

文章编号 1004-924X(2010)08-1801-06

# Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计

崔天刚<sup>1,2</sup>,王永刚<sup>1,2</sup>,马冬梅<sup>1</sup>,马文生<sup>1</sup>,陈波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 由于传统的基于干涉原理的测量方法无法对用于太阳X射线成像仪的Wolter I型旋转非球面反射镜进行检测, 本文提出了一种在线检测此类反射镜面形的方法。以长程轮廓测量仪的原理为基础, 经过改进、整合测量装置并在扫描机构中加入五角棱镜转折光路, 搭建了一套Wolter I型旋转非球面反射镜面形检测装置, 并对该装置的工作原理、结构参数设定以及数据处理算法等进行了研究。用一块标准平面反射镜作为基准面对该装置定标, 并通过实测反射镜样品进行验证实验。实验结果表明: 该装置的倾斜度测量误差为RMS 6.7  $\mu\text{rad}$ , 重复精度为0.75  $\mu\text{rad}$ , 轮廓测量精度约为PV 0.24 $\lambda$ , RMS 0.07 $\lambda$ , 基本满足设计要求。

**关键词:** Wolter I型反射镜; 长程轮廓测量仪; 顺序扫描; 倾斜度测量

**中图分类号:** TH703; TQ171.65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1801

## Design of online measuring device for surface profile of Wolter Type I mirror

CUI Tian-gang<sup>1,2</sup>, WANG Yong-gang<sup>1,2</sup>, MA Dong-mei<sup>1</sup>, MA Wen-sheng<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** As traditional interference-based measurements can not be suited to measure the surface profile of the Wolter Type I revolving aspheric mirror, a new method was proposed to measure this kind of mirror in this paper. On the basis of a Long Trace Profiler (LTP), a new measuring device was also established by introducing a pentaprism into the scanning mechanism for ray turning. The working principles, structure parameters and data processing algorithms of the device were investigated, then a standard plane mirror was used as the reference to calibrate the device. Finally, a mirror sample was measured to verify the measuring device. Experimental results indicate that designed device can achieve the slope error of RMS 6.7  $\mu\text{rad}$ , repeatability of 0.75  $\mu\text{rad}$  and the height profiles of PV 0.24 $\lambda$  and RMS 0.07 $\lambda$ , which meets the design requirements basically.

**Key words:** Wolter type I mirror; long trace profiler; sequential scanning; slope measurement

收稿日期: 2010-04-01; 修订日期: 2010-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10878004); 中科院创新基金资助项目

## 1 引言

进入空间时代,近地空间环境与人类的生活息息相关,而空间环境状态的改变直接受太阳活动的影响和调制。当太阳爆发时,其 X 射线波段特征变化十分显著,因此太阳 X 射线的观测对研究太阳活动的形成、发生和发展具有重要价值。当今,各国相继在科研气象卫星上搭载太阳 X 射线成像仪对太阳活动进行实时监测<sup>[1]</sup>。由于 Wolter I 型结构可获得较高的成像分辨率,目前的 X 射线成像仪均采用这种结构,即利用二次旋转对称抛物面/双曲面共焦耦合,通过两次反射,实现对 X 射线的聚焦成像。

Wolter I 型结构的核心部件是两块工作在掠入射状态的旋转非球面反射镜(抛物面/双曲面)。反射镜表面面形质量直接决定能否获得高的反射率和光子通量,因此对非球面反射镜面形检测提出了更高的要求。传统的非球面面形检测方法主要分为接触式测量和非接触式测量。前者(如 TalySurf Series 2 PGI 高精度轮廓仪)因其探针会对被测元件表面造成微小损伤,故未被广泛使用;后者以测速快,应用广泛的干涉测量法为代表,基础为 Twyman-Green, Fizeau 等传统干涉仪,由此发展出的 WYKO、ZYGO 干涉仪在面形检测中已达到很高的精度。但是应用干涉法测量 Wolter I 型旋转非球面反射镜需要高精度参考面,其加工困难且成本很高,而且此类反射镜子午和弧矢方向的曲率相差很大,测量时干涉条纹结构复杂,因而无法满足高精度测量的要求。

