靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量技术

唐兴，王琦，马小军，高党忠，王宗伟，孟婕

引用本文:
唐兴, 王琦, 马小军, 高党忠, 王宗伟, 孟婕. 靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量技术[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 266-272. doi: 10.3788/CO.20201302.0266
TANG Xing, WANG Qi, MA Xiao-jun, GAO Dang-zhong, WANG Zong-wei, MENG Jie. Determination of the inner-surface profile of a capsule using chromatic confocal spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 266-272. doi: 10.3788/CO.20201302.0266

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/CO.20201302.0266

文章编号 2095-1531(2020)02-0266-07

靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量技术

唐 兴,王 琦,马小军*,高党忠,王宗伟,孟 婕
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘要:靶丸内表面轮廓是激光核聚变靶丸的关键参数,需要精密检测。本文首先分析了基于白光共焦光谱和精密气浮轴系的靶丸内表面轮廓测量基本原理,建立了靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量方法。此外,搭建了靶丸内表面轮廓测量实验装置,建立了基于靶丸光学图像的辅助调心方法,实现了靶丸内表面轮廓的精密测量,获得了准确的靶丸内表面轮廓曲线;最后,对测量结果的可靠性进行了实验验证和不确定度分析,结果表明,白光共焦光谱能实现靶丸内表面低阶轮廓的精密测量,其测量不确定度优于 0.1 μm。

关 键 词:白光共焦光谱;内表面轮廓;靶丸;激光聚变
中图分类号:O433.1 **文献标识码:**A doi:10.3788/CO.20201302.0266

Determination of the inner-surface profile of a capsule using chromatic confocal spectroscopy

TANG Xing, WANG Qi, MA Xiao-jun*, GAO Dang-zhong, WANG Zong-wei, MENG Jie
(*Research Center of Laser Fusion*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang* 621900, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *maxj*802@163.*com*

Abstract: The inner surface profile of capsule, which is one of the essential parameters of laser nuclear fusion capsule, needs to be measured precisely. In this paper, the basic measurement principle of the capsule's inner surface profile, which is based on the white light confocal spectrum and precision air flotation bearing, is analyzed firstly and the corresponding measuring method is presented. Then, the experimental apparatus applied to measure the inner surface profile of capsule is developed, and an auxiliary aligning method based on optical image is proposed. The precise measurement of the inner surface profile of capsule is achieved and the accurate inner surface profile curve of capsule is obtained. Finally, the reliability of measured data is verified experimentally and the measuring uncertainty is analyzed. The experimental results illustrate that the inner surface profile of capsule can be measured accurately using white light confocal spectrum and the measuring uncertainty is less than 0.1 μm.

Key words: chromatic confocal spectrum; inner surface profile; capsule; laser fusion

1 引 言

在激光惯性约束聚变(ICF)实验中,靶丸内、外表面轮廓的非理想球形度偏差将会在靶丸内爆过程中造成瑞利-泰勒流体力学不稳定性的快速增长,降低压缩效率,甚至导致球壳破裂[1]。因此,精密测量靶丸内、外表面圆周轮廓特征对理解

收稿日期:2019-04-15;**修订日期:**2019-05-22
基金项目:科学挑战计划(No. TZ2018006-0204-01)
Supported by Science Challenge Program (No. TZ2018006-0204-01)

激光核聚变靶丸内爆物理过程和改进靶丸制备工艺均有着十分重要的意义[1-2]。为了检测靶丸的表面轮廓信息,国内外 ICF 研究机构建立了基于精密气浮轴系和原子力显微镜(AFM)的靶丸表面轮廓测量技术,实现了靶丸外表面轮廓的全表面检测,其测量不确定度可达到纳米量级[3-6]。对于靶丸内表面轮廓的无损检测,目前常用的技术手段是 X 射线照相法。该方法利用靶丸 X 射线吸收强度在界面处不连续的特点,通过计算吸收强度曲线的亮度或二阶微分来确定各壳层的轮廓信息,其低阶圆周轮廓测量不确定度为 0.3 μm[7],不能完全满足靶物理实验对靶丸内表面圆周轮廓测量的精度需求。因此,如何实现靶丸内表面轮廓的高精度测量,目前还是一个亟待解决的技术难题。

