

文章编号 1004-924X(2013)03-0644-08

用于惯性约束聚变靶丸测量的激光差动共焦传感器

郭俊杰^{1,3}, 邱丽荣^{1*}, 王允¹, 孟婕², 高党忠²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变中心, 四川 绵阳 621900;

3. 南阳理工学院 机械与汽车工程学院, 河南 南阳 473004)

摘要:针对目前原子力显微镜等方法只能测量激光惯性约束核聚变(ICF)靶丸外表面等难题,研制了高精度、非接触、小型化的激光差动共焦传感器(LDCS)。该传感器基于差动共焦原理,利用激光差动共焦轴向响应曲线的零点对靶丸内外表面和球心分别进行定位,并结合物镜微位移驱动技术,实现靶丸内外表面和壳层厚度的高精度测量。该方法减少了靶丸表面的反射率、倾斜等因素对测量瞄准特性的影响,显著提高了系统的抗干扰能力。将传统的显微成像与差动共焦测量光路进行有机融合,实现了对被测样品的精确瞄准。初步实验与理论分析表明:当测量物镜的数值孔径 NA 为 0.65 时,LDCS 的轴向分辨力优于 5 nm,信噪比优于 1 160,过零点的标准偏差为 10 nm。该传感器为激光惯性约束核聚变靶丸测量提供了一种新的技术途径。

关键词:惯性约束聚变;靶丸测量;激光差动共焦传感器;零点定位测量

中图分类号:TP212.14;TL816.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0644

Laser differential cofocal sensor for ICF capsule measurement

GUO Jun-jie^{1,3}, QIU Li-rong^{1*}, WANG Yun¹, MENG Jie², GAO Dang-zhong²

(1. School of Optic-electronic, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. School of Mechanical & Automotive Engineering,

Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

* Corresponding author, E-mail: qiugrass@126.com

Abstract: As Atomic Force Microscope can only measure the outside surface of a capsule in the Inertial Confinement fusion (ICF), a high precision, non-contact, miniaturized Laser Differential Confocal Sensor (LDCS) is developed. Based on the differential confocal principle, the sensor positions respectively the test points on the outer surface, inner surface and spherical center of the ICF capsule in sequence by the absolute zero point of a laser differential axial intensity curve. Then it implements the high-precision measurement of the ICF capsule by combing with the high precision displacement sensor. This method reduces the influences of the surface reflectivity and tilt of the capsule and other factors on pointing characteristics and improves the anti-interference ability. Combining the traditional microscopic imaging

收稿日期:2012-11-03;修订日期:2012-12-27.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ040136);中国工程物理研究院与国家自然科学基金委联合自然基金资助项目(No. 11076004)

and differential confocal optical path organically, the precision pointing is achieved. Theoretical analysis and preliminary experiments indicate that the axial resolution of LDCS is better than 5 nm, the standard deviation of absolute zero is 10 nm and the signal to noise ratio is better than 1160 when the Numerical Aperture(NA) is 0.65. The sensor provides a new way for measuring capsules in the ICFs.

Key words: Inertial Confinement Fusion(ICF); capsule measurement; differential confocal sensor; zero positioning measurement

1 引言

激光惯性约束核聚变(Intertial Confinement Fusion, ICF)是实现核聚变的两大技术之一,是世界上研究最多、发展最快的重大前沿科技领域之一。ICF实验常用靶丸是内含D₂或DT等热核燃料的空心玻璃微球,为ICF实验的关键核心器件。分析与实验表明:靶丸内外表面的形貌、直径以及壳层厚度等几何参数是引起瑞利-泰勒不稳定性的重要因素^[1-2]。不过靶丸为空心薄壁球体结构,原子力显微术等机械探针式显微探测技术由于自身原理缺陷,只能测量靶丸的外表面形貌,而无法测量其内表面形貌、直径和壳层厚度^[3-5];白光干涉测量靶丸壳层厚度具有较高的精度,但只能测量壳层较薄的透明靶丸,无法测量壳层较厚的半透明靶丸^[6-7];X射线法可以测量任何材料和壳层厚度的靶丸,但是传统的X射线法利用胶片曝光成像,曝光时间长,效率低、精度低^[8];2007年,S A Eddinger和R B Stephens等人提出了一种新的X射线测量靶丸的方法,由于采用光电倍增管进行探测,探测效率大幅提高,但是其空间分辨力只有120 μm^[9]。因此,现有的测量方法只能测量靶丸外表面或壳层厚度等参数,无法精确测量壳层厚度和内表面形貌,靶丸内表面形貌及壳层厚度的高精度测量成为国际极受关注的难题。