近年来,一种被称为“顺序扫描法”的新型面形检测方法受到越来越多的关注,国内外多家研究机构相继深入其中<sup>[2-9]</sup>。所谓顺序扫描就是利用测头沿待测表面轮廓进行连续扫描测量的过程。此方法虽然测速较慢,但能够克服干涉法的上述缺陷,在非球面反射镜表面形貌测量中得到广泛应用。美国 Brookhaven 国家实验室的钱石南教授率先提出了基于顺序扫描方法的非球面轮廓仪,并命名为长程轮廓测量仪(Long Trace

Profiler,LTP)。本文首先介绍了 LTP 的工作原理,然后根据 Wolter I 型旋转非球面反射镜面形在线检测的要求,设计搭建了一套基于 LTP 的面形检测装置。详细介绍了它的工作原理、结构参数设定、测量数据分析方法等,并在此基础上对该装置进行定标及验证实验,最终给出了该检测装置的测量精度,重复性等各项指标。

## 2 面形检测装置工作原理

Wolter I 型反射镜面形检测装置的工作原理与 LTP(图 1)基本相同。LTP 工作原理为:He-Ne 激光器发出一束细光束,经过起偏器(POL)变成偏振光,通过等光程分光系统(BS、PORRO Prism)被分成两束间距为 1 mm 的平行光束。再经过偏振分光棱镜(PBS)分成两路,分别照射在参考面(REF)和待测面(SUT)上。反射后再经过分光棱镜转折,最后由傅里叶变换透镜(FT Lens)聚焦到 CCD 探测器上。CCD 探测器置于透镜的后焦面上,用于记录两组光束各自形成的干涉条纹。通过测量 CCD 上两干涉图样的距离,即可计算出待测表面与参考面之间的夹角,即倾斜度。半波片(HWP)用来调节两束光的强度,以避免由于光束强度超过 CCD 阈值,对 CCD 造成损伤。四分之一波片(QWP)将两次穿过它的光束偏振态旋转 90°,以保证从参考面和待测面反射回来的光全部射向 FT 透镜<sup>[10-13]</sup>。

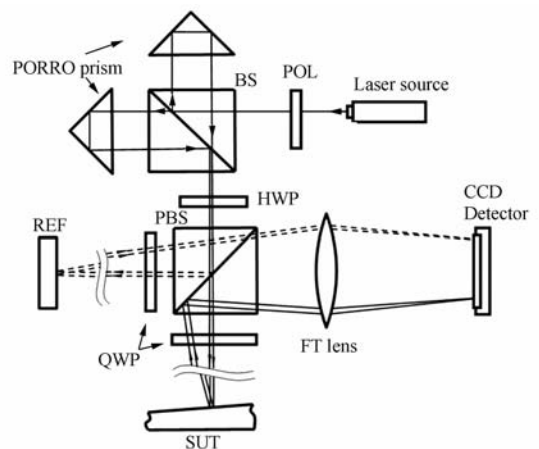


图 1 长程轮廓测量仪光学系统示意图

Fig. 1 Optical schematic of LTP

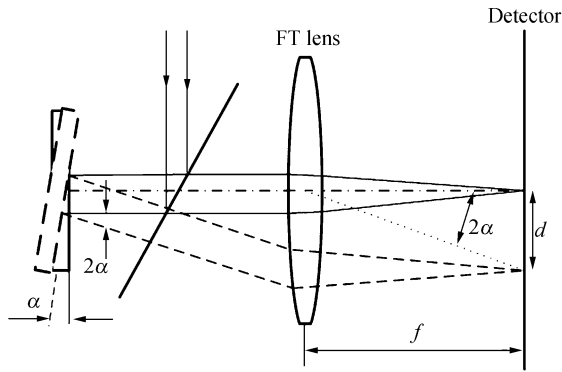


图 2  $f-\theta$  透镜系统基本原理( $\alpha$  为待测光学元件面形的倾角)

