

内光路系统的缩放模型及其热变形像差的波前预补偿

周 琼 姜宗福 习锋杰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 以内光路系统的原始模型和缩放模型为研究平台,结合热传导方程、热弹性运动方程以及光场的角谱衍射理论,对两个模型中热变形像差及其波前预补偿分别进行了模拟计算。进行波前预补偿前,缩放模型和原始模型的计算结果基本相同,均表明热变形像差主要包括像散项和离焦项,其中,像散项的大小由强激光在反射镜上的入射角度决定;而进行波前预补偿后,缩放模型在镜面热变形和光学特性等各方面的结果均能与原始模型保持吻合,且两个模型之间能够实现很好的数值反演。

关键词 内光路系统;缩放模型;热变形像差;波前预补偿

中图分类号 TN012; O439; O343.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0402008

Designing of Scaling Model and Study of Thermal Deformation Compensation for Inner Optical System

Zhou Qiong Jiang Zongfu Xi Fengjie

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

Abstract Original model and scaling model for an inner optical system are designed. Considering angular spectrum diffraction theory of light with heat conduction theory and thermal elastic theory, thermal deformation aberration and wavefront pre-compensation are simulated for both models. The scaling model can be numerically transformed to original model. Thermal deformation aberration is studied to indicate that astigmatism aberration is introduced with incident angle of irradiation laser. Thermal deformations and optical quality in scaling model are similar to results in original model, and the two models can realize good numerical reversion

Key words inner optical system; scaling model; thermal deformation aberration; wavefront pre-compensation

OCIS codes 140.6810; 220.1080; 220.1010; 070.2580; 070.5040

1 引 言

对高能激光系统而言,内光路系统中的反射镜起着引导激光传输的作用,因而需要有极高的反射率,除却被镜面反射的激光能量,反射镜的高反膜层会吸收未被反射的大部分能量,剩余的能量则会透过膜层被反射镜的基底吸收,这些被吸收的能量会使反射镜产生严重的热变形,从而使反射激光的相位失常,最终导致系统整体光学性能变差^[1]。一般而言,可以使用自适应光学系统对入射激光进行波

前预补偿,国内外对自适应光学理论都进行了全面的研究^[1~5],而在实验过程中,高能激光系统操作复杂,需要较多的人力物力,特别地,大尺寸反射镜加工困难,价格昂贵,且受激光参数限制,因此,可以考虑设计内光路系统的缩放模型,使用小尺寸反射镜代替大尺寸反射镜进行实验,通过建立缩放模型与实际系统之间的反演关系,开展对内光路系统的热变形像差及其波前补偿的相关研究。本文结合固体的热弹性理论以及光束的衍射传输理论,设计了缩

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2012-01-04

基金项目: 中国科学院光束控制重点实验室基金(2010LBC003)资助课题。

作者简介: 周 琼(1985—),女,博士研究生,主要从事内光路系统中热变形像差及其波前预补偿等方面的研究。

E-mail: qinqin0416@hotmail.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术及气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

放率为 1/5 的内光路系统缩放模型,通过数值模拟的方法对设计的缩放模型与系统的原始模型进行了计算和对比,并验证了缩放模型设计的准确性。

2 内通道缩放模型

在连续高能激光辐照下,一般采用弱耦合条件下的热传导和热弹性模型描述反射镜的热变形问题^[5],在求解过程中使用准静态假设^[5],基底的体吸收影响相对较小,体热源的影响可以忽略,即在求解过程中仅考虑存在膜层吸收的面热源条件。另外,由于高反膜层厚度远远小于反射镜基底的热扩散长度,因此膜层的热变形可以忽略。基于上述条件,在忽略环境换热系数的情况下,可以得到高能激光辐

表 1 内光路系统的原始模型和缩放模型(反射镜总数 $n=5$)

Table 1 Scaling parameters of original model and scaling model of inner optical system ($n=5$)

| | Radius a /mm | Thickness d /mm | Beam size r_0 /mm | Time t /s | Intensity $I / 10^7$ (W/m ²) | Propagation path z /m |
|----------------|----------------|-------------------|---------------------|-------------|---|----------------------------|
| Scaling model | 100 | 30 | 60 | 25 | 1×10^7 | 2 |
| Original model | 20 | 6 | 12 | 1 | 25×10^7 | 0.08 |