近年来,共焦测量方法由于具有高精度的三维成像能力,已经广泛用于表面轮廓与三维精细结构的精密测量[8-13]。本文通过分析白光共焦光谱的基本原理,建立了透明靶丸内表面圆周轮廓测量校准模型;同时,基于白光共焦光谱并结合精密旋转轴系,建立了靶丸内表面圆周轮廓精密测量系统和靶丸圆心精密定位方法,实现了透明靶丸内、外表面圆周轮廓的纳米级精度测量。

2　测量原理

图 1(a)(彩图见期刊电子版)是白光共焦光谱传感器的工作原理示意图,白光光源通过物镜组形成一系列连续的沿着光轴的单色光点像,分别对应 λ_1 到 λ_n,每一种波长对应一个纵向位置。当待测样品置于测量范围内时,某一种特定的波长 λ_M 正好聚焦到样品表面的 M 点并被反射,反射光被分光镜反射后经针孔滤波,滤波后变为以 λ_M 为中心的窄带光信号(带宽为 $\Delta\lambda$),被光谱仪接收。通过分析样品表面反射光的波长,可高精度地确定样品表面的纵向位置。将靶丸安装在精密气浮主轴前端,使白光共焦光谱传感器聚焦于靶丸赤道位置(白光共焦光谱聚焦光斑在数微米量级,靶丸表面的测量区域可近似为平面),由于靶丸内、外表面的反射,此时,反射光谱中将会出现两个峰值,根据这两个反射光谱的波长,可同时获得透明靶丸的内、外表面相对于传感器零点的高度数据。利用精密气浮轴系带动靶丸平稳旋转,同时采集靶丸各个位置的内、外表面轮廓高度数据,当气浮轴系旋转 360°,即可获得靶丸的内、外表面圆周轮廓数据,对应位置内、外表面轮廓数据之差即为靶丸的壳层厚度。

当光线通过靶丸壳层时,由于光线的折射,靶丸内表面轮廓的直接测量数据不能表征其真实轮廓特征,为得到真实的内表面轮廓数据,需要对白光共焦光谱的直接测量数据进行修正。由于白光共焦光谱传感器焦点仅为数微米,当光线通过靶丸赤道位置的壳层时,靶丸壳层可近似为一个平面,当光线通过靶丸壳层时,靶丸壳层物理厚度 d 的白光共焦光谱测量值可表示为[14]:

$$\frac{d}{d'} = n(\lambda)\frac{\cos\beta}{\cos\alpha} = n(\lambda)K, \tag{1}$$

式中,$K = \dfrac{\cos\left[\arcsin\dfrac{\sin\alpha}{n(\lambda)}\right]}{\cos\alpha}$,$d$、$d'_1$ 分别是透明样品的真实厚度和白光共焦光谱传感器测量厚度数据,$n(\lambda)$ 是靶丸壳层的折射率,β、α 分别是光线的入射角和折射角。