近年来,共焦激光扫描显微镜以其优异的三维成像能力在生物学、半导体工艺及三维微细加工等诸多领域得到了日益广泛的应用^[10]。由于核聚变靶丸在几何尺寸、表面反射率、透光率等方面具有多样性,所以传统共焦测量靶丸时探测信号的峰值易受样品表面反射率、样品倾斜及环境干扰等因素的影响,因此传统共焦显微在ICF靶丸高精度测量的工程实践方面不具可行性。针对上述问题,本文提出了一种激光差动共焦聚变靶丸内、外轮廓及壳层厚度的测量方法^[11-12],研制了

用于激光聚变靶丸壳层厚度测量的激光差动共焦传感器(LDCS),该传感器将差动共焦显微探测光路与传统的显微成像光路有机融合,实现了“瞄测”一体化和小型化。利用该传感器构建了激光聚变靶丸测试实验系统,实现了对靶丸壳层厚度的测量,验证了激光差动共焦靶丸测量方法的可行性,理论分析与实验表明:该传感器具有高分辨力、高信噪比和非接触测量等优点。

2 激光差动共焦传感器原理

LDCS以差动共焦显微探测技术为基础^[11],融合传统的显微成像技术,实现“瞄准-测量”一体化设计,其原理如图1所示。在差动共焦显微测量部分,激光器发出的平行光经过偏振分光镜反射,以及分光镜1、2和1/4波片等的透射,经物镜汇聚到被测样品的表面,而后经样品表面反射再次通过物镜、1/4波片、分光镜2、1和偏振分光镜,被分光镜分为两路:一路经集光镜1聚焦,通过针孔1,被探测器1接收;另一路经集光镜2聚焦,通过针孔2,被探测器2接收。针孔1放置于集光镜1焦后M处,针孔2放置于集光镜2焦前M处,M对应的归一化光学坐标为 u_M 。两路探测器输出的信号经过处理后送入计算机,与物镜驱动器的位移信息结合,实现差动共焦显微测量。为了便于传感器对样品的瞄准,在差动共焦测量光路的基础上,融合了传统显微成像光路,如图1所示的显微成像部分。照明光源发出的光经过分光镜1的反射以及分光镜2、1/4波片的透射,经过物镜照射到样品表面,被样品反射的光束按原路返回到分光镜2后,被分光镜2反射、反射镜反射、滤波片透射,再经成像物镜汇聚到CCD上进行成像。通过显微成像,可以在监视器中观察被测靶丸球心是否位于监视器中心、即样品是否被瞄准。

根据差动共焦原理,设物镜和两个集光镜的参数相同,将探测器1和探测器2接收到的具有

一定轴向偏移的两路光强信号差动相减,可得差动共焦显微探测系统的光强响应^[13]:

$$I(u, u_M, v) = I_1(u - u_M, v) - I_2(u + u_M, v) =$$

$$\left| \int_0^1 2\pi\rho P(\rho) \exp[i(2u - u_M)\rho^2/4] J_0(\rho v) d\rho \right|^4 - \left| \int_0^1 2\pi\rho P(\rho) \exp[i(2u + u_M)\rho^2/4] J_0(\rho v) d\rho \right|^4, \quad (1)$$