Fig. 2 Basic principle of  $f-\theta$  lens system( $\alpha$  is surface angle of optics to be measured)

LTP 光学系统本质上是一个角度-位移变换系统,即  $f-\theta$  透镜系统。图 2 中,参考面垂直于光轴,设待测面相对参考面倾斜角度为  $\alpha$ ,则经过待测面反射后光束相对于光轴的夹角为  $2\alpha$ ,若经参考面和待测面反射到探测器上形成的干涉图样之间的距离为  $d$ ,得

$$d = \tan(2\alpha) \times f, \quad (1)$$

由于  $\alpha$  很小,可近似认为  $\tan(2\alpha) \approx 2\alpha$ ,带入公式(1),即

$$d = 2\alpha f, \quad (2)$$

$$\alpha = d/2f, \quad (3)$$

由此可计算出待测面相对于参考面的倾角,即待测面上该反射点的倾斜度。光学表面各点的法线矢量方向决定了其反射光束的方向,各点之间的表面倾斜度变化可通过对法线矢量测量得到,进而对倾斜角度积分得到表面轮廓形貌。根据这一原理,沿待测面一条母线进行顺序扫描,得到一系列倾斜度值,应用多项式拟合方法求出其倾斜度曲线  $\text{slope}(x)$ ,再对该曲线进行积分

$$\text{height}(x') = \int \text{slope}(x) dx. \quad (4)$$

即可得到轮廓高度曲线。对待测面各条母线分别进行扫描,用计算机程序将积分得到的各条轮廓高度曲线拼接,便可获得待测面的整体面形。

### 3 面形检测装置构成

为了满足在线检测的要求,以 LTP 原理为基

础搭建 Wolter I 型旋转非球面反射镜面形检测装置(图 3)。本装置采用单一准直细光束,将整个光学系统(包括光源、分光镜、参考镜、FT 透镜以及五角棱镜等)集成到一起,固定于气浮隔振平台上,以增加整个装置的稳定性。在测量端加入五角棱镜使入射光在待测反射镜主截面内转折  $90^\circ$  垂直入射到镜面上。五角棱镜对其主截面内偏摆误差并不敏感<sup>[14-18]</sup>,从而减少了误差源,降低了检测装置光路装调难度。参考反射镜与被测反射镜置于同一导轨上,用另一块五角棱镜将参考光转折后射向参考镜,经过反射最后到达 CCD 探测器。扫描时参考镜随导轨移动,可将导轨运动直线度误差记录下来,用于测量端数据的补偿。

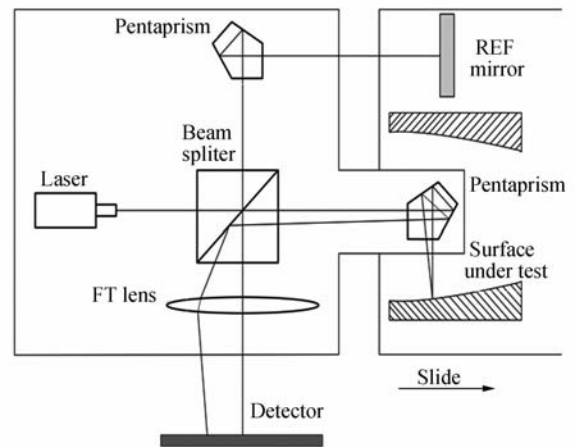


图 3 Wolter I 型反射镜面形检测装置结构示意图

Fig. 3 Framework of device used for measuring surface profile of Wolter Type I mirror

检测装置基本结构参数为:半导体准直激光器,工作波长  $\lambda = 533 \text{ nm}$ ; FT 透镜焦距  $F = 1\,000 \text{ mm}$ ;最大扫描长度  $L = 100 \text{ mm}$ ; CCD 采用 SO- NY SUPER CCD,其像元尺寸为  $6.5 \mu\text{m} \times 6.3 \mu\text{m}$ ,总像元数为  $720 \times 576$ 。