设反射镜的膜层吸收率为 3000×10^{-6} ,基底材料为单晶硅,对于一定边界条件下的热传导方程和热弹性运动方程,使用有限元分析(FEA)方法分别对上述两种模型的单面反射镜热变形进行计算,结果如图 1 所示。可以看出缩放模型的热变形分布与原始模型的结果吻合得很好,说明表 1 中对反射镜的缩放规律是正确的,基于这样的结果,可以进一步研究两种模型中热变形像差对光束质量的影响以及相应的波前预补偿结果,以此验证缩放模型的可靠性。

3 内光路系统的热变形预补偿研究

为了对两种模型的热变形像差预补偿进行研究,有必要对内光路系统中光学传输计算作出说明。由表 1 可以判断两种内光路系统模型的非涅耳数均远大于 1,且不满足傍轴条件,不能简单地用夫琅和费衍射积分或非涅耳衍射积分进行表述,为此,考虑光场在频域的角谱衍射理论^[6],使用快速傅里叶变换(FFT)方法对内光路系统中的光学传输特性进行数值计算。另外,在内光路系统中,尤其是在进行波前补偿后,各个反射镜镜面上的辐照激光状态(强度分布和波前分布)及热变形分布情况都不尽相同,需按照反射镜的实际分布情况,将内光路系统分解为不同的子系统,对高能激光在内光路系统中的传输过程及镜面热变形像差进行跟踪计算。

照下反射镜热变形问题的尺度律以及其热变形与功率密度的线性关系。

当综合考虑真空条件下内通道的光学传输,即忽略内通道的气体热效应时,依据尺度律和波动光学理论,为了保持相同的轴向热变形分布和非涅耳条件,可以建立如表 1 所示的内光路系统缩放模型(缩放率 $c=1/5$)。表 1 中的原始模型可以视作实际的内光路系统,可以看出,入射激光的总功率是保持不变的,因此在进行缩放模型的实验时,可以使用内光路系统的激光源,操作时只需对激光源进行聚焦,将激光光束的截面积减小到 c^2 即可,这样可以减少实验成本,并增加缩放模型与原始模型进行结果反推时的准确性。

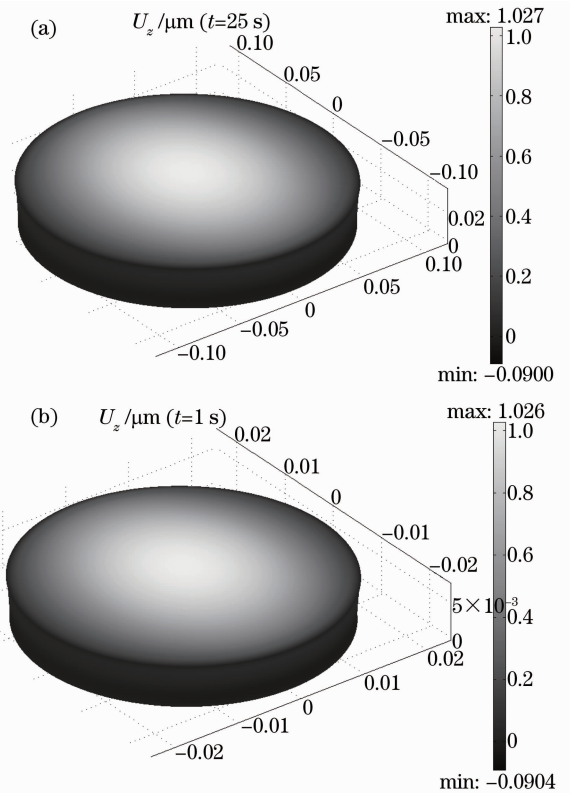


图 1 两种模型中单面反射镜的热变形结果。

(a) 原始模型; (b) 缩放模型

Fig. 1 Deformations of one high-reflecting mirror.