其中: J_0 为零阶贝塞尔函数, ρ 为归一化半径, u 为轴向归一化光学坐标, v 为横向归一化光学坐标, u 和 v 的定义为:

$$\begin{cases} u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{a}{f}\right)^2 z \\ v = \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}r_0\right) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: z 为轴向离焦量, r_0 为物镜的半径, a/f 为物镜的相对数值孔径。令 $v=0$,可得系统的轴向响应:

$$I(u, u_M, 0) = I_1(u - u_M, 0) - I_2(u + u_M, 0) = \text{sinc}^2[(2u - u_M)/4\pi] - \text{sinc}^2[(2u + u_M)/4\pi]. \quad (3)$$

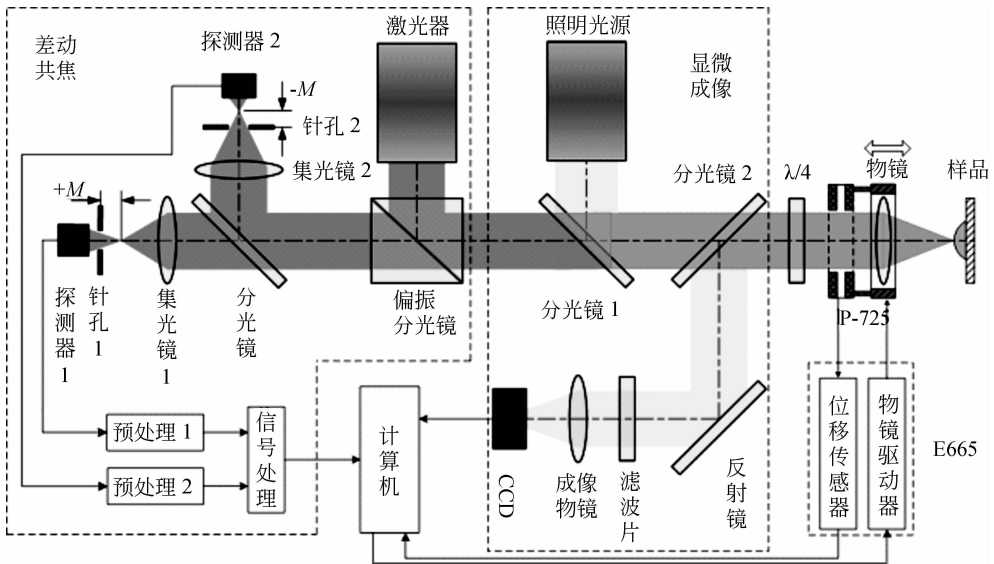


图 1 差动共焦传感器原理
Fig. 1 Schematic diagram of LDCS

由式(3)可知, u_M 的选取非常关键,根据参考文献[13],最优的 $u_M=5.21$,通过数值仿真,传统共焦与差动共焦的轴向响应曲线如图 2 所示。线段 ab 为共焦测量的线性工作区间,线段 cd 为差动共焦测量的线性工作区间。从图中可以看出,与传统共焦相比,差动共焦具有以下优点:

- (1) 轴向响应曲线的斜率大,说明其轴向分辨力高,并且斜率的最大值对应物镜聚焦的焦点,横向分辨力提高;
- (2) 两路探测信号差动相减,可以有效抑制系统的共模噪声,提高信噪比;
- (3) 有绝对零点,具有绝对跟踪能力,具有双极性,可以判断聚焦误差的方向。

