

# 基于并行梯度下降算法的自适应任意口径光束整形

蒋鹏志<sup>1</sup> 马浩统<sup>1</sup> 袁凌峰<sup>2</sup> 邹永超<sup>1</sup> 杜少军<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)  
(<sup>2</sup>中国人民解放军 73903 部队, 福建厦门 361100)

**摘要** 为了提高激光系统的整体效率,需要输出激光具有特定的光强分布。基于并行梯度下降(SPGD)算法的自适应光束整形方法凭借其良好的适用性得到了迅速发展,然而其整形效果较大程度地受到目标光束尺寸的影响。提出一种新的光束整形方法:采用 SPGD 算法对入射光束进行近场整形后通过控制  $4f$  系统得到需要口径的光强分布。研究了理想高斯光束和含静态像差高斯光束的光束整形效果,同时对其光束口径的可控性进行了模拟分析。研究结果表明,设计的整形系统可以有效地实现有无波前畸变的入射光束的任意口径光束整形,具有更好的适应性和实用性。

**关键词** 自适应光学;光束整形;并行梯度下降算法;变形镜

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1202008

## Shaped Beam of Arbitrary Size with Adaptive Optics Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Jiang Pengzhi<sup>1</sup> Ma Haotong<sup>1</sup> Yuan Lingfeng<sup>2</sup> Zou Yongchao<sup>1</sup> Du Shaojun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)  
(<sup>2</sup>Army 73903 of the People's Liberation Army, Xiamen, Fujian 361100, China)

**Abstract** Certain irradiance profile of laser output is needed to increase the entire efficiency of laser system. Beam shaping with adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is developing rapidly because of its outstanding applicability, however, shaping effect of this method largely depends on the target beam size. A new method of far field irradiance profile control is presented. The input beam is shaped in the near field with SPGD algorithm, and then imaged by a  $4f$  system. The effect of far field irradiance profile control is studied for the input beams with and without wavefront aberration. Size control of the far field irradiance profile is analyzed. The result reveals that the new system could realize beam shaping whether the input beam has wavefront aberration or not. And it could realize size control of the far field irradiance profile. The new system has better applicability and utility than traditional ones.

**Key words** adaptive optics; beam shaping; stochastic parallel gradient descent algorithm; deformable mirror

**OCIS codes** 010.1080; 140.3300; 350.5030; 140.3535

## 1 引言

激光器输出光束由于受到激光谐振腔腔型、腔内增益分布、光学元件像差等因素限制只能具有特定的光强分布<sup>[1]</sup>,但实际应用中往往需要工作激光光强满足一定的分布以提高作用效率<sup>[2]</sup>。目前光束整形主要分为基于固定光学元件的光束整形系

统<sup>[3~5]</sup>和基于变形镜的自适应光束整形系统<sup>[6~10]</sup>两大类。前一类方法由于一个整形器对应着一组特定的光束参数,整形器一旦制作完成便不能随着光束参数变化自动调节,适应性差。在后一类方法中,遗传算法需要调整大量参数,算法实现复杂;模拟退火算法收敛速度慢;而并行梯度下降(SPGD)算法具

收稿日期: 2011-07-05; 收到修改稿日期: 2011-08-30

作者简介: 蒋鹏志(1987—),男,硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: jiangpengzhi@163.com

导师简介: 杜少军(1972—),男,研究员,主要从事高能激光传输方面的研究。E-mail: d\_sj@tom.com

有收敛速度快、实现更简单的特点,适当地选取收敛指标和算法中的参数还可以保证算法收敛的准确性<sup>[11~14]</sup>。

基于 SPGD 算法的光束整形方法其整形效果较大程度地受到目标光束口径的影响。对于特定的激光系统,输入激光口径是一定的,其最佳整形效果的目标光束口径大小也是一定的,而实际需要的目标光束口径会随实际情况不同而变化。当两者口径相差较大时,其光束整形效果会受到较大影响。