## 4 实验

### 4.1 检测装置定标

根据上述结构参数,可以计算出检测装置的

理论分辨率。CCD 像面上光斑的位移分辨率为  $\Delta s = 6.5 \mu\text{m}$ , 该装置的倾斜度分辨率为

$$\delta s = \Delta s / 2f = 3.2 \mu\text{rad}, \quad (5)$$

由式(5)分析可知, 采用更小像元尺寸的 CCD 或者换用更长焦距的 FT 透镜可以提高理论分辨率。

本文采用与 ZYGO 干涉仪配套的标准平面镜 ( $\Phi = 100 \text{ mm}$ ) 作为基准面对检测装置进行定标。选取标准平面镜表面任一直径, 用检测装置对此直径扫描得到其倾斜度和轮廓高度数据, 然后与基准值相比较, 由此确定此装置的测量精度。基准值由 ZYGO 干涉仪测得 (PV  $0.032\lambda$ , RMS  $0.006\lambda$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

图 4 给出了检测装置对标准平面镜倾斜度的实测结果 (实线: 10 次测量的平均值)。为了便于对比, 将 ZYGO 测出的轮廓高度曲线微分并作高阶多项式拟合后, 转换为基准倾斜度曲线 (虚线)。经计算, 该装置的倾斜度测量误差为  $6.7 \mu\text{rad}$ , 测量重复性为  $0.75 \mu\text{rad}$ 。

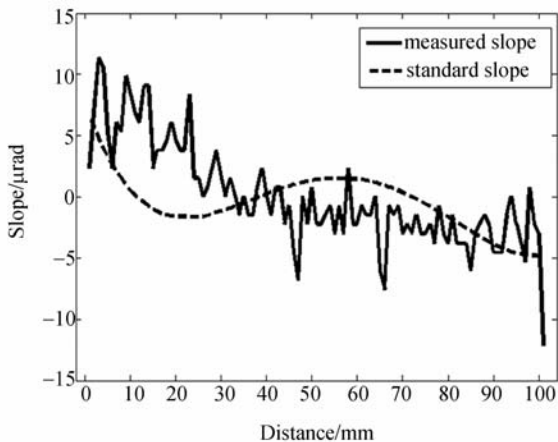


图 4 基准与实测倾斜度曲线比较

Fig. 4 Comparison of curves between measured and standard slopes

对倾斜度误差曲线进行多项式拟合后按照公式(4)积分, 将表面倾斜度转化为表面轮廓高度 (图 5)。通过计算并与基准值对比得出此装置全程轮廓测量精度为 PV  $0.24\lambda$ , RMS  $0.07\lambda$ 。

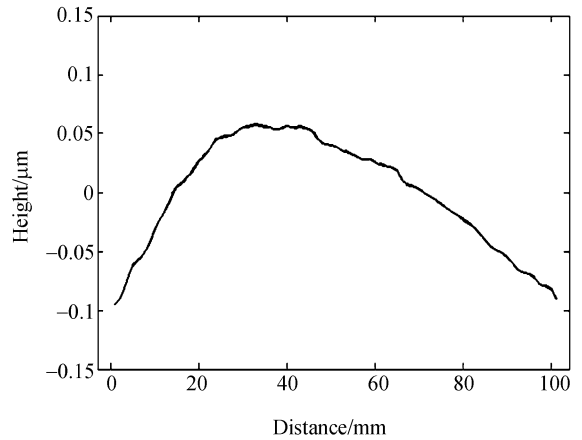


图 5 拟合出的标准镜表面轮廓曲线

Fig. 5 Fitted surface profile of standard plane mirror

#### 4.2 Wolter 反射镜样品实测

图 6 是本实验室加工出的 Wolter I 型非球面反射镜样品, 受实验室检测手段 (接触测量法) 限制, 目前加工的反射镜面形精度在 RMS  $1\lambda$  左右。为了验证所设计的非球面检测装置的可行性与可靠性, 用此装置对反射镜内表面进行了检测。每条母线间隔  $0.5 \text{ mm}$  采样, 每隔  $15^\circ$  扫描一条母线, 共 24 线。抛物面部分的测量结果如图 7 所示 (将测得的倾斜度曲线转化成轮廓高度曲线, 并减去标准抛物线)。经计算得抛物面面形为 RMS  $0.8\lambda$ , 与已知面形 (接触法测得) 基本相符。