(a) Original model; (b) scaling model

设到达第 n 面反射镜的激光光场分布为 $\tilde{U}_n(x, y)$, 当高能激光由镜面反射时, 镜面热变形对光场的作用可以体现为复振幅变换函数 $T_n(x, y)$ 和入射光场的乘积

$$\tilde{U}_{T_n}(x, y) = \tilde{U}_n(x, y) \times T_n(x, y), \quad (1)$$

则反射光场的角谱分布可以用傅里叶变换得到

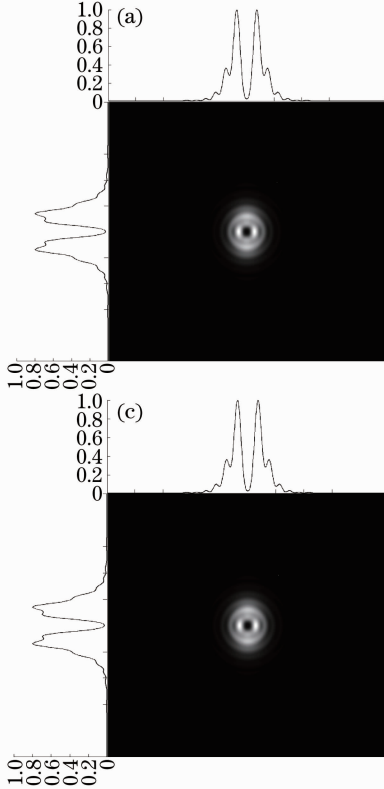
$$A_n(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{\tilde{U}_{T_n}(x, y)\} = \mathcal{F}\{\tilde{U}_n(x, y)T_n(x, y)\}. \quad (2)$$

令第 n 面反射镜到第 $n+1$ 面反射镜间的距离为 z_n , 由衍射的角谱传输理论可以得到, 到达第 $n+1$ 面反射镜时光场的空间频谱分布可以表示为

$$A_{n+1}(f_x, f_y) = A_n(f_x, f_y) \times \exp[ikz_n \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] = \mathcal{F}\{\tilde{U}_n(x, y)T_n(x, y)\} \times \exp[ikz_n \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}], \quad (3)$$

则激光束到达第 $n+1$ 面反射镜时的光场分布可以表示为

$$\tilde{U}_{n+1}(f_x, f_y) = \mathcal{F}^{-1}\{A_{n+1}(f_x, f_y)\} =$$



$$\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{\tilde{U}_n(x, y)T_n(x, y)\} \times \exp[ikz_n \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}]\}. \quad (4)$$

对于第 n 面反射镜而言, $\tilde{U}_n(x, y)$ 已知, 即意味着镜面上的辐照强度分布已知, 因此可以计算得到轴向上(激光传输方向即 z 方向)的镜面热变形分量 $u_{zn}(x, y)$, 以及由此带来的像差 $\Delta\varphi_n(x, y) = k \cdot 2u_{zn}(x, y) \cdot \cos\theta$, 则有

$$T_n(x, y) = \exp[-i\Delta\varphi_n(x, y)], \quad (5)$$

$$\tilde{U}_{n+1}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{\tilde{U}_n(x, y)\exp[-i\Delta\varphi_n(x, y)]\} \times \exp[ikz_n \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}]\}, \quad (6)$$

式中 f_x, f_y 为对应的空间频率, λ 为光场的波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢量值。

为了得到光束质量较好的出射光, 必须针对热变形像差对入射激光进行波前补偿, 补偿相位分布则由补偿前的原始激光在内光路系统中传输的热变形决定, 其出射激光的光场分布 $\tilde{U}_o(x, y)$ 可以表示为