本文提出了新型的光束整形方法——在基于 SPGD 算法的传统整形系统的基础上加入  $4f$  系统。其中,近场整形部分的目标光束尺寸采用整形效果的最佳值(传统系统采用的是实际需要的目标光束尺寸大小),整形后再通过  $4f$  系统将其缩放成需要口径大小的整形光束。通过 SPGD 算法研究了理想高斯光束和含静态像差高斯光束的光束整形效果,同时对光束口径的可控性进行了模拟分析。

## 2 理论基础

### 2.1 SPGD 算法基本原理

SPGD 算法的基本思想描述如下,设当前驱动器控制器电压为  $u^{(k)} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ ,第  $k$  次迭代时小的随机扰动向量  $\{\delta u_j\}_{\text{jet}}^N$  被正向和负向并行施加到波前校正器的  $N$  个驱动器上。此时系统性能指标产生的相应变化  $\delta J$  为

$$\begin{cases} \delta J_+ = J(u_1 + \delta u_1, u_2 + \delta u_2, \dots, u_N + \delta u_N) \\ \delta J_- = J(u_1 - \delta u_1, u_2 - \delta u_2, \dots, u_N - \delta u_N). \\ \delta J = \delta J_+ - \delta J_- \end{cases} \quad (1)$$

然后使用性能指标的变化量  $\delta J$  和随机扰动  $\{\delta u_j\}$  进行第  $k$  次迭代的梯度估计,在梯度下降的方向进行控制参数的迭代:

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

式中参数  $\gamma$  取正值时向着性能指标极大的方向优化; $\gamma$  取负值时向着性能指标极小的方向优化。

### 2.2 变形镜控制理论和性能评价函数

由于模式法具有收敛速度快、控制变量数少、生成相位平滑性好等优点,因此采用模式法对变形镜进行控制。模式法控制的基本思想是:SPGD 算法不再直接优化变形镜每个校正单元的电压分布,而是优化不同模式的系数来生成所需要的面形分布,然后再将面形分布转化为变形镜每个控制单元的控制电压。主要通过优化前  $n$  阶泽尼克多项式系数来生成所需要的相位分布。

以输出光束与目标光场光强分布差的平方和作为近场光强整形性能评价函数,其表达式为

$$J_{\text{fit error}} = \iint [I_{\text{output}}(x, y) - I_{\text{target}}(x, y) \times f_{\text{nor}}]^2 dx dy, \quad (3)$$

$$f_{\text{nor}} = \iint I_{\text{output}}(x, y) dx dy / \iint I_{\text{target}}(x, y) dx dy \quad (4)$$

式中  $f_{\text{nor}}$  为归一化系数,按照能量守恒定律保证目标光束与整形光束的总光强相等。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 光束整形光学系统

设计的光束整形系统示意图如图 1 所示。入射高斯光束通过变形镜进行相位调制,在距离  $z$  处的近场形成超高斯平顶或矩形平顶分布,然后再通过  $4f$  系统对此整形后的光束进行成像,在 CCD2 处得到所需的光强分布。其中,近场整形是通过变形镜、CCD1、计算机和 SPGD 算法控制程序完成的; $4f$  系统入射端到变形镜的距离与 CCD1 到变形镜的距离相同;透镜 1、2 的焦距  $f_1 > f_2$ 。

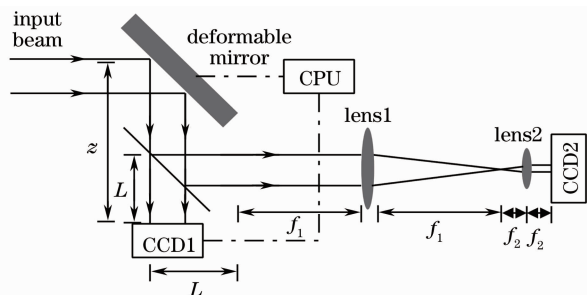


图 1 光束整形系统示意图

Fig. 1 Schematic of the beam shaping system

模拟中,初始输入高斯光束束腰半径为  $2 \text{ mm}$ ,波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ;分离表面变形镜边长  $D = 10 \text{ mm}$ ;近场整形距离  $z = 0.3 \text{ m}$ ;透镜 1 的焦距  $f_1 = 1 \text{ m}$ ,透镜 2 的焦距  $f_2 = 0.2 \text{ m}$ 。主要模拟计算入射光束不含像差、含有静态像差和不同光斑大小下的整形效果。出射光束分别为圆平顶光束和矩形平顶光束,表达式为

$$I_{\text{target}}(x, y) = \exp\left[-2 \times \left(\frac{x^2 + y^2}{R_0^2}\right)^{M/2}\right], \quad (5)$$

$$I_{\text{target}}(x, y) = \exp\left\{-\left[\frac{(x - x_0)^2}{a^2}\right]^p - \left[\frac{(y - y_0)^2}{b^2}\right]^q\right\}, \quad (6)$$