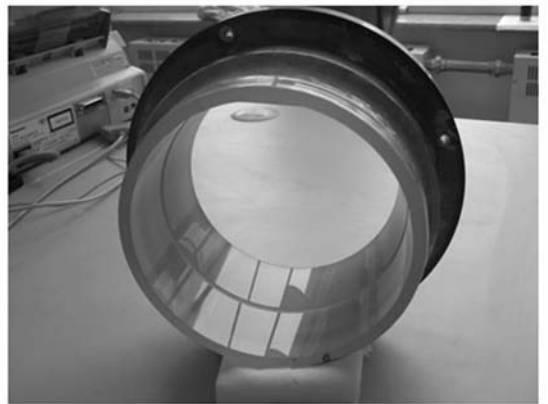


图 6 实验室加工出的 Wolter I 型反射镜样品

Fig. 6 Sample of Wolter Type I manufactured in our lab

通过对实验数据的分析和比较可知, 该非球面检测装置能够用来检测 Wolter I 型反射镜, 并为下一步精细加工提供可靠的测量数据。

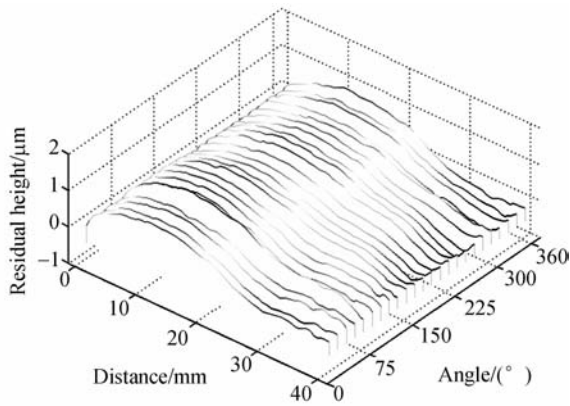


图7 Wolter 反射镜抛物面部分面形(减去标准抛物线后)  
Fig. 7 Surface profile of paraboloidal segment of Wolter mirror (standard parabola has been subtracted)

## 5 结 论

本文以 LTP 为基础,根据 Wolter I 型反射镜加工实时检测的要求,提出一种在线检测此类反射镜面形的新方法。详细介绍了该方法的工作原理,设计并搭建了一套面形检测装置,利用标准平面镜和加工出的反射镜样品对此装置进行定标及验证性实验。结果表明:该装置的倾斜度测量误差为 RMS  $6.7\mu\text{rad}$ ,重复性精度  $0.75\mu\text{rad}$ ,全程轮廓测量精度为 PV  $0.24\lambda$ ,RMS  $0.07\lambda$ ,基本满足目前 Wolter I 型反射镜精细加工中面形检测的精度要求。今后的工作将通过改善测量环境,优化图像处理算法等进一步减小潜在误差,提高装置测量精度。