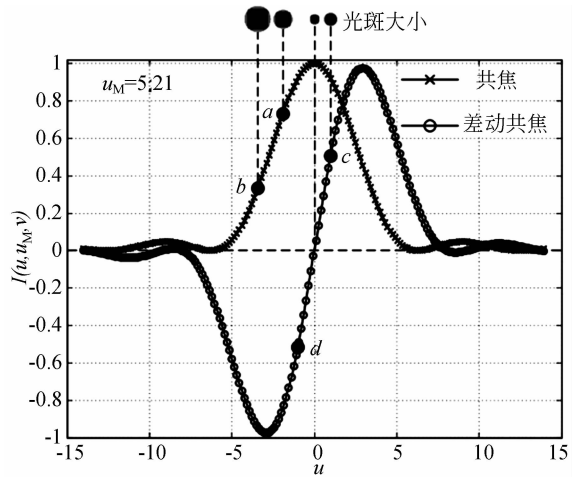


图 2 共焦与差动共焦轴向响应
Fig. 2 Axial responses of confocal and differential confocal

研制的激光差动共焦传感器如图 3 所示,光源选用波长为 632.8 nm 的半导体激光器;物镜选用美国 Newport 公司的标准显微物镜,其数值孔径 $NA=0.65$;两个集光镜采用普通的显微物镜,数值孔径为 0.25;针孔直径为 $10\ \mu\text{m}$;传感器的轴向扫描由德国 PI 公司的 P-725 驱动物镜(P-725)实现,P-725 是纳米级的物镜驱动器,内部集成高精度电容位移传感器,其位置分辨力为 0.75 nm;探测器为日本滨松公司生产的 S2386-5K。

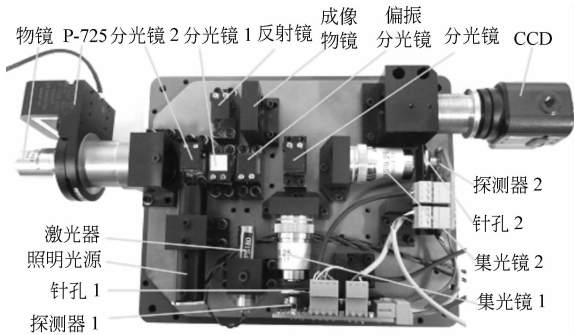


图 3 传感器照片
Fig. 3 Photo of LDSCS

3 传感器特性测试及分析

为了测试完成装调的差动共焦传感器特性,构建了如图 4 所示的实验系统。E665 是 P-725 的驱动控制器,计算机通过 E665 驱动器(E665)实现对 P-725 的控制。传感器输出信号以及 P-725 输出的位移信号经研华的 PCI1716 数据采集卡进入计算机。

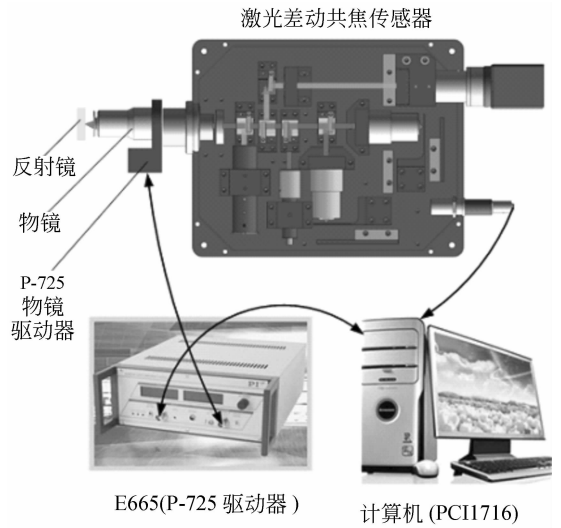


图 4 差动共焦传感器的测试系统
Fig. 4 Experimental system

3.1 传感器稳定性测试

稳定性是传感器的一项关键特性,可以反映传感器的漂移和信噪比等参数。激光差动共焦传感器稳定性测试过程为:(1)打开传感器电源让激光器和电路预热 10 min;(2)通过计算机控制 P-725 驱动传感器物镜移动,使反射镜位于物镜的焦点附近;(3)测控软件通过数据采集卡对传感器输出信号采样和记录,其中探测器 1 输出信号如图 5 所示。可以看出,测量开始时有一个稳定的过程,说明开机 10 min 系统并没有完全进入稳定的状态,主要原因是半导体激光器输出的光强不稳定。当系统稳定后,传感器在输出信号为 5.81 V 时的整体噪声小于 5 mV,所以传感器的信噪比优于 1 160。从 400~2 000 s 时间内系统工作于稳定状态,其波动小于 5 mV,说明系统的稳定性非常好。

