

文章编号 1004-924X(2018)06-1322-08

## 基于单压电变形镜的可控环形焦斑整形

马剑强\*, 李 艳, 喻奇志, 杨宗峰

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为了实现可控环形焦斑的整形, 提出了一套基于单压电变形镜的整形方法。首先结合波前衍射理论和随机并行梯度下降算法模拟迭代出环形焦斑整形所需的调制相位, 进而利用波前传感器探测光束的波前信息, 控制变形镜重构目标光斑对应的调制相位, 实现聚焦光斑的整形。搭建了一套基于 62 单元单压电变形镜的光斑整形实验平台, 采用焦平面上的 CCD 记录远场聚焦光斑。实验结果表明, 该方法实现了对不同直径(0.32, 0.4, 0.6 mm)和宽度(0.05, 0.08, 0.1 mm)环形焦斑的整形, 可有效应用于激光束整形。

**关键词:** 自适应光学; 光束整形; 单压电变形镜; 泽尼克多项式; 随机并行梯度下降算法

**中图分类号:** TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1322

## Generation of tunable annular focal spot using unimorph deformable mirrors

MA Jian-qiang\*, LI Yan, YU Qi-zhi, YANG Zong-feng

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

\* Corresponding author, E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

**Abstract:** In order to generate a tunable annular focal spot, a laser beam shaping method using a unimorph deformable mirror was proposed. The wavefront phase used for generating a target annular focal spot was simulated iteratively by combining diffraction theory and the stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm (SPGD). The wavefront phase was then reproduced using a deformable mirror with the feedback of the measured wavefront obtained from a wavefront sensor to realize the shaping of the focal spot. A beam shaping system based on a unimorph deformable mirror with 62 actuators was established. The far-field focal spot was measured using a Charge Coupled Device (CCD) placed at the focal plane of the system. Annular focal spots with different diameters (0.32 mm, 0.4 mm, and 0.6 mm) and widths (0.05 mm, 0.08 mm, and 0.1 mm) were generated experimentally based on the proposed method. This demonstrates that the proposed method is suitable for laser beam shaping.

**Key words:** adaptive optics; beam shaping; unimorph deformable mirror; Zernike polynomial; stochastic parallel gradient descent algorithm

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-12-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51505238); 浙江省公益技术研究(No. LGF18E050001); 宁波市自然科学基金资助项目(No. 2017A610078)

## 1 引言

光束整形技术可调整光束的空间分布,获得特定光强分布的光束或者聚焦光斑,在激光加工、激光核聚变及光学成像系统中具有重要的应用价值<sup>[1-2]</sup>。目前,光束整形技术主要基于静态光学元件<sup>[3-4]</sup>和自适应光学<sup>[5-6]</sup>。前者整形参数固定,只能输出特定的光强分布,灵活性差,易受系统像差的影响<sup>[3-4]</sup>。后者以变形镜(Deformable Mirror, DM)作为核心器件,其镜面形貌可以根据实际情况实时改变<sup>[7]</sup>,构造光束整形所需的波前相位,适应性强,具有较大应用潜力,因此成为近年来的研究热点。余湛<sup>[8]</sup>等采用模拟退火算法和纯相位液晶空间光调制器,对高斯光束整形为近平顶光束进行了模拟仿真。雷翔<sup>[9]</sup>等采用随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法和 20 单元双压电变形镜优化聚焦光斑的质心光强,提升了聚焦光斑的能量集中度。刘磊<sup>[10]</sup>等以聚焦光斑半径、形心环围能量比和质心环围能量比为优化目标,对 SPGD 算法的速度和整形效果进行了实验分析。曾志革<sup>[11]</sup>等结合光学几何变换法及能量守恒定律计算调制目标光斑所需的相位,通过 37 单元变形镜拟合面形,将高斯光

$$U_f(x, y) = -\frac{j}{\lambda f} \exp(jkf) \exp\left[j \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \times \iint U_{in}(x_0, y_0) \exp[j\phi(x_0, y_0)] \exp\left[-j \frac{k}{f}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中: $U_{in}(x_0, y_0)$ 为入射激光束的复振幅, $(x_0, y_0)$ 表示近场坐标, $(x, y)$ 表示远场焦平面坐标, $\lambda$ 表示波长, $f$ 表示聚焦透镜焦距, $k=2\pi/\lambda$ 表示波数, $\phi(x_0, y_0)$ 为相位校正器的调制相位。

