

文章编号 1004-924X(2011)01-0017-06

# 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度

马小军,高党忠,杨蒙生,赵学森,叶成钢,唐永建  
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

**摘要:**为了精确测量自支撑金属薄膜厚度及其厚度分布,提出了基于白光共焦光谱传感器的金属薄膜厚度测量技术。介绍了该技术的测量原理及系统结构,研究了系统的测量不确定度。利用相相对顶安装的白光共焦传感器组、精密位移平台并结合自制的薄膜厚度校准样品,实现了对厚度为 10~100  $\mu\text{m}$  的自支撑金属薄膜的厚度及厚度分布的精确测量;通过研究系统的传感器测量不确定度、薄膜厚度校准样品不确定度、上下传感器安装误差及系统重复性测量误差,获得了系统的测量不确定度数据。试验结果表明,该系统的测量不确定度在 0.12  $\mu\text{m}$  左右,基本满足惯性约束聚变(ICF)靶参数测量所需的稳定性好、测量精度高、非破坏性测量等要求。

**关键词:**白光共焦光谱;金属薄膜;膜厚测量;惯性约束聚变

**中图分类号:** O484.5; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0017

## Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology

MA Xiao-jun, GAO Dang-zhong, YANG Meng-sheng,  
ZHAO Xue-sen, YE Cheng-gang, TANG Yong-jian

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** To precisely measure the thickness and thickness distribution of a self-supporting metal film, the measurement technology based on a chromatic confocal spectral sensor was established. The measurement principle and system structure were described in detail, and the measurement uncertainty was analyzed. The thickness and thickness distribution of the self-supporting metal film with the thickness between 10-100  $\mu\text{m}$  were tested using the sensor group, precise displacement platform and precise calibrated samples. The measurement uncertainty was evaluated based on analysis of sensor accuracy, the uncertainty of calibration sample thickness, the positioning accuracy of two sensors and the system repetition uncertainty. Experimental results indicate that the measurement uncertainty is about 0.12  $\mu\text{m}$ , which satisfies the requirements of Inertial Confinement Fusion(ICF) for target parameter measurement in high stabilization, high precision and non-destruction.

**Key words:** chromatic confocal spectrum; metal thin film; film thickness measurement; Inertial Confinement Fusion(ICF)

收稿日期:2010-04-30;修订日期:2010-08-10.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目

## 1 引言

在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)的冲击波传播、辐射烧蚀及状态方程物理实验研究中,常用的靶材料为 Al, Cu 等 10~100  $\mu\text{m}$  厚的金属薄膜,由于薄膜厚度及其分布与冲击波速度、压强等物理实验结果直接相关,因此需要精确测量薄膜厚度<sup>[1-2]</sup>。长期以来,薄膜厚度的测量主要采用传统的单面定位测量法,即采用适当的方式使薄膜定位形成膜-基台阶,然后用台阶仪或干涉仪对膜-基台阶进行测量,用膜-基台阶高度代替薄膜厚度。由于膜-基之间的定位误差以及薄膜的定位制样对薄膜样品的损伤,薄膜厚度的精密测量一直存在难以克服的技术难题。2004年,LANL的 A. Nobile 等人利用相相对顶安装的激光共焦传感器组实现了对金属薄膜厚度的精密检测,其传感器测量不确定度在 0.2  $\mu\text{m}$  左右<sup>[3]</sup>,对于数十微米的薄膜样品,这样的测量不确定度尚不能满足精密物理实验的需求。

近十多年来,白光共焦光谱等光学计量技术由于具有三维层析成像能力,已广泛应用于表面轮廓与三维精细结构的测量领域<sup>[4-10]</sup>,因此,利用相相对顶安装的两白光共焦传感器组,并结合精密的位移平台,可以实现金属薄膜厚度的高精度无损检测。与传统单面定位测量法相比较,该方法消除了制样过程中薄膜-基底之间的定位误差,提高了测量结果的置信度。本文详细介绍了基于相相对顶安装的两白光共焦光谱传感器测量金属薄膜厚度的原理与系统结构,研究了系统性能;测量不确定度分析研究表明,该系统的测量绝对误差在 0.12  $\mu\text{m}$  左右。