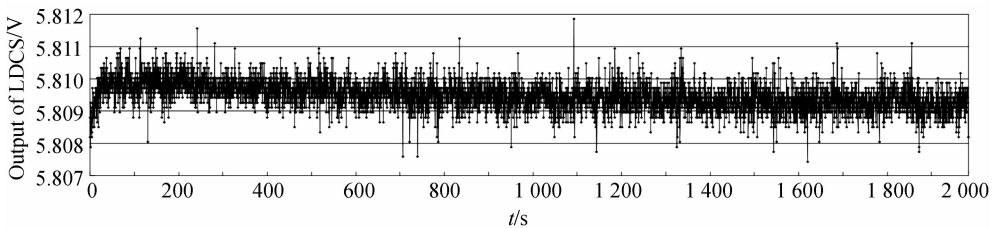


图 5 差动共焦传感器的稳定性
Fig. 5 Stability of LDSCS

3.2 传感器轴向响应测试与分析

激光差动传感器的轴向响应是其关键的特性

之一,反映了传感器在灵敏度、噪声等多方面能否满足设计要求。测试过程为:(1)将整个测试系统

开机预热 20 min, 使系统进入稳定的工作状态;
 (2) 调整反射镜, 使其位于传感器物镜焦点附近;
 (3) 由计算机控制 P-725 带动传感器的物镜沿光轴方向扫描, 同时通过测控软件记录传感器输出信号和 P-725 中位移传感器输出的位移信号。采用 matlab 软件处理得到的测试数据如图 6 所示。

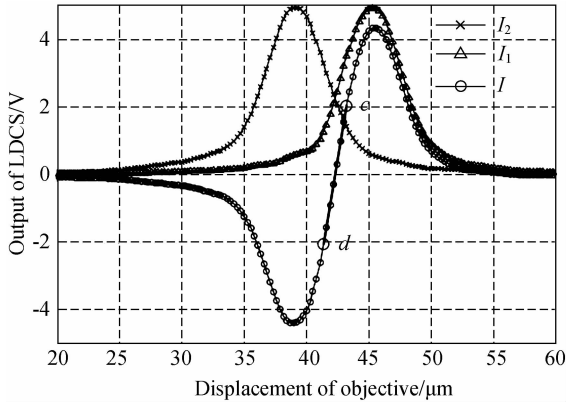


图 6 差动共焦传感器轴向响应
 Fig. 6 Axial responses of LDCS

图 6 中, 实测曲线非常光滑, 说明传感器在噪声抑制方面满足要求。线段 cd 是差动共焦轴向响应的线性工作区间, c 点的坐标为 $(43.397 \mu\text{m}, 2.373 \text{ V})$, d 点的坐标为 $(41.208 \mu\text{m}, -2.373 \text{ V})$, 可以计算得到传感器的灵敏度为 $2.168 \text{ V}/\mu\text{m}$, 满足传感器设计要求。

轴向分辨力是指差动共焦传感器对轴向相邻位置的分辨能力, 是衡量差动共焦传感器的一个重要的性能指标。因为需要测试核聚变靶丸的壳层厚度等参数, 所以差动共焦传感器的轴向分辨力是决定靶丸壳层厚度测试精度的关键参数之一。根据差动共焦传感器的轴向灵敏度可以分析计算其轴向分辨力。系统采用研华工控的 16 位数据采集卡, 其电压输入为 $-10 \sim 10 \text{ V}$, 则数据采集卡的电压分辨力为:

$$20 \text{ V}/2^{16} = 0.3 \text{ mV}. \quad (4)$$

由于差动共焦传感器整体稳定后的总体噪声小于 5 mV , 而数据采集卡的电压分辨力远小于噪声, 所以在分析系统分辨力时, 只考虑噪声因素。对于此类高分辨力传感器直接标定其分辨力较为困难, 其分辨力主要受总体噪声的影响, 一般认为此类传感器分辨力应为其实际工作条件下噪声的 $1.5 \sim 2$ 倍^[14], 所以传感器的轴向分辨力应为:

$$5 \text{ mV} \times 2/2.168 (\text{V}/\mu\text{m}) = 4.6 \text{ nm}. \quad (5)$$

