

应用离子束修正大面形误差光学元件

马占龙 隋永新

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 为了获得超高精度面形的光学元件并验证离子束的修正能力,对应用离子束修正大面形误差光学元件的问题进行了实验研究。通过改变离子源光阑尺寸的方式获得了不同束径的离子束去除函数,并对一直径为 $\phi 101$ mm、初始面形峰谷(PV)值为 417.554 nm、均方根(RMS)值为 104.743 nm 的熔石英平面镜进行了离子束修形实验。利用 $\phi 10$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 2$ mm 光阑离子源的组合,进行了 12 次迭代修形,最终获得了 PV 值为 10.843 nm、RMS 值为 0.872 nm 的超高精度表面。实验结果表明,应用离子束可以对大面形误差光学元件进行修正,并且利用更大和更小束径离子束去除函数的组合进行优化,可以进一步提升加工效率和精度。

关键词 光学制造;离子束;面形修正;去除函数

中图分类号 TH161; TQ171.6⁺ **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0122001

Large Optical Surface Error Figuring by Ion Beam

Ma Zhanlong Sui Yongxin

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to gain ultra-precision optical elements and to verify the machining capability of ion beam figuring (IBF), the figuring of large optical surface error by ion beam is investigated. Different scale removal functions are gained by changing different ion diaphragms. An $\phi 101$ mm fused silica flat optical element with initial surface figure peak-valles (PV) value of 417.554 nm and root mean square (RMS) value of 104.743 nm is figured by this mean. Through twelve iterations of 10, 5, 2 mm diameter ion diaphragms, an ultra-precision optical surface with PV value of 10.843 nm and RMS value of 0.872 nm is gained. The result shows that the large optical surface error can be figured by IBF, and the efficiency and precision can also be improved by larger and smaller ion diaphragms.

Key words optical fabrication; ion beam; surface figuring; removal function

OCIS codes 220.4610; 220.5450

1 引言

现代光学系统性能的不不断提升,对所需光学元件的精度要求也越来越高,特别是强激光系统、软 X 射线光学系统以及光刻系统等对其光学元件的精度均有很高要求。由于传统的光学元件加工方法已经很难适应其精度需求,以计算机数控为基础的小磨头抛光、应力盘抛光、射流抛光、磁流变抛光(MRF)和离子束修形(IBF)等先进的确定性光学元件加工技术应运而生^[1-7]。

离子束修形作为一种非接触式光学加工方法,

具有加工精度高、去除函数稳定、面形收敛速度快、无边缘效应和亚表面损伤等特点,广泛应用于超高精度光学元件的加工中^[8]。离子束修形技术最早是由 Meinel 等^[9]于 1965 年发现并引入到光学加工领域的,其深入研究和应用开始于 20 世纪 80 年代末。最著名的应用实例是美国 Eastman Kodak 公司利用该技术对 Keck 望远镜主镜的 1.8 m 离轴子镜进行了两轮迭代加工,将其面形由 0.726 μm 提高到 0.090 μm ^[10]。20 世纪 90 年代,欧洲发达国家和日本紧随其后开展了离子束修形方面的研究工作,分

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-07-09

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205)

作者简介: 马占龙(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事超高精度光学元件加工方面的研究。

E-mail: mzlcumt@126.com

别研制了各自的 IBF 设备,其中德国 NTGL 公司的 IBF 设备已经实现商业化,使用客户中包括 ZEISS、Nikon 等光刻物镜制造商^[5,11]。国内离子束修形技术的研究起步较晚,自 2005 年以来,国防科学技术大学^[7,8,12-15]在离子束修形系统、修形机理、去除函数建模、驻留时间算法、抛光轨迹以及工艺软件等关键技术均取得了突破,并于 2006 年研制出了国内第一台离子束修形设备(KDIFS-500),适用于 500 mm 以下口径光学元件;2010 年,其研制的第二台离子束修形设备(KDIBF700-5V),将最大加工直径增大至 700 mm。

离子束修形技术一般作为最后一道工序对光学元件进行精确面形修正,对输入面形的要求较高,这就提高了对前一道工序的加工精度要求。本文针对离子束修正大面形误差光学元件的问题进行了实验研究。

2 离子束修形原理及修正能力分析

2.1 离子束修形原理

离子束修形技术是利用离子源发射出的离子束在真空中轰击光学元件,当元件表面原子获得足够的能量可以摆脱表面束缚能时,就会脱离元件表面形成溅射原子,从而达到去除元件表面材料的目的,其加工原理如图 1 所示^[8]。