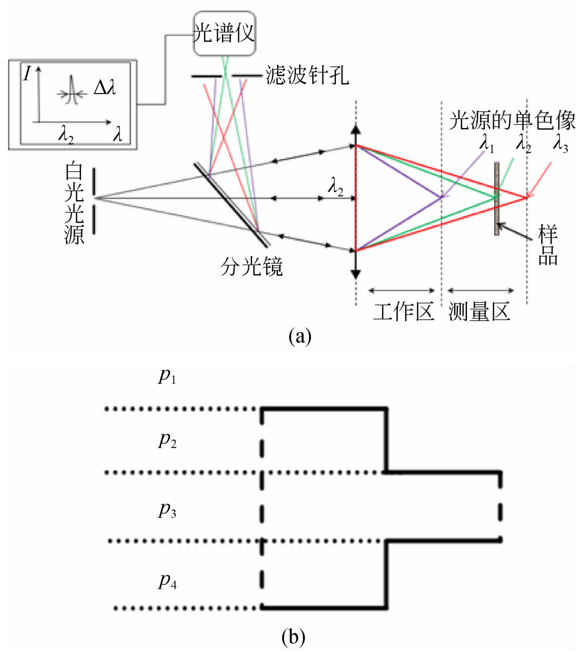


图 1　(a) 白光共焦光谱传感器的工作原理示意图和(b) 透明样品下表面轮廓的测量原理

Fig. 1　(a) Schematic of working principle of chromatic confocal spectroscopy and (b) measurement principle of the lower surface profile of capsule

图1(b)是透明样品下表面轮廓的白光共焦光谱测量原理示意图,图中,p_1、p_2是样品上表面相对于传感器零点的位置,p_3、p_4是样品下表面相对于传感器零点的位置。由于光线通过透明样品时的折射效应,台阶轮廓样品下表面左右两边的测量值h_1、h_2可表示为:

$$\begin{cases} h_1 = p_1 + \dfrac{p_4 - p_1}{n(\lambda)K} \\ h_2 = p_2 + \dfrac{p_3 - p_2}{n(\lambda)K} \end{cases}. \tag{2}$$

样品下表面轮廓测量数据可表示为:

$$h_2 - h_1 = p_2 - p_1 + \frac{p_3 - p_2 - p_4 + p_1}{n(\lambda)K}. \tag{3}$$

从公式(3)可以看出,利用白光共焦光谱测量靶丸壳层内表面轮廓数据时,其测量结果与白光共焦光谱传感器光线的入射角、靶丸壳层厚度、壳层材料折射率、靶丸内外表面轮廓的直接测量数据等因素紧密相关。

3 测量装置

利用精密气浮旋转轴系及白光共焦光谱传感器,搭建了透明靶丸内表面轮廓测量实验装置,该测量装置示意图如图2所示。该装置主要由精密气浮主轴、辅助轴系、白光共焦光谱仪、数据采集单元以及靶丸调心机构等几部分组成,其中,传感器采用法国STIL公司的白光共焦光谱仪,其测量范围为400 μm,光斑尺寸为1.7 μm。测量过程中,将靶丸放置于精密气浮旋转轴系上端的负压吸附吸嘴上,白光共焦光谱传感器垂直聚焦于靶丸表面赤道位置,通过控制软件使轴系旋转与光谱数据采集同步。在旋转轴系开始转动时同步采集靶丸内外表面的轮廓数据,旋转轴系旋转一周就可以得到靶丸赤道位置的圆周轮廓数据;利用辅助轴系可实现靶丸指定角度的翻转,从而实现靶丸不同位置的内表面轮廓测量。

放置于旋转轴系吸嘴上的靶丸可能出现偏心,从而导致靶丸在旋转过程中内外表面超出有效量程范围,不能实现靶丸内表面圆周轮廓的测量,因此,在测量靶丸内表面轮廓之前,需要调整靶丸中心和旋转轴系中心的相对位置,使其尽可能重合。本文采用了图像辅助调心方法,其调心原理如图3所示。