$$\tilde{U}_o(x, y) = U_o(x, y) \cdot \exp[\phi_o(x, y)], \quad (7)$$

式中 $U_o(x, y)$ 为光场的振幅分布, $\phi_o(x, y)$ 为相位

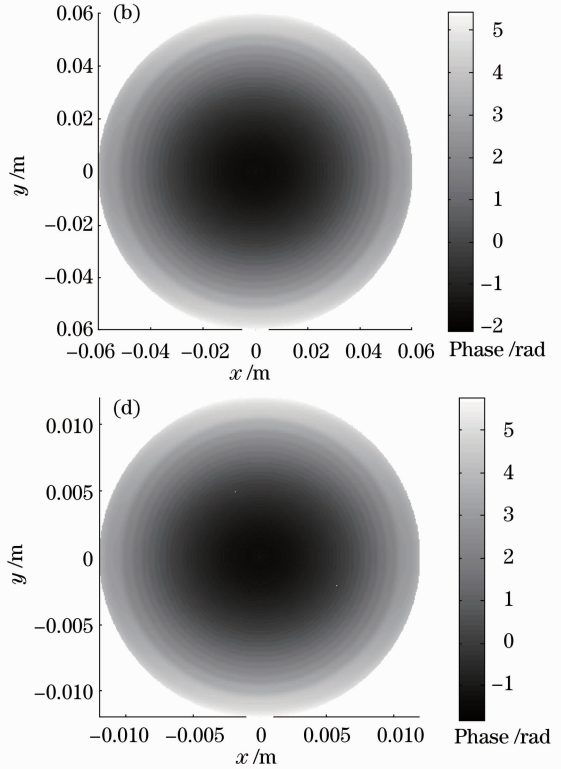


图 2 两种内光路系统模型中出射光的归一化远场强度分布和波前分布。(a)原始模型出射光的远场强度分布;(b)原始模型出射光的波前分布;(c)缩放模型出射光的远场强度分布;(d)缩放模型出射光的波前分布。其中,原始模型和缩放模型出射光的光束传输因子(BPF)值分别为 0.1334 和 0.1337

Fig.2 Distribution of normalized intensity and wavefront of outgoing laser. (a) Intensity in far field of original model; (b) wavefront of original model; (c) intensity in far field of scaling model; (d) wavefront of scaling model. Beam propagation factor (BPF) values of outgoing laser of original model and scaling model are 0.1334 and 0.1337, respectively

分布。补偿相位则由出射激光的共轭相位决定,即为 $-i \cdot \phi_0(x, y)$, 而同样的,进行波前补偿后内光路系统的激光传输及其反射镜的热变形均可以由上述方法进行计算,并考察波前预补偿对出射激光远场光束质量的影响。

4 数值计算结果

4.1 相位补偿前系统的光学特性及热变形像差

为了对缩放模型进行评估,使用光束传输因子(BPF)^[7]和 Zernike 像差函数^[6]评价系统的远场光束质量和热变形像差。图 2 分别给出了原始模型[(a),(b)]和缩放模型[(c),(d)]中内光路系统的输出激光在远场的归一化强度分布和波前分布。表 2 则分别给出了两个系统模型中部分的 Zernike 多项

表 2 热变形像差的 Zernike 多项式系数

Table 2 Zernike coefficients of thermal deformation aberration

| | BPF | $A_{1,-1}$ | $A_{1,1}$ | $A_{2,-2}$ | $A_{2,0}$ | $A_{2,2}$ | $A_{3,-3}$ | $A_{3,-1}$ | $A_{3,3}$ |
|----------------|--------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| Original model | 0.1334 | -0.015 | 0 | -1.013 | 3.034 | -0.003 | 0.009 | -0.003 | 0 |
| Scaling model | 0.1337 | 0.002 | 0 | -1.026 | 3.037 | 0.001 | 0 | 0 | 0 |

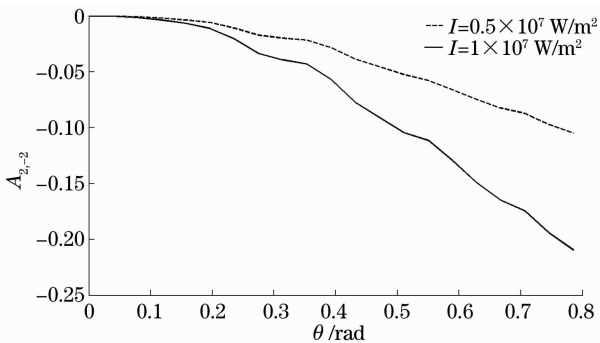


图 3 镜面反射光的像散像差 $A_{2,-2}$ 与激光入射角 θ 的关系

Fig. 3 Astigmatism aberration $A_{2,-2}$ of reflecting laser as function of incident angle for a variety of cases