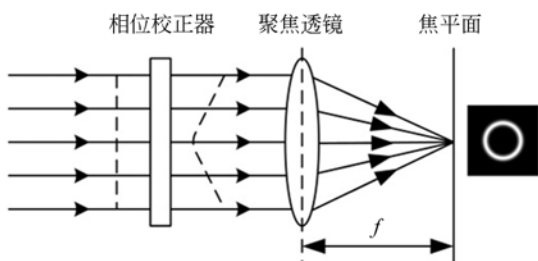


图 1 相位调制光束整形原理

Fig. 1 Principle of beam shaping based on phase modulation

束转换为近似均匀强度分布的方形焦斑。Feng<sup>[12]</sup>等结合能量守恒定律与稳相法计算所需相位,基于双变形镜系统对方形焦斑整形进行了模拟仿真。Sheldakova<sup>[13]</sup>等利用爬山法迭代出目标光场所需的波前相位,采用 48 单元双压电变形镜初步实现了环形焦斑的整形。Brousseau<sup>[14]</sup>等采用 91 单元磁液变形镜重构锥形相位获得环形焦斑,通过改变锥度控制环形焦斑的直径,但无法调节环形焦斑的宽度及进行其他形状焦斑的整形。

本文提出一种可控环形焦斑的整形方法,首先结合光波衍射理论和 SPGD 算法迭代出所需的波前相位,进而以光束波前信息为反馈控制 62 单元单压电变形镜重构所需的波前相位,获得了直径与宽度可控的环形聚焦光斑。

## 2 相位调制聚焦光斑原理

基于相位调制激光束聚焦光斑的原理如图 1 所示,入射光束(通常为平行光)经过相位校正器调制之后,再经过透镜聚焦可得到整形后的聚焦光斑。根据衍射理论,透镜对光束的聚焦在数学上表现为傅里叶变换,因此焦平面处光场的复振幅  $U_f(x, y)$  可表示为<sup>[15]</sup>:

焦平面处的光强分布  $I_f(x, y)$  可表示为:

$$I_f(x, y) = |U_f(x, y)|^2. \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可知,对确定的光束整形系统,若要在远场焦面获取特定形状与能量分布的光强,可通过改变入射光束的相位为目标光束对应的近场调制相位  $\phi(x_0, y_0)$  即可实现光束整形。

## 3 基于 SPGD 算法的调制相位求解

### 3.1 SPGD 迭代算法

SPGD 算法是一种利用性能指标的变化量和控制参数的变化量对控制参数的梯度进行估计,通过迭代在该梯度方向上进行搜索,最终找到性能指标极值的优化算法,在自适应光学中具有重要的应用前景<sup>[6,9-10]</sup>。波前相位可采用 Zernike 多

项式来表示,因此只需求解出 Zernike 多项式系数就可得到调制相位。基于 Zernike 模式的 SPGD 算法的实施流程如图 2 所示。设第  $k$  次调制相位为  $\phi^{(k)} = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_N)$ , 其中  $z_1, z_2, \dots, z_N$  表示 Zernike 多项式系数。第  $k$  次迭代时,首先生成服从伯努利分布的小幅随机扰动向量  $\Delta\phi^{(k)} = (\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \dots, \Delta z_N)$ 。对控制信号分别施加正负随机扰动  $\Delta\phi^{(k)}$  和  $-\Delta\phi^{(k)}$ , 根据式(1)和式(2)计算远场焦斑的光强分布。进而计算相应的性能指标  $J$ , 得到梯度估计值  $\Delta J^{(k)}$ , 分布表示为  $J_+^{(k)} = J(\phi^{(k)} + \Delta\phi^{(k)})$ 、 $J_-^{(k)} = J(\phi^{(k)} - \Delta\phi^{(k)})$  及  $\Delta J^{(k)} = J_+^{(k)} - J_-^{(k)}$ 。然后使用性能评价指标的变化量  $\Delta J^{(k)}$  和  $\Delta\phi^{(k)}$  随机扰动来估计第  $k$  次梯度, 求出第  $k+1$  次的调制相位:

$$\phi^{(k+1)} = \phi^{(k)} + \gamma \Delta J^{(k)} \Delta\phi^{(k)}, \quad (3)$$

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。

SPGD 算法的优化效果在一定程度上依赖系统性能指标的选取, 为有效获取最优调制相位, 需要建立衡量远场光强与目标光强相似度的性能评价指标体系<sup>[10]</sup>。系统性能指标的选取根据具体应用确定, 本研究以输出光束  $I_{\text{out}}(x, y)$  与目标光束  $I_{\text{target}}(x, y)$  的光强分布差的平方和的平方根作为近场光强整形性能的评价函数, 其表达式为:

$$J = \sqrt{\sum_x \sum_y (I_{\text{out}}(x, y) - I_{\text{target}}(x, y))^2}, \quad (4)$$

其中  $J$  反映实际输出光强分布与目标光强分布的偏差。

### 3.2 环形焦斑整形仿真

本研究针对环形焦斑进行整形, 环形焦斑的数学表达式如下:

$$I_{\text{target}}(x, y) = \exp\left(-\left(\sqrt{x^2 + y^2} - \frac{D}{2}\right)^2 \times \frac{8}{H^2}\right) + \exp\left(-\left(\sqrt{x^2 + y^2} + \frac{D}{2}\right) \times \frac{8}{H^2}\right), \quad (5)$$

式中:  $D$  为圆环直径,  $H$  为圆环宽度。值得指出的是, 该方法不局限于环形焦斑, 根据设定不同的目标光强分布可对其他形状焦斑进行整形。

假设入射光束为无波前畸变的平行光, 光束波长为 635 nm, 光束直径为 4 mm, 聚焦透镜焦距为 200 mm, 目标光斑的直径为 0.4 mm, 环宽 0.08 mm。由于圆环形焦斑在结构上具有完全的

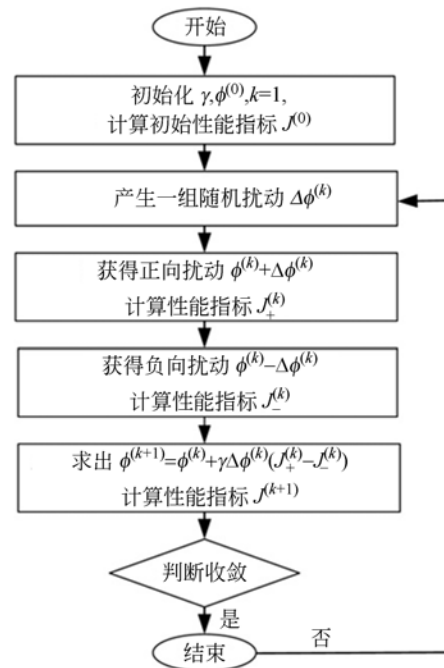
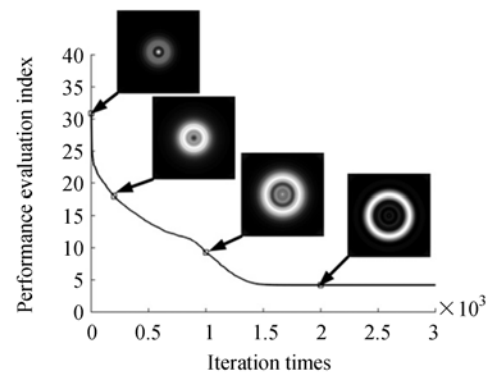