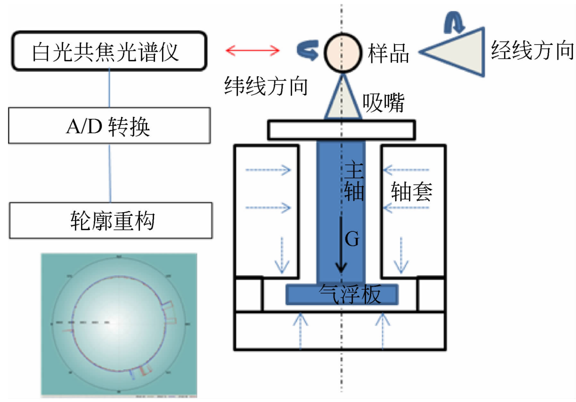


图2 白光共焦光谱轮廓检测系统

Fig. 2 Surface profile measurement system based on chromatic confocal spectrum

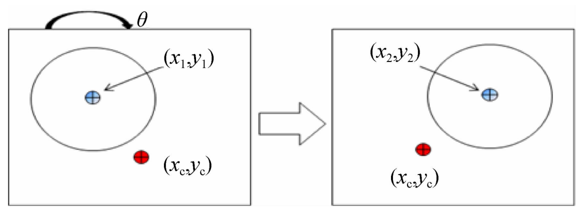


图3 靶丸旋转调心原理图

Fig. 3 Principle diagram of adjusting rotation center of capsule

假设在某一时刻,靶丸光学图像中心位置在(x_1,y_1),轴系旋转时的回转中心位置在(x_c,y_c),当主轴旋转某一已知的角度θ后,靶丸球心的位置变化到(x_2,y_2),则由二维刚体运动几何关系,有:

$$\begin{cases} x_2 - x_c = (x_1 - x_c)\cos\theta + (y_1 - y_c)\sin\theta \\ y_2 - y_c = (y_1 - y_c)\cos\theta - (x_1 - x_c)\sin\theta \end{cases}. \tag{4}$$

将上式整理为矩阵形式,有:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \boldsymbol{A}^{-1} \cdot \boldsymbol{B}, \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \sin\theta & 1-\cos\theta \\ 1-\cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} y_2 + x_1\sin\theta - y_1\cos\theta \\ x_2 - y_1\sin\theta - x_1\cos\theta \end{bmatrix}$。

通过公式(5),可求解靶丸旋转到某一位置时靶丸光学图像中心的位置坐标,将靶丸圆心调整到与回转中心重合;再将靶丸旋转到下一位置,调整靶丸光学图像中心与回转中心的相对位置,

使二者重合;重复上述过程,若靶丸旋转一周,靶丸光学图像中心与回转中心均重合,则靶丸调心过程完成。该方法的调心精度与视频 CCD 的放大倍数及测量精度有关,本装置可实现小于 10 μm的调心精度。

4　测量结果与讨论

4.1　靶丸内表面轮廓测量

利用上述测量方法和实验装置,对单层塑料靶丸的内、外表面轮廓进行了测量。图 4 是基于白光共焦光谱的靶丸外表面轮廓和校准后的内表面测量曲线,从图中可以看出,靶丸内、外表面低阶轮廓整体形状相似,局部轮廓存在一定的差异。从公式(3)可知,靶丸内表面轮廓的校准与靶丸壳层折射率相关,而折射率可表示为入射光波长的函数,计算过程中,对于靶丸壳层,其折射率在可见光范围内的偏差较小,可取为 1.5。此外,根据白光共焦光谱传感器的数值孔径和工作距离等参数,可计算出入射角约为 28°。与外表面轮廓相比较,靶丸内表面轮廓的信噪比较差,分析认为,靶丸内表面的真实轮廓测量值与靶丸内、外表面的白光共焦光谱直接测量数据相关,其测量噪声是二者的综合效应,因此,其测量数据信噪比相对较差,这表明,利用白光共焦光谱方法,可实现靶丸低阶轮廓的测量,其高阶轮廓信息测量置信度相对较低。