4.2 相位补偿后系统的光学特性

对内光路系统进行波前预补偿后,系统的光学特性会有较大的改善,对缩放模型而言,进行相位补偿后系统光学特性的改善最好能反映出实际系统的真实情况^[8~12]。对此,分别对内光路系统的原始模型和缩放模型进行了热变形波前补偿的数值模拟,输出光束的远场归一化强度和波前分布见图 4。可以看到,两种模型的结果吻合得很好,在波前补偿后两者的光学特性均得到了很好的改善,且出射光波前的均方根值(RMS)均很小,分别为 0.097 rad 和 0.096 rad,表明缩放模型在进行内光路系统的热变形像差补偿研究时的结论是可信的,且与原始模型之间能保持空间对应的数值反演关系。

式系数及 BPF 值。内光路系统的缩放模型与原始模型的光学特性能够很好吻合,其光束质量的下降主要是由像散像差($A_{2,-2}$)和离焦像差($A_{2,0}$)造成的。分析认为离焦像差的产生体现了热变形的负透镜效应,而像散则是由强激光在反射镜上的入射角度决定的。忽略反射率的变化,图 3 给出了单面反射镜上不同强度的激光入射角度与反射激光像散像差的关系,可以看出,随着入射角度的增加,像散像差迅速增大,且单面反射镜的像散像差约为 -0.2 ($I=1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$),即为总像散像差的 1/5,由此可以判断,对由 n 面反射镜组成的内光路系统而言,在进行波前补偿前,其总的镜面变形像差可以视为单面镜面变形像差的 n 倍(文中 $n=5$)。

5 结 论

依据热弹性理论和波动光学理论,设计了内光路系统的原始模型和缩放模型,使用 FEA 方法计算得到了轴向的反射镜镜面热变形分布,并结合光场的角谱衍射理论,对系统热变形像差及其波前预补偿进行了研究,并对缩放模型的可靠性进行了探讨。波前补偿前后的模拟结果均证明缩放模型的设计是合理、可行的方案,且缩放模型和原始模型之间实现了数值反演,因此,可以利用缩放模型对内光路系统的镜面热变形像差及其预补偿开展实验研究,其数据结果对实际系统的设计及相关研究的开展都有很好的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Robert K. Tyson. Principles of Adaptive Optics[M]. San Diego: Academic Press, 1997
- 2 H. W. Babcock. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1953, **65**: 229~236
- 3 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Principles of Adaptive Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996
- 4 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- 5 Jiang Wenhan. Adaptive optics and active optics[J]. *Physics*, 1997, **26**(2): 73~79
- 6 姜文汉. 自适应光学与能动光学[J]. *物理*, 1997, **26**(2): 73~79
- 7 Takeachi Yoichivo. Heat Stress[M]. Guo Tingwei, Li Anding Transl. Beijing: Science Press, 1977
- 8 竹内洋一郎. 热应力[M]. 郭廷玮, 李安定译. 北京: 科学出版