3.3 传感器重复性测试与分析

为了考察传感器的重复性, 在测试系统稳定工作的状态下, 控制 P-725 沿光轴方向进行多次扫描, 使物镜的聚焦点多次经过反射镜的表面, 测得相同条件下的多个差动共焦响应曲线, 结果如图 7 所示。对测量结果进行数据处理, 得差动共焦传感器轴向响应曲线过零点的坐标, 结果如表 1 所示。

表 1 差动共焦传感器过零点重复性测试结果

Tab. 1 Repeatability results of LDCS

(μm)

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 标准偏差 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 零点坐标 | 17.211 | 17.227 | 17.217 | 17.233 | 17.212 | 17.205 | 17.202 | 17.210 | 0.01 |

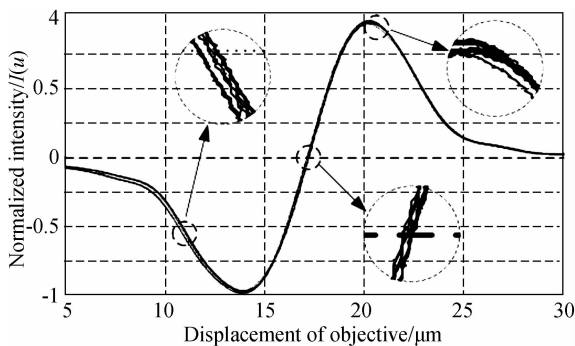


图 7 差动共焦传感器轴向响应重复性
 Fig. 7 Repeatability of LDCS

从图 7 中可以看出, 差动共焦在零点处的重复性最优, 说明利用过零点对待测靶丸进行瞄准测量可以最大限度地提高测量精度。

4 激光差动共焦传感器对 ICF 靶丸测试与分析

为了验证差动共焦传感器测量 ICF 靶丸原理的可行性, 首先在中国工程物理研究院用 X 射线法对靶丸进行测量, 靶丸 X 射线照片如图 8 所示。X 射线法测量的靶丸内径为 $1277.89 \mu\text{m}$, 壳层厚

度为 39.86 μm 。用图 4 所示的测试系统对靶丸一点进行测试,结果如图 9 所示。多次测量得到靶丸内外表面位置坐标和光学厚度的结果如表 2 所示。

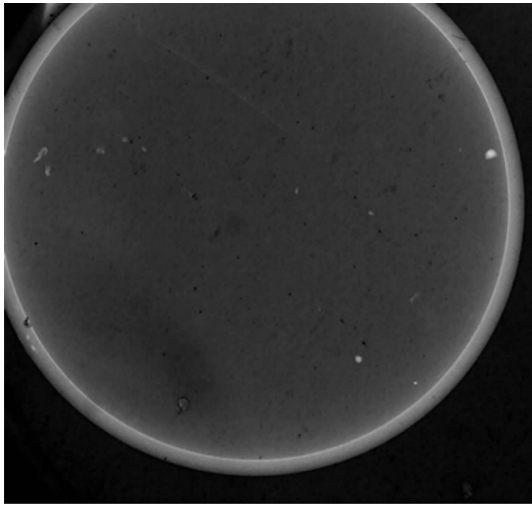


图 8 ICF 靶丸的 X 光照片
Fig. 8 X-ray photo of ICF capsule

从图 9 可以看出,虽然内外表面测试曲线的峰值不同,但是利用轴向响应的过零点,结合高精度

的轴向位移传感器,可以准确定位靶丸的外表面和内表面,并且避免了表面反射率、材料透射率等因素的不利影响,这对测量不同材料、不同透射率的靶丸非常有意义。从表 2 可以看出,内表面的标准偏差与上述的重复性测试结果较为接近,说明测试结果可信。内外表面测量的标准偏差不同,主要是由表面粗糙度引起的。由于加工工艺等因素的限制,靶丸外表面的粗糙度大于内表面,所以外表面的标准偏差大于内表面的标准偏差。