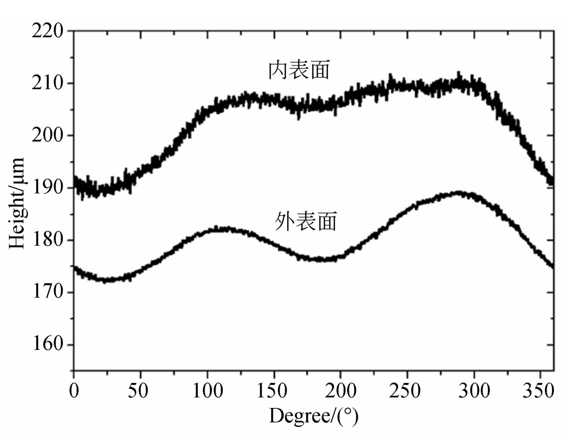


图 4　靶丸内外表面轮廓的白光共焦光谱测量曲线

Fig. 4　Chromatic confocal spectrum profile curves of the capsule inner and outer surfaces

4.2　内表面轮廓测量数据的可靠性验证

采用对比测试方法,首先对基于白光共焦光谱技术的靶丸外表面轮廓测量精度进行了考核,图 5(a)是靶丸外表面轮廓的原子力显微镜轮廓仪和白光共焦光谱轮廓仪的测量曲线。为了便于比较,将原子力显微镜轮廓仪的测量数据进行了偏移。从图中可以看出,二者的低阶轮廓整体相似,局部的轮廓信息存在一定的偏差,原因在于二者在靶丸赤道附近的精确测量圆周轮廓结果不一致;此外,白光共焦光谱的信噪比较原子力低,这表明白光共焦光谱适用于靶丸表面低阶的轮廓误差的测量。图 5(b)是靶丸外表面轮廓原子力显微镜轮廓仪测量数据和白光共焦光谱轮廓仪测量数据的功率谱曲线,从图中可以看出,在模数低于 100 的功率谱范围内,两种方法的测量结果一致性较好,当模数大于 100 时,白光共焦光谱的测量数据大于原子力显微镜的测量数据,这也反应了白光共焦光谱仪在高频段测量数据信噪比相对较差的特点。由于光谱传感器 Z 向分辨率比原子力低一个量级,同时,受环境振动、光谱仪采样

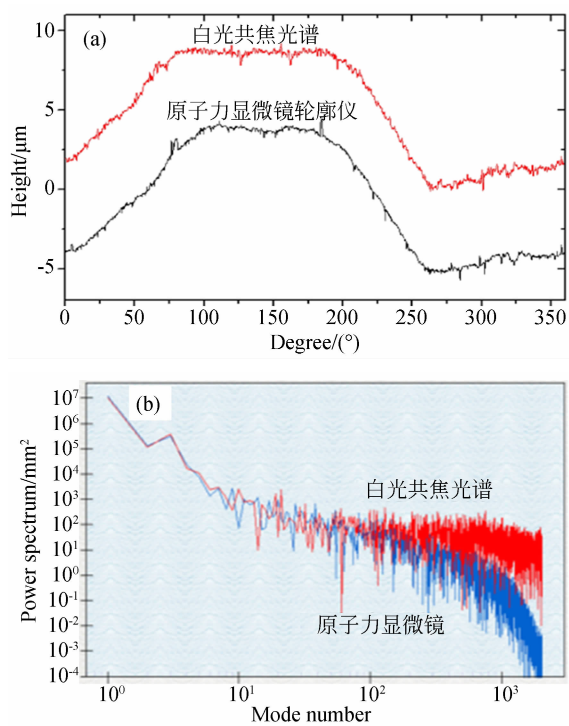


图 5　靶丸外表面轮廓(a)及其功率谱曲线(b)

Fig. 5　Outer surface profile curves (a) and power spectra (b) of capsule

率及样品表面散射光等因素的影响,共焦光谱检测数据高频随机噪声可达 100 nm 左右。对于 ICF 靶丸,模数大于 100 的表面粗糙度信息一般在数纳米至数十纳米量级,靶丸表面真实高频轮廓数据全部淹没在白光共焦光谱系统的随机噪声之中,故白光共焦光谱仪难以获得靶丸表面轮廓的高频信息。