图 2 SPGD 算法流程图

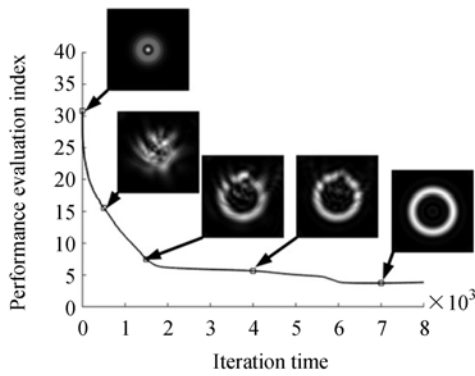
Fig. 2 Flow chart of SPGD algorithm

对称性, 根据光斑整形原理可知, 调制相位也具有完全的对称性。Zernike 多项式的第 4 项(离焦)、第 12 项(一阶球差)、第 24 项(二阶球差)、第 40 项(三阶球差)具有完全对称性, 因此以这 4 项 Zernike 多项式的系数作为控制变量, 根据图 2 所示 SPGD 算法对环形焦斑进行迭代仿真。作为对比, 这里也采用了全部前 65 项 Zernike 多项式进行迭代模拟。起始 Zernike 系数为  $Z_4 = 0.25 \mu\text{m}$ , 其余为零。优化过程如图 3 所示, 随着迭代次数的增加, 调制后的焦斑越来越接近目标光斑。两种方法最后获得的环形焦斑形状基本一样, 性能评价指标都降到 5 左右, 但采用第 4, 12, 24, 40



(a) 4 项对称的 Zernike 多项式

(a) Fourth symmetrical Zernike shapes

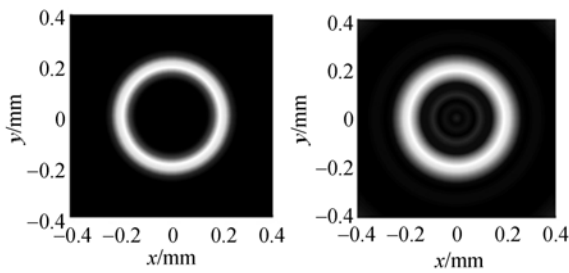


(b) 65 项 Zernike 多项式  
(b) Sixty-fifth Zernike shapes

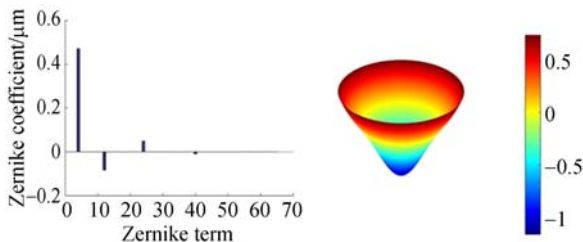
图 3 基于 SPGD 算法的环形焦斑整形仿真迭代过程  
Fig. 3 Simulated generation process of annular focal spot using SPGD algorithm

项 Zernike 系数作为控制变量的收敛速度较快, 约是采用 65 项系数的 5 倍。

图 4 为以第 4, 12, 24, 40 项 Zernike 系数作为控制变量所得的远场焦斑及对应的调制相位。可知仿真焦斑与目标焦斑相符, 但存在轻微差异, 如仿真焦斑环内有轻微的衍射环, 而设置的目标环形焦斑未考虑衍射效应。并且仿真只用了第 4, 12, 24, 40 项 Zernike 多项式, 要使仿真更接近目标需使用更多 Zernike 多项式。环形焦斑整形



(a) 目标环形焦斑 (b) 仿真焦斑  
(a) Annular focal spot of target (b) Simulated focal spot



(c) 相位的 Zernike 系数 (d) 相位 3D 形貌  
(c) Zernike coefficient expansion (d) 3D profile of wavefront