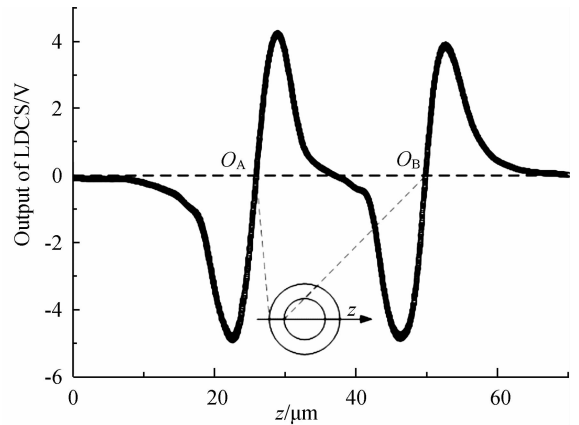


图 9 激光差动共焦传感器靶丸测试曲线
Fig. 9 ICF capsule measurement curve of LDCS

表 2 靶丸单点光学厚度测试结果

Tab. 2 Measurement results of one point optical thicknesses for ICF capsule (μm)

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 标准偏差 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 外表面位置坐标(O_A 点 z 向坐标) | 25.740 | 25.778 | 25.761 | 25.721 | 25.695 | 25.706 | 0.029 4 |
| 内表面位置坐标(O_B)点 z 向坐标) | 49.844 | 49.837 | 49.852 | 49.871 | 49.829 | 49.833 | 0.014 1 |
| 光学厚度 | 24.104 | 24.062 | 24.091 | 24.15 | 24.134 | 24.127 | 0.029 3 |

LDCS 测量得到的靶丸光学厚度的平均值为 24.111 μm 。根据中国工程物理研究院激光聚变中心提供的靶丸相关参数,采用光线追迹算法^[15],计算得到靶丸壳层厚度为 40.272 μm 。两种方法测量壳层厚度的相对误差为:

$$\delta = \frac{40.272 - 39.86}{39.86} \times 100\% = 1.0\% \quad (6)$$

上述结果可以证明,LDCS 测量靶丸光学厚度和壳层厚度的方法是可行的。

以上实验只是对靶丸的一个点进行测试,目的是为了验证激光差动共焦传感器测量靶丸方法的可行性。如果要对靶丸整体的壳层厚度均匀性和

内表面形貌等参数进行测量,则需要采用高精度气浮轴承等设备带动靶丸旋转,用激光差动共焦传感器对靶丸表面进行逐点扫描测量,具体方法见参考文献^[12]。

5 结 论

针对目前原子力显微镜等方法只能测量 ICF 靶丸外表面等一系列靶丸测试的难题,提出了利用差动共焦轴向响应曲线过零点实现靶丸测量方法,研制了相应的激光差动共焦传感器。该传感器将激光差动共焦显微测量和传统显微成像有机融合,

实现了“瞄测”一体化。实验表明,该传感器的信噪比为 1 160,轴向分辨力优于 5 nm,过零点的标准偏差为 10 nm,具有高信噪比、高稳定性、高分辨力等优点。利用差动共焦轴向响应曲线的过零点可以对靶丸内外表面进行精确定位,满足

了 ICF 靶丸的测试要求,初步实现了对 ICF 靶丸光学厚度和壳层厚度的测试。通过与 X 射线法测量结果比对验证了激光差动共焦测量 ICF 靶丸方法的可行性,为进一步的研究工作奠定了基础。

参考文献:

- [1] REMINGTON B A, WEBER S V, HAAN S W, *et al.*. Laser-driven hydrodynamic instability experiments [J]. *Phys. Fluids B.*, 1993, 5(7): 2589-2595.
- [2] 葛双全,马小军,高党忠. ICF 靶丸表面形貌分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2007, 27(4): 348-351.
GE SH Q, MA X J, GAO D ZH. Power spectra estimation of ICF capsule surface topography [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2007, 27(4): 348-351. (in Chinese)
- [3] MCEACHEM R L, MOORE C E, WALLACE R J. The design, performance, and application of an atomic force microscope-based profilometer [J]. *J Vac Sci Technol A*, 1995, 13(3): 893-899.
- [4] STEPHENS R B, MROCZKOWSKI T, GIBSON J. Seeing shell wall fluctuations [R]. GA-A23348, 2000.
- [5] STEPHENS R B, OLSON D, HUANG H, *et al.*. Complete surface mapping of ICF shells [R]. GA-A24452, 2003.
- [6] POWERS T F. Improved nonconcentricity characterization of transparent laser fusion targets by interferometry [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1981, 20(4): 1355-1358.
- [7] STEPHENS R B, STEINMAN D A, HOPPE M L. White light interferometry for the optical characterization of transparent ICF shells [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(4): 646-649.
- [8] MAYO S C, MILLER P R, WILKINS S W, *et al.*. Quantitative X-ray projection microscopy: phase-contrast and multi-spectral imaging [J]. *Journal of Microscopy*, 2002, 207(2): 79-96.
- [9] EDDINGER S A, STEPHENS R B, HUANG H, *et al.*. Precision X-ray optical depth measurements in ICF shells [J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 525-529.
- [10] 周拥军,陈德强,黄文浩,等. 共聚焦激光扫描荧光显微镜扫描系统研制 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 582-587.
ZHOU Y J, CHEN D Q, HUANG W H, *et al.*. Development of the scanning system for confocal laser scanning fluorescence microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 582-587. (in Chinese)
- [11] ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution [J]. *Optics Express*, 2004, 12(21): 5013-5021.
- [12] 赵维谦,郭俊杰,邱丽荣,等. 差动共焦瞄准触发式空心球体内外轮廓及壁厚测量方法与装置. 中国, ZL200910081280.2[P]. 2010.
ZHAO W Q, GUO J J, QIU L R, *et al.*. Measurement method and equipment of the outside outline, inside outline and wall thickness of the hollow ball by differential confocal targeting trigger technique. China. ZL200910081280.2[P]. 2010. (in Chinese)
- [13] ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R, *et al.*. A new laser heterodyne confocal probe for ultraprecision measurement of discontinuous contours [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16: 497-504.
- [14] 陈喲. 一种亚纳米级分辨力同轴式激光轮廓测量系统的研制[D]. 成都: 四川大学, 2003.
CHEN D. *A Coaxial Interference Laser Profiling System with Sub-nanometer Resolution* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. (in Chinese)
- [15] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, *et al.*. Lenses axial space ray tracing measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3608-3617.

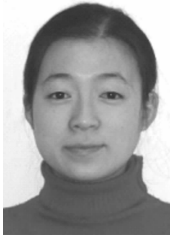
作者简介:



郭俊杰(1974—),男,河南周口人,博士研究生,副教授,2005年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: guojian-min930@126.com



王 允(1984—),男,山东威海人,博士研究生,2008年于北京理工大学获得学士学位,主要从事激光光学测量方向研究。E-mail: alotrabbits@163.com



孟 婕(1982—),女,江苏常州人,博士,助理研究员,2010年于浙江大学获得博士学位,主要从事ICF靶丸参数测量技术方面的研究。E-mail: elea-nor920@gmail.com



高党忠(1968—),男,山西孟县人,硕士,副研究员,1994年于兰州大学获得硕士学位,主要从事ICF靶丸参数测量技术方面的研究。E-mail: dgaocn@yahoo.com

通讯作者:



邱丽荣(1974—),女,黑龙江绥滨人,博士后,副教授,硕士生导师,2000年于西安交通大学获得硕士学位,2005年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事差动共焦理论与精密光学检测方面的研究。E-mail: qiugrass@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)