为进一步验证内表面轮廓测量数据的可靠性,对单面具有正弦调制结构的薄膜样品进行了测试,该薄膜样品基底厚度约为 10 μm,正弦调制振幅约为 0.5 μm,波长约为 50 μm。图 6(a)是正弦调制结构向上时利用白光共焦光谱对调制样品上表面轮廓的测量数据和拟合数据,从图中可以看出,测量数据与拟合数据一致性较好,其正弦调制振幅为 434 nm,波长为 48.2 μm;图 6(b)是正弦调制薄膜(正弦调制结构向上)上表面轮廓曲线和校准前后的下表面轮廓曲线,从图中可以看出,由于受上表面的影响,校准前下表面轮廓曲线呈现周期性的调制特征,其振幅分布与上表面相反,利用公式(3)进行校准后,下表面轮廓曲线可近似为一条直线。图 7(a) 是正弦调制薄膜(正弦调制结构向下)上表面轮廓曲线和校准前后的下表面轮廓曲线,从图中可以看出,上表面轮廓近似为一条直线,这与图 6(b)中调制薄膜校准后的轮廓曲线是一致的,此外,由于受调制薄膜折射率的影响,图 7(a)中调制薄膜下表面校准前后轮廓曲线的振幅明显不同;图 7(b)是调制薄膜下表面轮廓曲线(校准后)的测量数据和拟合数据,相对于图 6(a)的测量结果,该测量数据与拟合数据的离散性相对增大,通过正弦拟合方法所获得的正弦调制振幅为 439 nm,波长为 48.2 μm。当调制样品分别向上、向下放置时,白光共焦光谱的测量结果波形整体一致性较好,二者波长一致,拟合振幅偏差为 5 nm。该测量结果表明,利用白光共焦光谱技术可实现样品内表面低阶轮廓的精确测量。

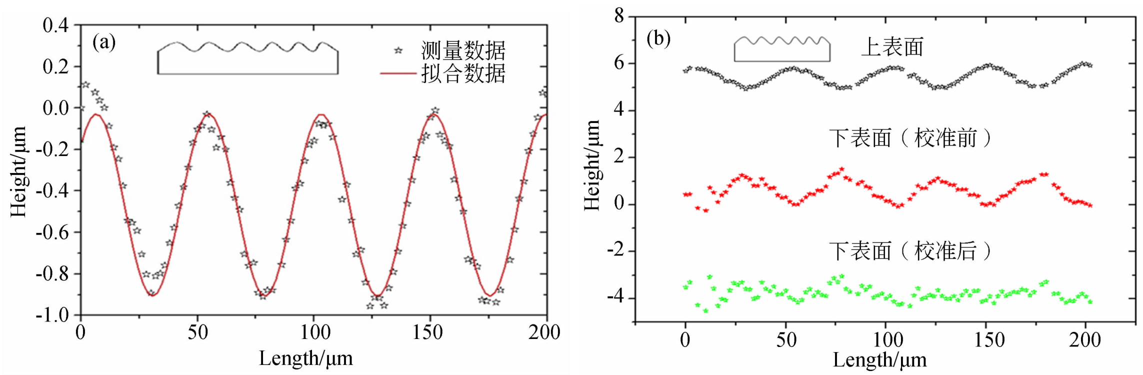


图 6 正弦调制样品向上时的上表面轮廓测量数据(a)和校准前后的下表面轮廓数据(b)

Fig. 6 The upper surface profile(a) and lower surface profiles before and after calibration (b) when the sinusoidal modulation structure is placed upward