(5)式中  $R_0$  和  $M$  分别为超高斯光束的束腰半径和阶数( $R_0 = 1.8 \text{ mm}$ ,  $M = 16$ );(6)式中  $a$  和  $b$  决定了光束在  $x, y$  两个正交方向上的光斑宽度,阶数  $p$

和  $q$  决定了光束边缘光强在  $x$  方向和  $y$  方向上的平滑度 ( $a = b = 1.9 \text{ mm}, p = q = 8$ )。

### 3.2 理想高斯光束入射

假设入射光束为理想的高斯光束, 目标光束表

达式分别为(5)、(6)式, 其参数如前所述。根据图 1 所示光束整形系统, 利用 SPGD 算法通过随机优化前 50 阶泽尼克多项式的系数来生成所需要的整形相位分布, 整形结果如图 2、3 所示。其中图 2 是目标

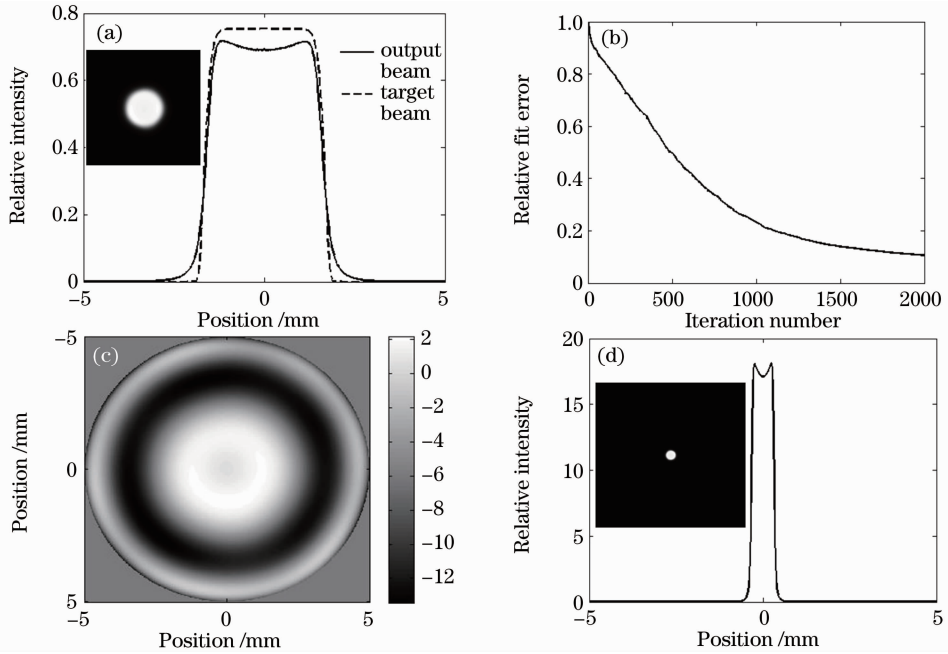


图 2 目标光束为圆形平顶的整形结果。(a)近场整形后的光强分布;(b)性能评价函数曲线;(c)变形镜产生的相位分布;  
(d)  $4f$  成像后光束的整形效果

Fig. 2 Results of shaping to circular flattop beam. (a) Cross section of shaped beam; (b) relative fit error; (c) phase distribution of deformable mirror; (d) cross section of far field irradiance profile