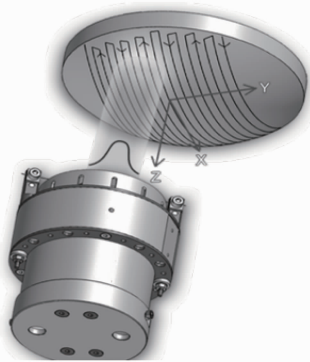


图 1 离子束加工原理图

Fig.1 Principle schematic of IBF

离子束修形过程一般是根据材料去除量精确控制离子束在光学元件不同位置处的运动轨迹和驻留时间来实现的。材料去除量可以表示为离子束去除函数和驻留时间的二维卷积,而材料去除量和去除函数均为已知量,驻留时间就可以通过解方程求得。二维卷积为

$$H(x, y) = R(x, y) \times D(x, y), \quad (1)$$

式中 $H(x, y)$ 为材料去除量; $R(x, y)$ 为离子束去除

函数; $D(x, y)$ 为各点驻留时间。

2.2 离子束修正能力分析

理想修形过程的去除函数应该为脉冲函数,它能够修正元件表面各频段的所有误差。而实际的离子束去除函数通常为类高斯型,具有一定的宽度,加工中的实际材料去除量要大于期望材料去除量。基于这一实际情况,国防科学技术大学的周林等^[8,15]提出了以材料去除有效率作为对修正能力进行量化的指标^[8]

$$\gamma = \exp\left[-\frac{\pi^2}{18}\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中 γ 为材料去除有效率; d 为去除函数束径; λ 为误差的空间波长。

由(2)式可以得到如图 2 所示的不同去除函数束径情况下材料去除有效率随空间频率的变化情况,可知当去除函数束径 d 一定时,随着误差空间频率的增大(空间波长 λ 的减小),材料去除有效率迅速下降;而对于某一确定空间频段的误差,去除函数束径 d 越小,材料去除有效率越大。因此,离子束的修正能力将取决于去除函数束径 d 的大小。对于某一去除函数束径,当材料去除有效率小于 0.1 时,加工过程将难以获得有效的修正能力,对应的频率称为修正截止频率 f_c ^[15]

$$f_c = \frac{3\sqrt{2\ln 10}}{\pi d}, \quad (3)$$

为继续提高离子束的修正能力,必须要减小去除函数束径 d 。

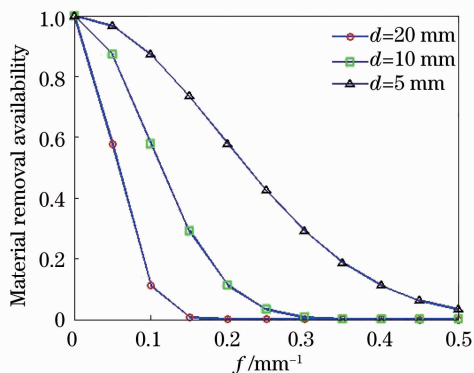


图 2 不同去除函数束径情况下材料去除有效率随空间频率 f 的变化

Fig.2 Dependence of material removal availability on space frequency f under different scale removal functions

3 大误差光学元件离子束加工实验

3.1 实验条件

离子束修正实验在购置的离子束加工机床上进

行,该机床具有 X、Y、Z、A、B 五轴联动的结构形式,加工过程中可以使得工件上的任意加工点处与离子源之间的相对位姿保持相同,进而保证在任意加工点处离子束的入射参数相同,尽可能使离子束产生的去除函数在各点一致,适用于口径 300 mm 以内的平面、球面以及非球面镜的超高精度面形修正。选取的主要工艺参数为:屏栅电压为 600 V,屏栅电流为 60 mA,加速栅电压为 100 V,中和电流为 80 mA,靶距为 20 mm。测试仪器为购置的 Zygo VFA 立式干涉仪。

实验用光学元件为经传统研磨抛光后的 $\phi 101$ mm 口径的熔石英平面镜,图 3 为测得的该光学元件的初始面形检测结果,峰谷(PV)值为 417.554 nm、均方根(RMS)值为 104.743nm。加工路径为如图 4 所示的光栅扫描路径,Y 轴为加工主运动轴,X 轴为扫描进给轴,扫描间隔为 1 mm。