图 4 环形焦斑仿真优化结果

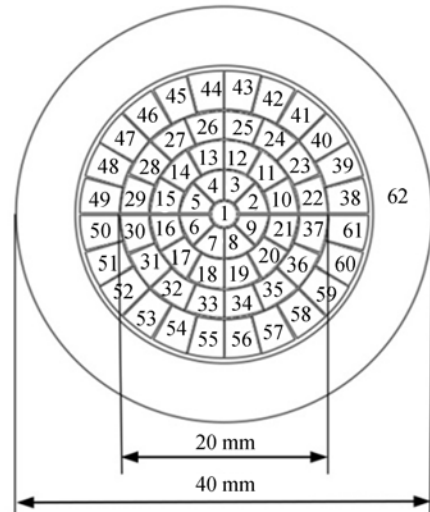
Fig. 4 Simulated result of annular focal spot optimization

所需相位的高阶项 Zernike 系数较小, 相位可近似为圆锥形, 这与 Brousseau<sup>[14]</sup> 的研究结果基本一致。

## 4 单压电变形镜与实验平台

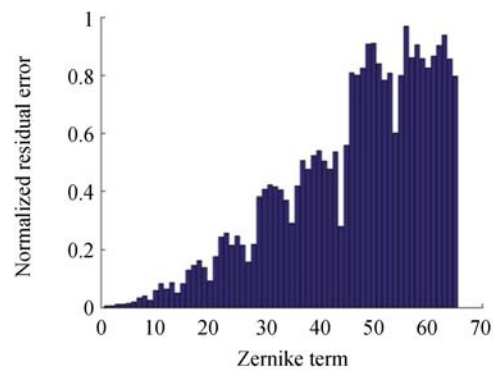
### 4.1 单压电变形镜

本实验采用 62 单元单压电片变形镜进行光束整形研究<sup>[16-17]</sup>, 该变形镜由 200 μm 厚的硅弹性层和 100 μm 厚的压电陶瓷层组成。电极分布如图 5(a) 所示, 由 1 个环形电极和 61 个环形排列的扇形电极组成, 有效口径为 20 mm。对电极施加电压时, 压电片与弹性层的共同作用促使变形镜在有效口径内重构出目标面形。根据实验测



(a) 变形镜电极分布

(a) Electrode pattern of DM



(b) 对 Zernike 多项式的仿真重构能力

(b) Simulated reconstructed capability of Zernike modes

图 5 62 单元单压电变形镜

Fig. 5 Unimorph DM with 62 actuators

得的影响函数矩阵,对前 65 项 Zernike 多项式面形进行仿真重构,各项面形的归一化残余误差如图 5(b) 所示。该变形镜对第 4, 12, 24, 40 项 Zernike 多项式重构的归一化残余误差分别约为 1%、6%、21%、54%,表明对第 4, 12, 24 项的重构能力较强,对第 40 项具有一定的重构能力。

## 4.2 实验装置

激光束整形实验系统如图 6 所示,激光器采用 Thorlabs 的 HLS635 半导体激光器,光束波长为 635 nm,通过光纤耦合输出。输出的激光束经过焦距为 120 mm 的凸透镜准直,50% 光束透过分光棱镜到达变形镜镜面。光束经过镜面相位调制后再经过分光棱镜反射到由两个凸透镜组成的缩束系统(缩束比为 0.2)。缩束后的光束经过半透半反镜,50% 光束由波前传感器(Thorlabs WFS150-7AR)接收,另外 50% 光束经过焦距为 200 mm 的聚焦透镜聚焦,其远场光强分布由 CCD 相机(大恒 MER-125-30UM-L,分辨率为  $1292 \times 964$ ,像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ )接收并成像。

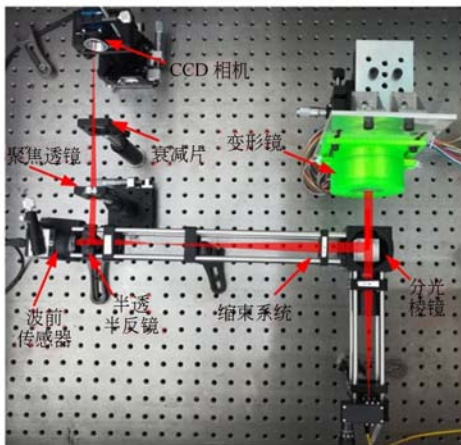


图 6 激光束整形实验平台

Fig. 6 Experimental platform of laser beam shaping

## 5 实验与分析

由于实验平台和变形镜存在初始像差,首先利用波前传感器实时测量像差,并通过变形镜对系统进行闭环校正<sup>[17]</sup>。系统初始像差校正前后 CCD 测得的光强分布如图 7 所示。校正前的光强值较小且光斑发散,说明整个测试系统像差较