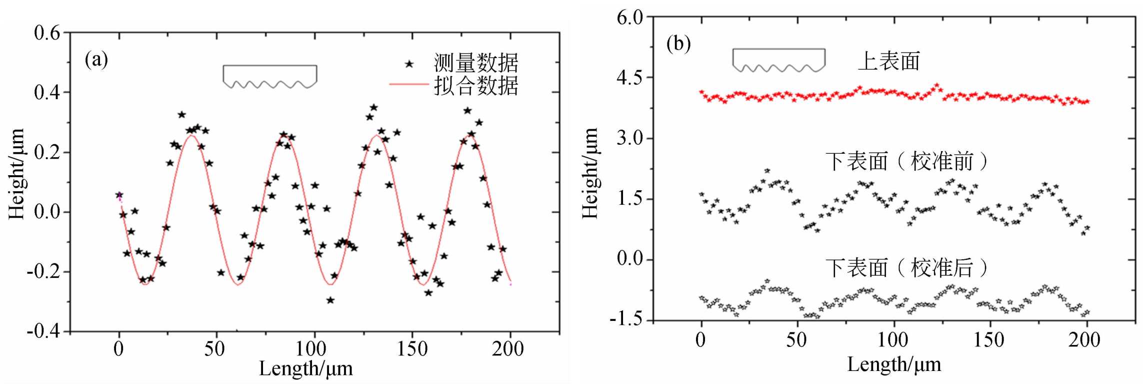


图 7 正弦调制样品向下时的上表面轮廓测量数据(a)和校准前后的下表面轮廓数据(b)

Fig. 7 The upper surface profile (a) and lower surface profiles before and after calibration (b) when the sinusoidal modulation structure is placed downward

4.3 测量不确定度分析

利用白光共焦光谱传感器测量靶丸内表面轮廓,其测量不确定度来源主要有靶丸内、外表面的白光共焦光谱仪直接测量误差、轴系的回转误差、装置的重复性测量误差以及校准模型的误差等。上述不确定度分量中,白光共焦光谱传感器的直接测量误差主要来源于光谱传感器的分辨率和线性误差,测量结果表明,本装置所采用的光谱传感器直接测量误差最大为 39 nm[15]。气浮主轴系回转精度是保证整个系统测量精度的关键因素之一,其回转误差直接叠加到测量结果中。通过测试直径为 2 mm 的标准 Cr 球(Ball Tech 公司,标称球形度偏差为 76 nm)的圆周轮廓,对模数大于 100 的圆周轮廓进行滤波并计算其最小二乘圆度,由于最小二乘圆度包括了标准球的圆度误差和轴系的回转误差,可通过和方根公式计算轴系回转精度的大小。实验结果表明,标准球的最小二乘圆度为 88 nm,由此可得本装置主轴的回转误差约为 44 nm。对靶丸内表面轮廓进行多次测量,由各测量值最小二乘圆度重复性评价系统的重复测量误差。10 次测量结果的最小二乘圆度分别为 7.158、7.176、7.243、7.154、7.096、7.143、7.103、7.177、7.133、7.155 μm,计算可得该测量列的标准偏差,即系统重复性误差为 41 nm。校准模型的误差主要来源于折射率的近似和光线入射角的近似,数值计算结果表明,折射率近似导致的最大误差约为 16 nm,光线入射角近似导致的最大误差约为 50 nm,根据和方根计算公式,可得到校准模型的测量误差为 52 nm。

表 1 是基于白光共焦光谱的靶丸内表面轮廓测量不确定度分量表,根据和方根计算公式可得,白光共焦光谱测量靶丸内表面低阶轮廓(模数 < 100)的不确定度约为 89 nm。

表 1 测量不确定度分量表

Tab. 1 Components of measurement uncertainty

不确定度分量	不确定度来源	不确定度大小/nm
u_1	直接测量误差	39
u_2	轴系的回转误差	44
u_3	重复性测量误差	41
u_4	校准模型误差	52

5 结 论

本文通过分析光线经过靶丸壳层后的传播途径,建立了靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量校准模型;搭建了基于白光共焦光谱和精密气浮轴系的靶丸内表面轮廓测量实验装置,获得了靶丸内、外表面轮廓曲线。与原子力显微镜比对测试结果表明,白光共焦光谱技术可实现靶丸模数小于 100 的低阶轮廓的准确测量;不确定度分析结果表明,白光共焦光谱测量靶丸内表面轮廓的不确定度约为 90 nm。白光共焦光谱技术不仅是精密检测靶丸内表面轮廓的可行技术手段,还可广泛应用于各类透明薄膜材料和器件内表面及厚度的精密测量领域。

参考文献:

[1] LINDL J D, AMENDT P, BERGER R L, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.