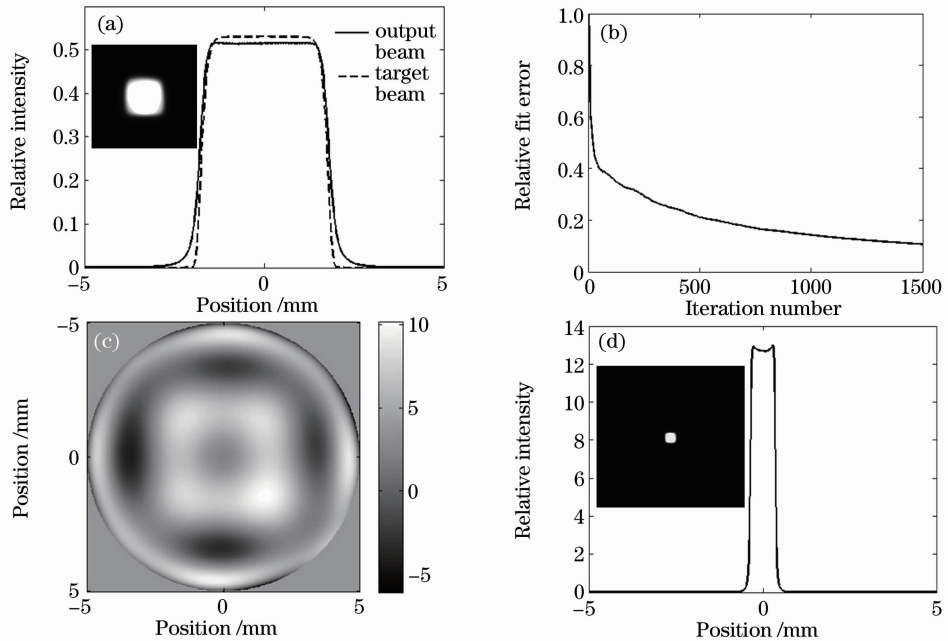


图 3 目标光束为方形平顶的整形结果。(a)近场整形后的光强分布;(b)性能评价函数曲线;(c)变形镜产生的相位分布;  
(d)  $4f$  成像后光束的整形效果

Fig. 3 Results of shaping to square flattop beam. (a) Cross section of shaped beam; (b) relative fit error; (c) phase distribution of deformable mirror; (d) cross section of far field irradiance profile

光束为圆形平顶的整形结果;图 3 是目标光束为方形平顶的整形结果。从图 2、3 可以看出,设计的光束整形系统可以很好地实现整形。

### 3.3 存在静态像差的高斯光束入射

实际应用中不仅入射光束本身的波前可能存在畸变,而且系统的光学元件本身和器件积累的热效应、非线性效应等也会对光束波前产生影响。采用 SPGD 算法进行光束整形的方法可以很好地解决存在波前畸变的入射光的整形问题。由于目标光束为圆形平顶时的整形方法与方形平顶相同,下文仅以

整形目标光束为方形平顶为例。

在实际自适应系统中光束像差以低阶像差为主,而低阶像差又以离焦、像差和像散为主,因此模拟中波前畸变由离焦和像差两者组成,其峰谷(PV)值均为  $4\pi$ 。根据图 1 所示整形系统,利用 SPGD 算法通过随机优化前 50 阶泽尼克多项式的系数来生成所需要的整形相位分布,整形结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,入射光束存在波前畸变对本文设计的整形系统的整形效果没有影响。