大。校正后光斑能量集中度很高,接近艾里斑,其光斑直径约为 18 pixel(折合  $67.5 \mu\text{m}$ )。根据艾里斑公式  $D=2.44\lambda f/d$ ,可计算出 CCD 相机上的理想光斑直径约为  $75 \mu\text{m}$ (约 20 pixel),与实验结果基本一致。

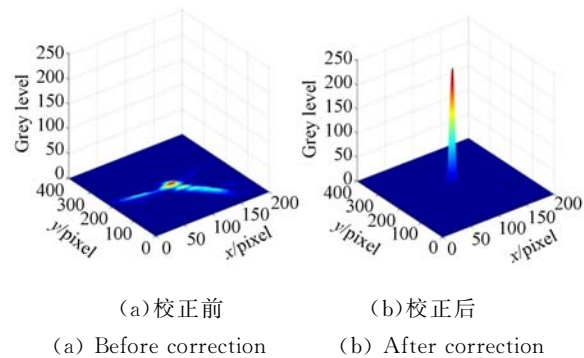
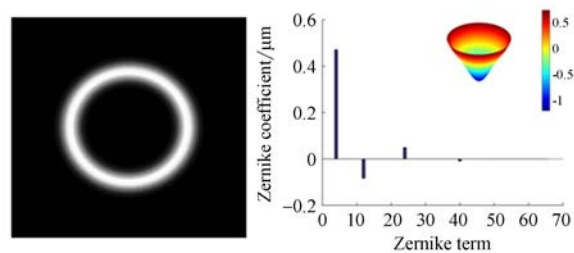


图 7 系统初始像差校正前后 CCD 测得的远场焦斑

Fig. 7 Far-field focus measured by CCD before and after correction of initial aberrations

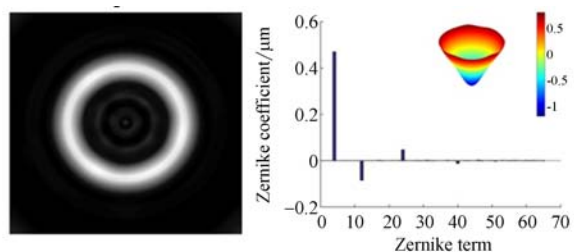
图 8 为目标环形焦斑的仿真整形与实验整形结果。经过变形镜整形,CCD 上获得了近似圆环的聚焦光斑。从仿真结果看,62 单元变形镜能够重构出较理想的环形光斑,但实测焦斑的周围出现杂散光,且圆环上的光强分布并不均匀,这与变形镜仿真整形结果有所偏差。通过波前传感器测得的波前相位模拟聚焦如图 8(g) 所示,在环形焦斑的内部及外部都出现了轻微的杂散光,环形焦斑的亮度也略微起伏,与实测情况基本相符。将波前仿真和实测的焦斑轮廓与目标焦斑轮廓进行对比,结果如图 8(h) 所示,三者焦斑半径大小基本一致,但仿真与实验生成的环形焦斑的半高全宽略大于目标光斑的半高全宽。实验结果与理论存在一定的误差,可能由于波前传感器和 CCD 在最后一级不是同光路的,无法准确获得最后一级聚焦透镜的光学误差,这将引入一定的测量误差;其次受变形镜自身重构能力的影响,高阶像差校正能力下降,如第 40 项的重构能力为 54%。图 8(f) 显示波前传感器测得 50 项以上仍有少量残余误差。为获得更好的整形效果,可以在变形镜内部再增加一圈致动器,将致动器数目提高到 100 以上。