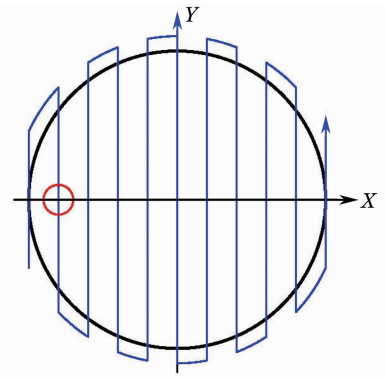


图 4 光栅扫描路径

Fig. 4 Raster scanning path

速度并保证加工精度,初始阶段采用大束径离子束去除函数进行加工。随着面形误差的改善和收敛速度的降低,更换小束径离子束去除函数继续修形。目前有两种获得不同束径离子束去除函数的方法^[14]:一种是优化栅网结构,即减小栅网的栅孔面积、增大栅网曲率等;另一种方法是在离子束接近工件的位置增加一块光阑,从而只允许一部分离子通过。由于本机床离子源只配备了一组直径为 5 cm 的栅网,可通过增加光阑的方式改变离子束去除函数的束径。分别采用 $\phi 10$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 2$ mm 三种孔径的光阑进行去除函数实验。图 5 为实验获得的光阑直径为 5 mm 时的离子束去除函数,是较为理想的高斯型,这主要是由于聚焦离子束的束流密度通常呈高斯分布。表 1 为得到的不同光阑直径对应的去除函数参数,可以看出随着光阑直径的减小,去除函数的束径、峰值和体积去除率均明显减小,而修正截止频率则明显增大。

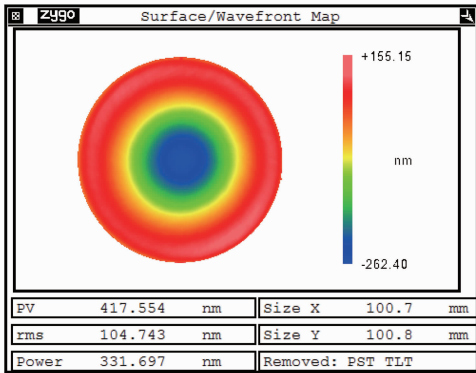


图 3 初始面形

Fig. 3 Initial surface figure

3.2 去除函数

由于光学元件初始面形误差较大,为提高加工

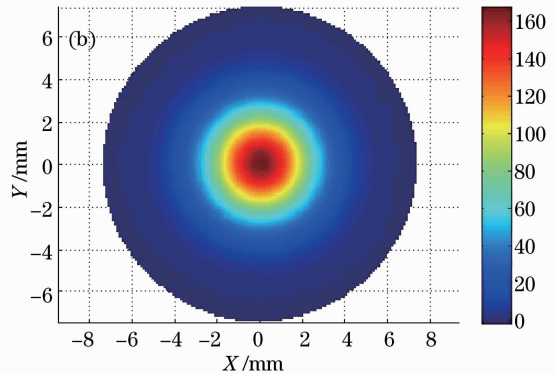
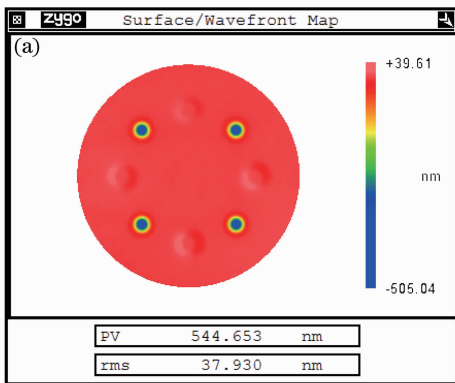


图 5 实验获得的离子束去除函数形状和能耗分布。(a)形状;(b)能耗分布

Fig. 5 Shape and energy distribution of ion beam removal function. (a) Shape; (b) energy distribution

表 1 不同光阑直径对应的去除函数参数

Table 1 Beam removal functions with different ion diaphragms

Diameter of ion diaphragm /mm	Material peak removal rate /($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Material volume removal rate /($10^{-3}\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	Diameter of ion beam /mm	Correction cutoff frequency / mm^{-1}
10	0.222	13.9	19.5	0.105
5	0.11	3.59	11.1	0.185
2	0.0401	0.564	9.05	0.226

3.3 实验结果及分析

离子束加工装置如图 6 所示,光学元件通过压板倒置于真空室中,采用离子源向上溅射的方式进行面形修正。首先采用 $\phi 10\text{ mm}$ 光阑离子源进行加工,待加工结果不再收敛或收敛缓慢时,更换 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源继续加工,最后更换 $\phi 2\text{ mm}$ 光阑离子源。