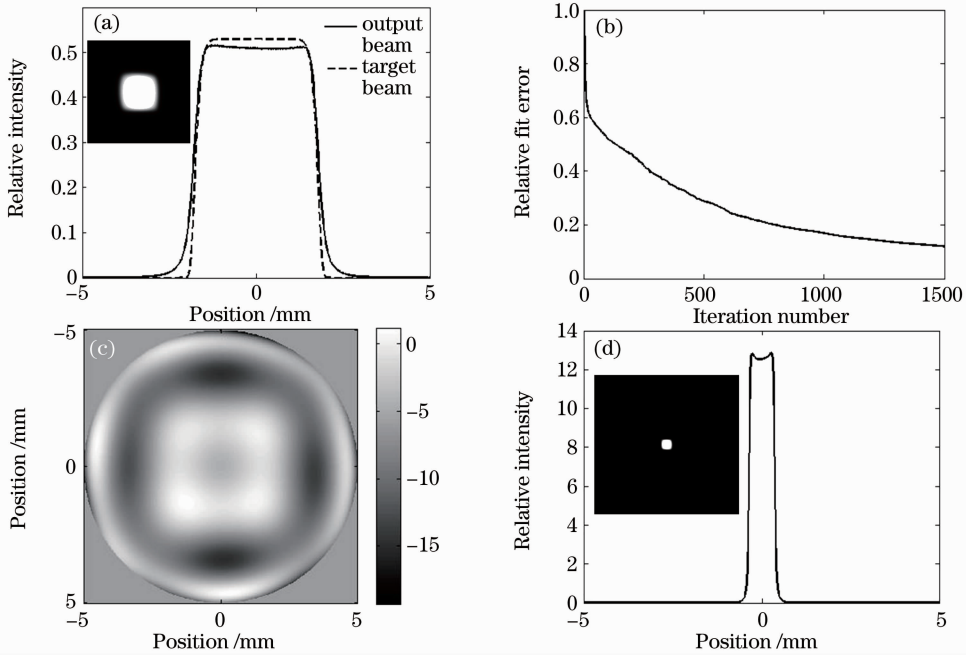


图 4 入射光束存在静态像差时目标光束为方形平顶的整形效果。(a)近场整形后的光强分布;(b)性能评价函数曲线;(c)变形镜产生的相位分布;(d)  $4f$  成像后光束的整形效果

Fig. 4 Results of shaping to square flattop beam when aberration exists in the input beam. (a) Cross section of shaped beam; (b) relative fit error; (c) phase distribution of deformable mirror; (d) cross section of far field irradiance profile

### 3.4 目标光束大小的可控性

图 5 为采用基于 SPGD 算法的传统光束整形方法的光束整形结果,其入射光束半径为 2 mm,  $R_0$

为输出光束半径。从图 5 中可以看出,基于 SPGD 算法的传统光束整形方法其整形效果较大程度地受到目标光束口径的影响。对于特定的激光系统,入

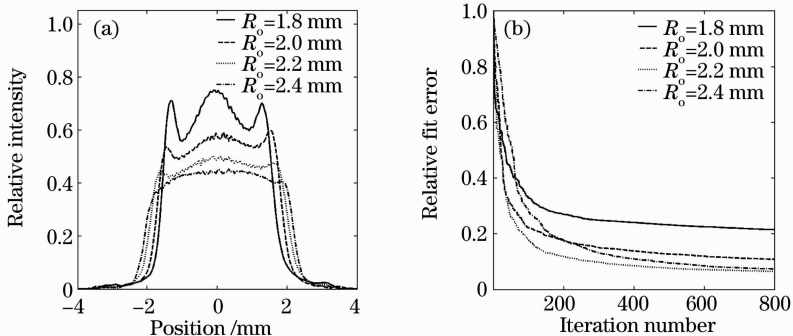


图 5 不同尺寸目标光束整形结果。(a)光强分布;(b)收敛曲线

Fig. 5 Shaping to target beams of different radii. (a) Irradiance profile; (b) relative fit error

射激光口径是一定的,其整形效果最佳的目标光束口径大小也是一定的,而实际应用中需要的目标光束口径会随实际情况不同而变化。当两者口径相差较大时,其光束整形效果会受到较大影响。

本文设计的光束整形系统在实际需要的目标光束和最佳目标光束尺寸相差较大的范围内均能得到较为理想的整形效果。以整形效率  $\eta$  和光束均匀度  $S_E$  作为评价光强整形效果和验证目标光束大小可控性的定量指标,其定义为<sup>[10]</sup>

$$S_E = \frac{\left\{ \frac{2}{a^2} \int_0^a \left[ P_{\text{output}}(r) - \frac{2}{a^2} \int_0^a P_{\text{output}}(r) r dr \right]^2 r dr \right\}^{1/2}}{\frac{2}{a^2} \int_0^a P_{\text{output}}(r) r dr}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{2\pi \int_0^a P_{\text{output}}(r) r dr}{W_{\text{input}}}, \quad (8)$$