为验证环形焦斑的可控性,对不同直径(0.32, 0.4, 0.6 mm)和宽度(0.05, 0.08, 0.1 mm)的环形焦斑进行实验整形,结果如图 9 所



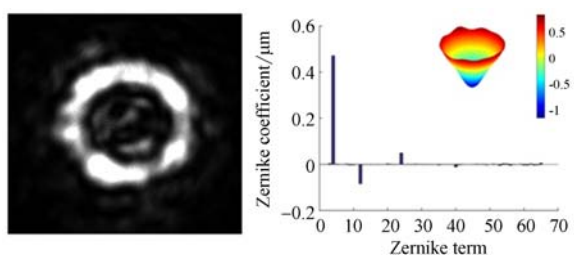
(a) 目标  
(a) Target

(b) 要求的相位  
(b) Desired wavefront



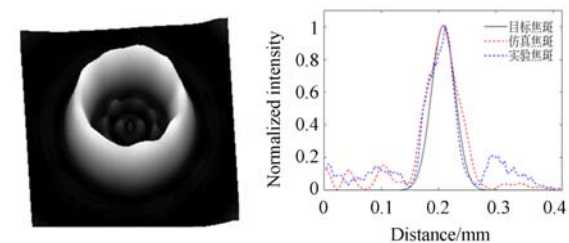
(c) 变形镜仿真  
(c) Simulation using DM

(d) 变形镜仿真相位  
(d) Simulated wavefront using DM



(e) 实测  
(e) Measurement

(f) 实测相位  
(f) Measured wavefront



(g) 波前传感器仿真

(h) 焦斑轮廓比较

(g) Simulation using WFS (h) Comparison of focal profile

图 8 环形焦斑整形实验

Fig. 8 Experimental generation of annular focal spot

示。由整形结果可知,对于小半径的目标环形光斑,实验整形后焦斑形态质量较好。随着环形焦

斑半径的增大,实际光斑出现不连续的现象逐渐明显。对于相同半径的圆环,宽度小的焦斑要比宽度大的环的整形效果好。随着目标圆环半径或者圆环宽度的增大,所需波前相位幅值加大,变形镜难以完全重构出理论调制相位,要获得更好的整形效果,需增加变形镜的致动器数目以提高其重构能力。

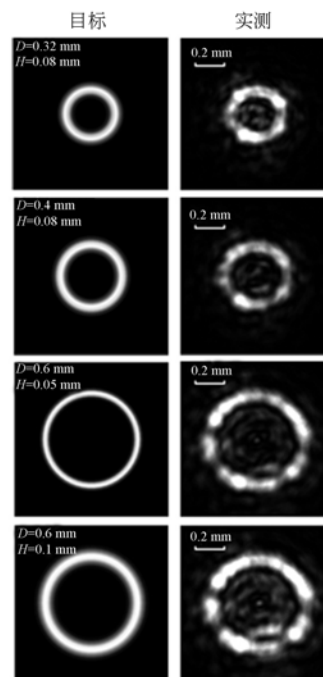


图 9 不同尺寸的环形焦斑整形

Fig. 9 Generation of annular focal spots with different sizes

## 6 结 论

本文提出了一种直径和宽度可控的环形焦斑整形方法,结合波前衍射理论和 SPGD 算法模拟迭代出了目标环形焦斑所需的调制相位,进而搭建了一套光斑整形实验平台。该平台利用波前传感器探测光束的波前相位信息,控制 62 单元单压电变形镜重构目标光斑所需的调制相位,并采用 CCD 记录远场聚焦光斑。实验实现了对不同直径(0.32, 0.4, 0.6 mm)和宽度(0.05, 0.08, 0.1 mm)环形焦斑的整形。由于变形镜自身重构能力及系统像差的影响,实际焦斑与目标焦斑还有一定的偏差,需要进一步研究光斑整形质量的提高方法。本文提出的光斑整形方法不局限于环形焦斑,还可对其他形状的目标焦斑进行整形。