## 参考文献:

- [1] LEMEN J R, DUNCAN D, EDWARDS C S, *et al.*. Solar X-Ray Imager for GOES [J]. *SPIE*, 2004,5171:65-76.
- [2] XIAO T Q, XIA S J. A new long trace profiler for aspheric optical surface metrology [J]. *SPIE*, 2002,4927:208-213.
- [3] QIAN SH N, TAKACS P Z. Equal optical path beamsplitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 2003,42(4):929-934.
- [4] MORIYASU S, TAKACS P Z, KATO J, *et al.*. On-machine metrology with LTP (Long Trace Profiler) [J]. *SPIE*,2003,5180:385-392.
- [5] COCCO D, BIANCO A, SOSTERO G. A second optic head for the ELETTRA long trace profiler [J]. *SPIE*, 2005,5921: 59210L-1-59210L-10.
- [6] QIAN J, ASSOUFID L, MACRANDER A. Comparison of slope and height profiles for flat synchrotron X-ray mirrors measured with a long trace profiler and a PMI Fizeau interferometer [J]. *SPIE*, 2007, 6704: 67040C-1-67040C-7.
- [7] XUE CH X, HUO F R, ZHOU CH ZH, *et al.*. Research on the measuring method of the slope error of EUV/X-ray optical elements and measuring apparatus of long trace profiler [J]. *SPIE*, 2007, 6723:67231W-1 -67231W-6.
- [8] 刘斌,王秋平,傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量仪的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006,43(2): 46-53.
- [9] LIU B, WANG Q P, FU S J. Investigation of long trace profiler for aspherical optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(2): 46-53. (in Chinese)
- [10] LI ZH, ZHAO Y, LI D CH, *et al.*. A Diffractive long trace profiler for large aspherical optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 4221-8221. (in Chinese)
- [11] QIAN SH N, TAKACS P Z. The penta-prism LTP: A long-trace-profiler with stationary optical head and moving penta prism [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995,66(3):2562-2569.
- [12] QIAN SH N, TAKACS P, SOSTERO G, *et al.*. Portable long trace profiler: Concept and solution [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001,72(8):3198-3204.
- [13] GUBAREV M, KESTER T, PETER Z. Takacs. Calibration of a vertical-scan long trace profiler at MSFC [J]. *SPIE*, 2001,4451:333-340.
- [14] HIGASHI Y, TAKAIE Y, ENDO K, *et al.*. A new designed ultra-high precision profiler-study on slope error measurement of a mandrel for wolter type-I mirror fabrication- [C]. *Proc. 8th Int. Conf. X-ray Microscopy IPAP Conf.* 2004, Series 7:192-194.

- [14] 马冬梅, 韩昌元. 基于五棱镜扫描技术测试大口径平面镜的系统设计 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(11):90-95.  
MA D M, HAN CH Y. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technique [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(11):90-95. (in Chinese)
- [15] 匡萃方, 冯其波, 刘斌, 等. 五角棱镜制造角差及抖动对其转向角的影响 [J]. 光学技术, 2004, 30(5):616-622.  
KUANG C F, FENG Q B, LIU B, *et al.*. Influences on the deflection angle of the pentagonal prism due to dithering and fabrication angle error [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5):616-622. (in Chinese)
- [16] 马冬梅, 刘志祥, 马磊, 等. 五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2517-2523.  
MA D M, LIU ZH X, MA L, *et al.*. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2517-2523. (in Chinese)
- [17] MALLIK P C V, ZHAO CH Y, BURGE J H. Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system [J]. *Opt. Eng.* 2007, 42(6):023602-1-023602-9.
- [18] YELLOWHAIR J, BURGE J H. Analysis of a scanning pentaprism system for measurements of large flat mirrors [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35):8466-8474.

#### 作者简介:



**崔天刚**(1983—),男,山东济南人,博士研究生,2006年于山东大学获得理学学士学位,主要从事光学设计及非球面表面检测的研究。E-mail: foreverctg@163.com



**王永刚**(1982—),男,江苏盐城人,博士研究生,2005年于徐州师范大学获得理学学士学位,主要从事光学加工及表面检测的研究。E-mail: vangernh@126.com



**马冬梅**(1963—),女,吉林人,研究员,博士生导师,1986年于天津大学获得学士学位,1994年、2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学检测、光电成像系统性能测评的研究。E-mail: dongmei\_ma2002@yahoo.com.cn



**马文生**(1949—),男,吉林磐石人,高级工程师,于长春光机学院继续教育学院机械制造工艺与设备系获工学学士学位,主要从事超精密加工工艺的研究。E-mail: 439304194@qq.com

#### 导师简介:



**陈波**(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软X射线与极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn