长曝光干涉图样来表征。当系统处于开环状态、未执行 SPGD 算法, 输出平均光功率为 50 mW 时, 示波器观察到的合成光束在目标孔径的平均光强(即性能评价函数  $J$ )随时间出现大幅度起伏, 相机观察到的远场光斑也处于不断变化之中。当系统处于闭环, 执行 SPGD 算法时, 示波器显示的  $J$  值基本不随时间变化, 相机观察到的远场光斑也基本稳定。从开环到闭环的过程中示波器显示的  $J$  值变化情况如图 4 所示, 系统闭环时  $J$  的平均值从开环时的 0.52 V 增加到 0.91 V, 提高了 1.76 倍。远场光斑在开环和闭环时的长曝光图分别如图 5(a) 和 (b) 所示。定义光斑对比度  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , 其中  $I_{\max}$  为光强极大值,  $I_{\min}$  为  $I_{\max}$  的临近极小值, 算得远场光斑的对比度在开环和闭环时分别为 0.08 和 0.35, 闭环时远场光斑对比度提高了约 4.38 倍。

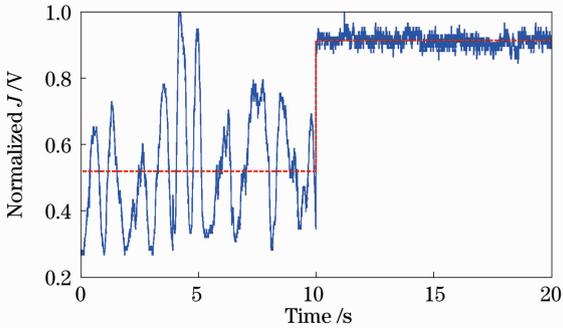


图 4 从开环到闭环时  $J$  值的变化

Fig. 4 Change of  $J$  from open-loop to close-loop

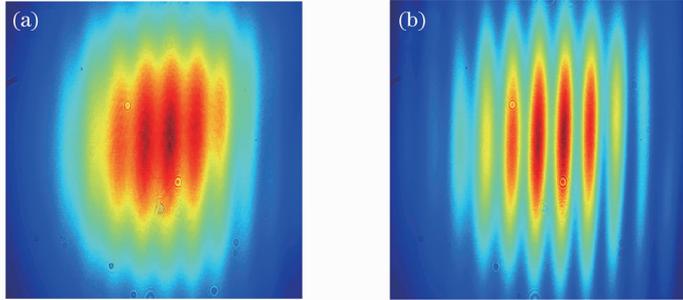


图 5 远场光斑的长曝光图。(a)开环;(b)闭环

Fig. 5 Long-exposure far field interference pattern. (a) Open-loop; (b) close-loop

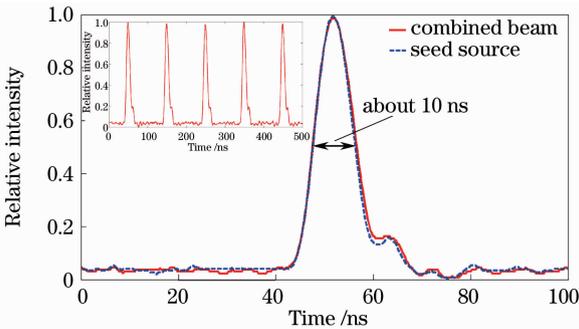


图 6 合成光束和种子激光的脉冲波形

Fig. 6 Pulse shape of combined beam and seed source

## 4 结 论

利用 SPGD 算法和 MOPA 结构实现了两路脉冲激光的相干合成,获得了重复频率 10 MHz、脉冲宽度 10 ns、平均功率 50 mW 的脉冲激光输出。系统闭环时,  $J$  的平均值从开环时的 0.52 V 增加到 0.91 V,合成光束目标圆孔内的能量提高了 1.76 倍;远场光斑条纹对比度从 0.08 增加到 0.35,提高了约 4.38 倍。调节光纤长度使两路光的光程差基本相等,合成脉冲基本保持了种子脉冲的波形。通过增加放大器的级数和合成路数,该方法还能够输出更高功率的脉冲激光输出,是获得高功率脉冲光纤激光的理想方法。

由于通过调节两光路之间光纤的长度,使两路光的光程差基本达到一致,两路脉冲激光保持了时间上的同步。此外,虽然在大功率脉冲光纤激光器中,由于脉冲前沿消耗了大量的反转粒子数,种子光脉冲经过光纤传输放大后一般会发生畸变(脉冲前端变陡,脉冲后端边缘拉长)<sup>[23]</sup>,但是由于本实验的光功率较低,两路放大后的脉冲激光都没有发生畸变。因此,合成光束与种子激光的波形基本一致,如图 6 所示。

## 参 考 文 献

- 1 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2010, **27**(11): 63~92
- 2 O. Schmidt, T. V. Andersen, J. Limpert *et al.*. 187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 226~228
- 3 Schreiber Thomas, Wirth Christian, Schmidt Oliver *et al.*. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 354~360
- 4 L. Daniault, M. Hanna, L. Lombard *et al.*. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 621~623
- 5 Seise Enrico, Klenke Arno, Limpert Jens *et al.*. Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 27827~27835
- 6 Lhermite Jérôme, Desfarges-Berthelemot Agnès, Kermene Vincent *et al.*. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1842~1844
- 7 Pu Zhou, Zilun Chen, Xiaolin Wang *et al.*. Synchronization and coherent combining two pulsed fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 523~525
- 8 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 47~54
- 何兵, 楼祺洪, 周军等. 光纤激光器相干组束技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 47~54
- 9 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progress and development of fiber combining technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 163~166
- 程勇, 刘洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 163~166

- 10 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926  
李剑峰, 段开棕, 王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 11 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81  
程勇, 刘洋, 许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 12 Fan Xinyan, Liu Jingjiao, Wang Taotao *et al.*. Progress in coherent combination of active phasing fiber amplifiers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(4): 461~465  
范馨燕, 刘京郊, 王涛涛等. 主动锁相光纤放大器相干合成技术研究进展[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(4): 461~465
- 13 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469  
肖瑞, 侯静, 姜宗福等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6464~6469
- 14 Ma Yanxing, Liu Zejin, Zhou Pu *et al.*. Coherent beam combination of three fiber amplifiers with multi-dithering technique[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044204
- 15 Ma Yanxing, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1308~1310
- 16 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combining of three watt-level fiber amplifiers using a DSP-based stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044202
- 17 X. L. Wang, P. Zhou, Y. X. Ma *et al.*. Coherent beam combining of pulsed fiber lasers with hybrid phase control[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(6): 1453~1458
- 18 Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936  
冯宇彤, 杜松涛, 杨燕等. 基于LD脉冲调制的全光纤MOPA结构激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1932~1936
- 19 Zhou Jun, Du Songtao, Liu Xia *et al.*. High-repetition rate, narrow width fiber laser with 150 W output based on MOPA method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 861  
周军, 杜松涛, 刘侠等. 基于MOPA方式的150 W高重复频率、窄脉宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 861
- 20 L. Lombard, A. Azarian, K. Cadoret *et al.*. Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5  $\mu\text{m}$  fiber amplifiers in a long-pulse regime[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 523~525
- 21 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1355~1360  
杨惠珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1355~1360
- 22 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Theoretical and experimental investigation on coherent beam combining of fiber lasers using SPGD algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2232~2237  
周朴, 刘泽金, 王小林等. 随机并行梯度下降算法用于光纤激光相干合成的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2232~2237
- 23 Wang Yong, Po Hong. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2262~2270

栏目编辑: 宋梅梅