## 参考文献:

- [1] WLODARCZYK K L, BRYCE E, SCHWARTZ N, *et al.*. Scalable stacked array piezoelectric deformable mirror for astronomy and laser processing applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(2): 024502.
- [2] 刘岚, 张海涛, 陈子阳, 等. 贝塞尔高斯光束经菲涅尔波带片产生特殊聚焦光强分布[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1491-1495.
- LIU L, ZHANG H T, CHEN Z Y, *et al.*. Special intensity distribution by diffraction of Bessel-Gauss beams with Fresnel zone plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1491-1495. (in Chinese)
- [3] 马学, 李琦, 鲁建业. 太赫兹高斯光束整形环形光束[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 198-205.
- MA X, LI Q, LU J Y. Gaussian beam shaping terahertz Gaussian beam to ring beam[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 198-205. (in Chinese)
- [4] HOFFNAGLE J A, JEFFERSON C M. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flat-top beam[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5488-5499.
- [5] YANG P, LIU Y, YANG W, *et al.*. An adaptive laser beam shaping technique based on a genetic algorithm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(9): 497-500.
- [6] 蒋鹏志, 马浩统, 袁凌峰, 等. 基于并行梯度下降算法的自适应任意口径光束整形[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 37-41.
- JIANG P ZH, MA H T, YUAN L F, *et al.*. Shaped beam of arbitrary size with adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 37-41. (in Chinese)
- [7] 林旭东, 刘欣悦, 王帅, 等. 桌面 97 单元自适应光学系统性能测试[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1272-1280.
- LIN X D, LIU X Y, WANG SH, *et al.*. Performance testing of a desk-top 97-element adaptive optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1272-1280. (in Chinese)
- [8] 余湛, 马浩统, 杜少军. 基于模拟退火算法的自适应近场光束整形[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 155-159.
- YU ZH, MA H T, DU SH J. Adaptive near-field beam shaping based on simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 155-159. (in Chinese)
- [9] LEI X, XU B, YANG P, *et al.*. Beam cleanup of a 532-nm pulsed solid-state laser using a bimorph mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 44-47.
- [10] 刘磊, 郭劲, 赵帅, 等. 随机并行梯度下降算法在激光束整形中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 260-266.
- LIU L, GUO J, ZHAO SH, *et al.*. Application of stochastic parallel gradient descent algorithm in laser beam shaping[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 260-266. (in Chinese)
- [11] ZENG ZH G, LING N, JIANG W H. The investigation of controlling laser focal profile by deformable mirror and wave-front sensor[J]. *Journal of Modern Optics*, 1999, 46(2): 341-348.
- [12] FENG Z, HUANG L, GONG M. Focal-plane irradiance tailoring using the concept of Woofer-Tweeter deformable mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 8871-8879.
- [13] SHELDAKOVA J, KUDRYASHOV A, LYLOVA A. Formation of the desired light intensity distribution on the target with bimorph deformable mirror[J]. *SPIE*, 2015, 9343(1): 95-107.
- [14] BROUSSEAU D, DRAPEAU J, PICH M, *et al.*. Generation of Bessel beams using a magnetic liquid deformable mirror[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4005-4010.
- [15] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier optics* [M]. Roberts and Company Publishers, 2005.

- [16] 刘莹,马剑强,何挺,等. 模拟退火-爬山混合算法用于无波前传感器快速像差校正[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 213-219.  
LIU Y, MA J Q, HE T, *et al.*. Hybrid simulated annealing-hill climbing algorithm for fast aberration correction without wavefront sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 213-219. (in Chinese)
- [17] MA J Q, CHEN K, CHEN J J, *et al.*. Closed-loop correction and ocular wavefronts compensation of a 62-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 042201.

#### 作者简介:



马剑强(1983—),男,浙江台州人,博士,副教授,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,主要研究方向为压电变形镜与自适应光学。E-mail: ma-jianqiang@nbu.edu.cn



李艳(1992—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事基于压电变形镜的光束整形技术的研究。Email:943469730@qq.com