[2] HAAN S W, LINDL J D, CALLAHAN D A, *et al.*. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(5): 051001.

[3] MCEACHERN R L, MOORE C E, WALLACE R J. The design, performance, and application of an atomic force microscope-based profilometer[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1995, 13(3): 983-989.

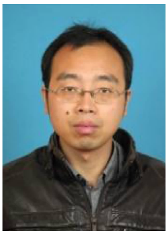
[4] STEPHENS R B, OLSON D, HUANG H, *et al.*. Complete surface mapping of ICF shells[J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 210-213.

[5] 赵学森, 孙涛, 马小军, 等. 基于 AFM 的靶丸表面轮廓仪设计及其测量精度分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2006, 4(4): 307-310.
ZHAO X S, SUN T, MA X J, *et al.*. Design of target profilometer based on AFM and its measure precision analysis[J].

Nanotechnology and Precision Engineering, 2006, 4(4): 307-310. (in Chinese)
[6] 赵学森, 高党忠, 马小军, 等. 立式靶丸AFM表面轮廓仪系统精度测试[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(8): 1014-1018.
ZHAO X S, GAO D ZH, MA X J, *et al.*. Measure precision analysis of capsule vertical-AFM surface profiler system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(8): 1014-1018. (in Chinese)
[7] HUANG H, KOZIOZIEMSKI B J, STEPHENS R B, *et al.*. Quantitative radiography: Submicron dimension calibration for ICF ablator shell characterization[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 519-524.
[8] DONG B, ZHANG Y, ZHANG W C, *et al.*. Highly sensitive, wide dynamic range displacement sensor combining chromatic confocal system and phase-sensitive spectral optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5426-5430.
[9] BOETTCHER T, GRONLE M, OSTEN W. Multi-layer topography measurement using a new hybrid single-shot technique: Chromatic Confocal Coherence Tomography (CCCT)[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10204-10213.
[10] SEPPÄ J, NIEMELÄ K, LASSILA A. Metrological characterization methods for confocal chromatic line sensors and optical topography sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(5): 054008.
[11] ZOU X C, ZHAO X S, LI G, *et al.*. Non-contact on-machine measurement using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5-8): 2163-2172.
[12] 刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(6): 1449-1457.
LIU ZH Q, YI D R, KONG L H, *et al.*. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1449-1457. (in Chinese)
[13] 戴岑, 巩岩, 张昊, 等. 微分干涉差共焦显微膜层微结构缺陷探测系统[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 255-264.
DAI C, GONG Y, ZHANG H, *et al.*. Detection system of multilayer coating microstructure defects based on differential interference contrast confocal microscopy[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 255-264. (in Chinese)
[14] KUNKEL M, SCHULZE J. Noncontact measurement of central lens thickness[J]. *Glass Science and Technology*, 2005, 78(5): 245-247.
[15] 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 17-22.
MA X J, GAO D ZH, YANG M SH, *et al.*. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 17-22. (in Chinese)

作者简介:

唐　兴(1980—),男,四川绵阳人,学士,助理研究员,2004年于四川大学获得学士学位,主要从事激光聚变靶参数测量技术研究。E-mail: 4606794@qq.com



马小军(1979—),男,四川南部人,博士,副研究员,2003年于西安电子科技大学获得学士学位,2013年于同济大学获得硕士学位,2017年于复旦大学获得博士学位,主要从事激光聚变靶参数测量技术研究。E-mail: maxj802@163.com