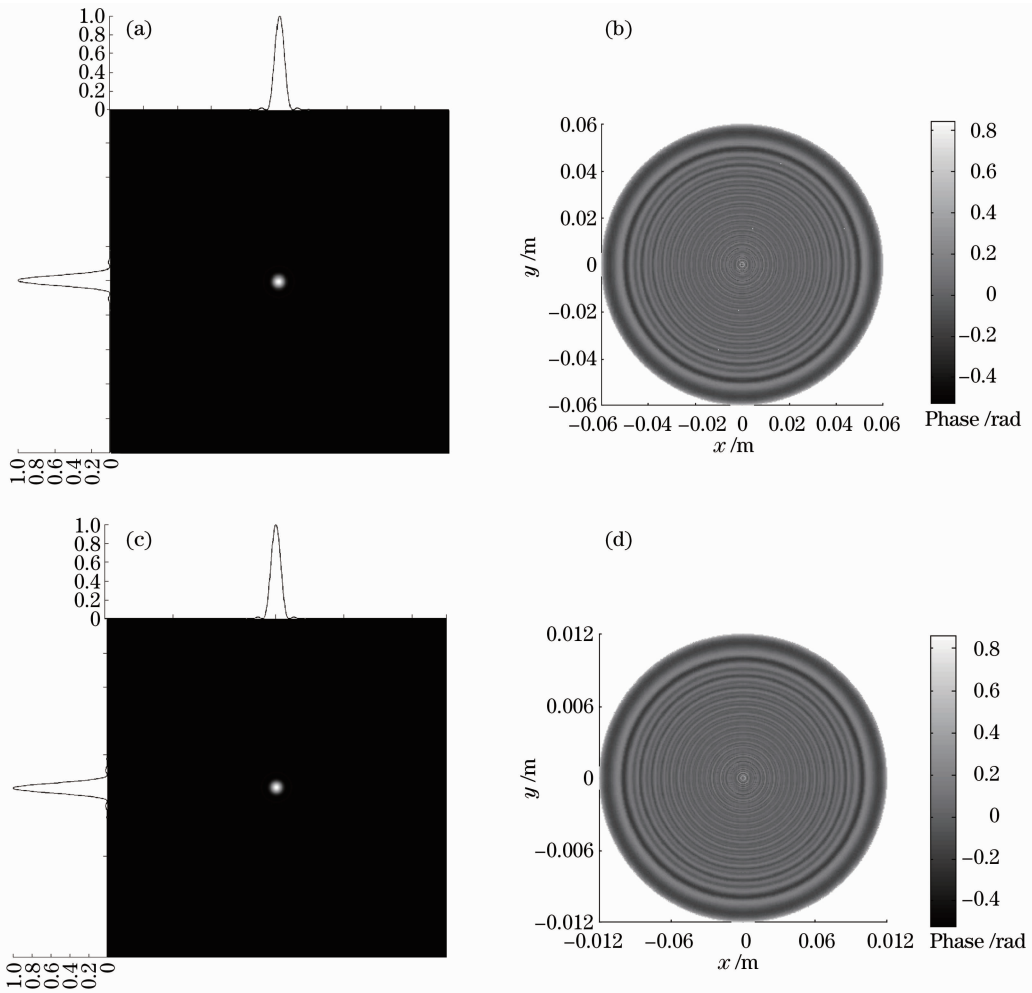


图 4 波前预补偿后两种内光路系统模型中出射光的归一化远场强度分布和波前分布。(a)原始模型出射光的远场强度分布;(b)原始模型出射光的波前分布;(c)缩放模型出射光的远场强度分布;(d)缩放模型出射光的波前分布

Fig. 4 Distribution of normalized intensity and wavefront of outgoing laser after wavefront pre-compensation. (a) Intensity in far field of original model; (b) wavefront of original model; (c) intensity in far field of scaling model; (d) wavefront of scaling model

社, 1977

6 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999

7 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaozun. 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

8 Darryl P. Greenwood, Charles A. Primmerman. Adaptive optics research at Lincoln laboratory [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, **5**(1): 3~24

9 Liu Weihong, Rao Peng, Hua Wenguang. Effect of thermal distortion of Si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(10): 1615~1619

刘文广, 饶 鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(10): 1615~1619

10 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese

Academy of Sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106

姜文汉, 张雨东, 饶长辉等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106

11 He Yuanxing, Jiang Wenhan, Li Xinyang. Far-field propagation of focused Gaussian beam through atmospheric turbulence and effects of adaptive phase compensation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0312001

贺元兴, 姜文汉, 李新阳. 聚焦高斯光束在湍流大气中的远场传输及相位补偿效果[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0312001

12 Li Min, Chen Bo, Li Xingyang *et al.*. Close-loop experiment of an adaptive optics system on the dynamic aberrations based on linear phase retrieval technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 954~958

李 敏, 陈 波, 李新阳等. 基于线性相位反演技术的自适应光学动态像差校正闭环实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 954~958

栏目编辑: 谢 婧