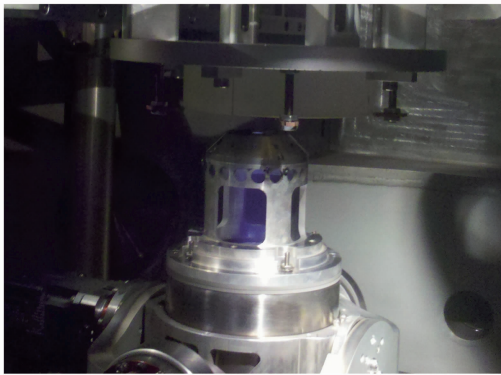


图 6 离子束加工装置

Fig. 6 Installation of IBF

由于光学元件被压板压住的 2 mm 左右的边缘无法加工,导致此处会出现三个尖峰,为消除其影响检测时只取中心 97 mm 口径进行评价。经 $\phi 10\text{ mm}$ 光阑离子源加工 6 轮后面形收敛缓慢(加工时间总计 250 min),加工结果如图 7 所示,面形精度 PV 值为 57.056 nm ,RMS 值为 1.986 nm 。随后更换 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源继续加工,图 8 为 5 mm 光阑离子源加工 5 轮后结果(加工时间总计 44 min),面形精度 PV 值为 49.544 nm ,RMS 值为 0.981 nm 。最后更换 $\phi 2\text{ mm}$ 光阑离子源继续加工,图 9 为经 $\phi 2\text{ mm}$ 光阑离子源加工一轮后的检测结果(加工时间 23 min),最终得到 PV 值为 10.843 nm ,RMS 值为 0.872 nm 的超高精度表面。

整个加工过程的面形收敛情况如图 10 所示,其中第 1~6 轮采用 $\phi 10\text{ mm}$ 光阑离子源,此过程收敛速度较快,但是加工轮次过多,影响了加工效率,可以在此前加入更大尺寸的光阑或者在第 3 轮面形达到 RMS 值为 4.6 nm 时即更换 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源;第 7~11 轮采用 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源,此过程收敛速度较慢,尤其 8~10 轮收敛尤为缓慢,并且在 10 轮

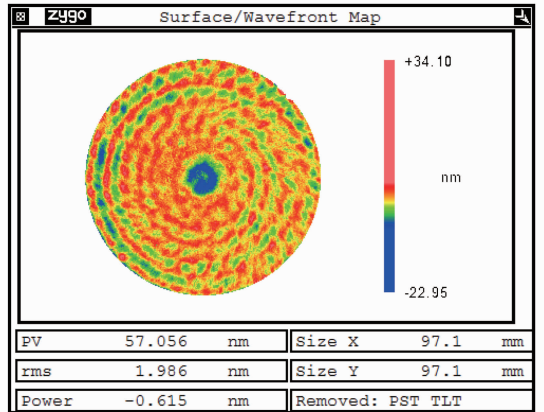


图 7 $\phi 10\text{ mm}$ 光阑离子源加工 6 轮后结果

Fig. 7 Surface figure after six round of $\phi 10\text{ mm}$ ion diaphragm

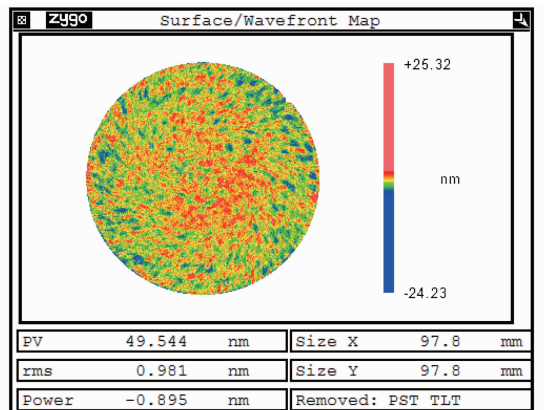


图 8 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源加工 5 轮后结果

Fig. 8 Surface figure after five round of $\phi 5\text{ mm}$ ion diaphragm

出现了发散的情况。这主要是由于随着光学元件精度的提升和离子束束径的减小,对光学元件检测的重复性、检测和加工装夹的定位精度等均应提高,并且可以考虑在 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源加工两轮后(即第 8 轮后)即更换 $\phi 2\text{ mm}$ 光阑离子源,减少大尺寸光阑离子源的加工轮次。将 $\phi 10\text{ mm}$ 和 $\phi 5\text{ mm}$ 光阑离子源的加工轮次控制到 2~3 轮,将修正能力更强的 $\phi 2\text{ mm}$ 光阑尽早加入,可以提高加工效率。如果需要进一步提高加工精度,可以通过更换更小尺寸的光阑实现。