式中  $a$  为光束以光轴为中心的区域半径,  $W_{\text{input}}$  为入射光束总的光功率。目标光束仍然以方形平顶为例,其他参数不变。通过调节  $4f$  系统实现对整形后的光束大小的控制,同时利用(7)、(8)式通过改变区域半径  $a$  的大小得到光束光强均匀性随整形效率变化的曲线,结果示于图 6。其中,4组曲线分别对应通过  $4f$  系统控制得到4种不同大小的光束。从图 6可知,整形后光束 90%的能量集中在了光强起伏均方根(RMS)误差小于 3%的范围内,系统能够得到预期的整形效果;且整形后光束半径从 0.93 mm 到 0.12 mm 均能得到比较理想的整形效果。

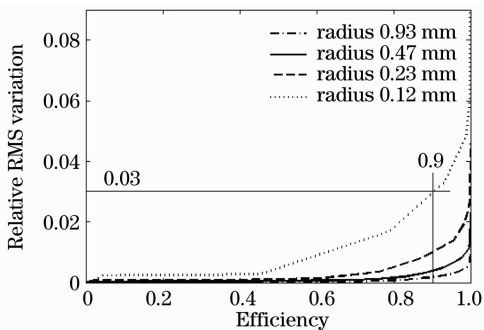


图 6 光强均匀性与整形效率的关系

Fig. 6  $S_E$  of shaped beams with different  $\eta$

## 4 结 论

光束整形是提高激光与物质相互作用效率的一个重要手段。传统的采用静态器件进行光束整形的系统有环境适应性差等局限性。基于 SPGD 算法

的传统光束整形方法,其整形效果较大程度地受到目标光束口径的影响。本文提出了一种基于 SPGD 算法的新型光束整形方法。结果表明,设计的整形系统可以有效地实现无波前畸变光束和存在波前畸变光束的光束整形,该方法在实际需要的目标光束和最佳目标光束尺寸相差较大的范围内均能得到较为理想的整形效果,具有更好的适应性和实用性。

## 参 考 文 献

- 1 H. Kogelnik, T. Li. Laser beams and resonators[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(10): 1550~1567
- 2 R. Sacks, J. Auerbach, E. Bliss *et al.*. Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 344~354
- 3 J. W. Oglund. Mirror system for uniform beam transformation in high-power annular lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 2917
- 4 D. Shafer. Gaussian to flat-top intensity distributing lens[J]. *Opt. Laser Technol.*, 1982, **14**(3): 159~160
- 5 N. C. Roberts. Multilevel computer-generated holograms with separable phase functions for beam shaping[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(17): 3198~3200
- 6 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Controlling focal profile of He-Ne laser beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 581~586  
曾志革, 凌 宁, 姜文汉. He-Ne 激光束的焦斑形态控制[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(4): 581~586
- 7 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Investigation of fitting capability of active mirror for controlling ICF's focal profile[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(1): 1~5  
曾志革, 凌 宁, 姜文汉. 用于 ICF 焦斑形态控制的能动反射镜拟合波面能力研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(1): 1~5
- 8 K. Nemoto, T. Fujii, N. Goto *et al.*. Transformation of a laser beam intensity profile by a deformable mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 168~170
- 9 Ping Yang, Yuan Liu, Wei Yang *et al.*. An adaptive laser beam shaping technique based on a genetic algorithm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 497~500
- 10 J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 5488~5499
- 11 Yang Huizhen. The Development and Application of the AO without a Wave-Front Sensor on Stochastic Parallel Gradient Descent Control Algorithm[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 90~95  
杨慧珍. 无波前探测自适应光学随机并行优化控制算法及其应用研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008. 90~95
- 12 Haotong Ma, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Near-diffraction-limited flattop laser beam adaptively generated by stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2973~2975
- 13 Haotong Ma, Pu Zhou, Xiaolin Wang *et al.*. Near-diffraction-limited annular flattop beam shaping with dual phase only liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8251~8260
- 14 Haotong Ma, Haichuan Zhao, Pu Zhou *et al.*. Adaptive conversion of multimode beam to near-diffraction-limited flattop beam based on dual phase-only liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 27723~27730