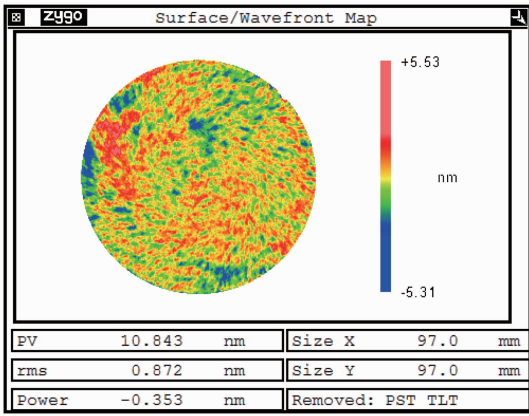


图 9 $\phi 2$ mm 光阑离子源加工一轮后结果
Fig. 9 Surface figure after one round of $\phi 2$ mm ion diaphragm

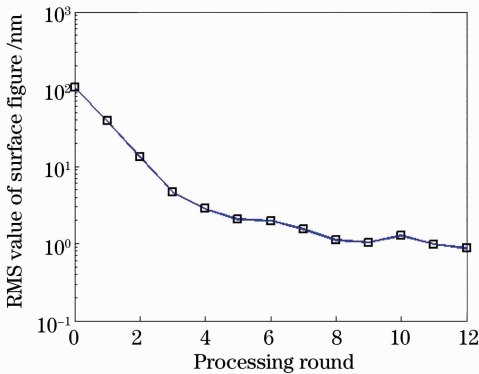


图 10 面形收敛情况

Fig. 10 Convergence of the surface figure

4 结 论

应用离子束修形技术,通过不同束径离子束去除函数组合的方法对一直径为 $\phi 101$ mm、初始面形 PV 值为 417.554 nm、RMS 值为 104.743 nm 的熔石英平面镜进行了修形实验,经过总计 12 轮的加工(加工时间总计 5 h 17 min)最终获得了 PV 值为 10.843 nm、RMS 值为 0.872 nm 的超高精度表面。实验结果表明,应用离子束可以对大面形误差光学元件进行修正,但效率还需提高,可以通过更换更大尺寸的离子源光阑或尽早加入修正能力更强的小尺寸离子源光阑进行实验;通过更换更小尺寸的离子源光阑,精度还可以进一步提升。

参 考 文 献

1 Yang Li. Advanced Optics Fabrication Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001.

杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

2 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Research of errors analysis and material removal stability in fluid jet polishing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112012.

施春燕, 袁家虎, 伍 凡, 等. 射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112012.

3 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 198-205.

戴一帆, 石 峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 198-205.

4 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1116001.

张 峰, 邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1116001.

5 D Marcel, Z Michael, A Frank, *et al.*. Ion beam figuring (IBF) for high precision optics [C]. SPIE, 2010, 7591: 75910Y.

6 Li Yun, Xing Tingwen. Surface error of optical components extended with non-uniform rational B-spline surface [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0722001.

李 云, 邢廷文. 采用非均匀有理 B 样条曲面延展光学元件面形误差[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0722001.

7 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.

戴一帆, 周 林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131-1135.

8 Zhou Lin. Study on Theory and Technology in Ion Beam Figuring for Optical Surfaces [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.

周 林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

9 B Meinel, S Bushkin, D A Loomis. Controlled figuring of optical surfaces by energetic ionic beams [J]. Appl Opt, 1965, 4(12): 1674.

10 L N Allen, E K Robert, S L Timothy. Surface error correction of a Keck 10 m telescope primary mirror segment by ion figuring [C]. SPIE, 1991, 1531: 195-204.

11 T Franz, T Hänsel. Ion beam figuring (IBF) plants for the correction of surface errors of high performance optics & mirrors between 5 and 700 mm diameter [J]. www.ion-leipzig.de.

12 Zhou Lin, Xie Xuhui, Dai Yifan, *et al.*. Realization of velocity mode in flat optics machining using ion beam [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 152-156.

周 林, 解旭辉, 戴一帆, 等. 光学平面镜离子束修形中速度模式的实现[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 152-156.

13 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, *et al.*. Ion beam machining error control and correction for small scale optics [J]. Applied Optics, 2011, 32(4): 753-761.

戴一帆, 周 林, 解旭辉, 等. 离子束修形技术[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 753-761.

14 Xuhui Xie, Lin Zhou, Yifan Dai, *et al.*. Ion beam machining error control and correction for small scale optics [J]. Appl Opt, 2011, 50(27): 5221-5227.

15 Wenlin Liao, Yifan Dai, Xuhui Xie, *et al.*. Corrective capability analysis and machining error control in ion beam figuring of high-precision optical mirrors [J]. Opt Eng, 2012, 51(3): 033402.

栏目编辑: 张 腾