## 2 测量系统与原理

白光共焦光谱精密位移测量传感器是利用光谱共焦的原理,超精度测量各种位置的变化。传感器探头由光源和特殊光学透镜组构成,透镜组将光源发射出的多色平行光(白光)进行光谱分光,形成一系列波长不同的单色光,同时再将其同轴聚焦,由此在有效量程范围内形成了一个焦点

组,每一个焦点的单色光波长都对应着一个轴向位置。在被测物体表面聚焦的单色光又被反射到控制器,利用控制器内的光谱分析仪可确定该反射光的波长,从而确定被测物体的位置。

为从根本上克服单面定位测量法测量微米级金属薄膜厚度时的不足,本方案采用如图 1 所示的两白光共焦光谱传感器“对顶相向布置”的相对测量法,将两个光探针传感器的光轴对顶相向调整到一条直线上,其中光探针传感器 A 用于聚焦瞄准定位样品的上表面,光探针传感器 B 用于聚焦瞄准被测样品的下表面。测量样品前首先采用高稳定性的“标准厚度样品”对系统上下传感器的相对位置进行标定,由式(1)求得上下传感器间的相对位置关系量  $a$ ,测量样品时,再使两光探针传感器分别聚焦到“被测薄膜样品”的上、下表面,在保持上下传感器位置固定的情况下,利用传感器自身的测量范围完成对样品的测量(待测样品厚度小于上下传感器的测量范围之和),由式(2)可得到待测样品的厚度。

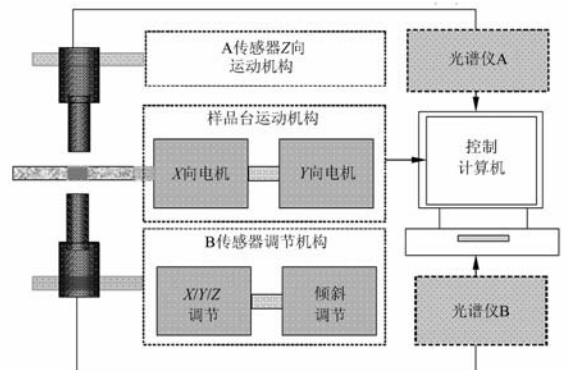


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system

采用一个微米级运动精度的二维伺服运动平台作为载片台,承载被测薄膜和标准量块,对薄膜测点的位置进行自动扫描,完成对薄膜厚度分布的测量。

$$x_{s,a} + x_{s,b} - a = t_s, \quad (1)$$

$$t_m = x_{m,a} + x_{m,b} - a, \quad (2)$$

式中,  $x_{s,a}$ ,  $x_{s,b}$ ,  $x_{m,a}$ ,  $x_{m,b}$  分别为标准厚度薄膜样品与待测薄膜样品的上下表面的白光共焦光谱测量数据,  $t_s$  和  $t_m$  分别为标准厚度薄膜样品与待测薄膜样品的厚度。

### 3 系统校准及测量不确定度分析

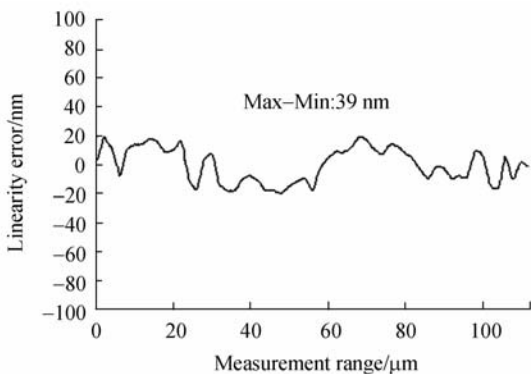
#### 3.1 白光共焦传感器的测量不确定度测定

从式(1)、(2)可以看出,传感器 A、传感器 B 的测量不确定度是影响待测样品厚度的关键因素。表 1 是传感器 A、传感器 B 对不同厚度的标准台阶样品的测量结果,从数据中可以看出,传感器 A、传感器 B 的最大测量误差为 4.4 nm 和 7.6 nm。由于白光共焦传感器进行 Z 向测量时不需

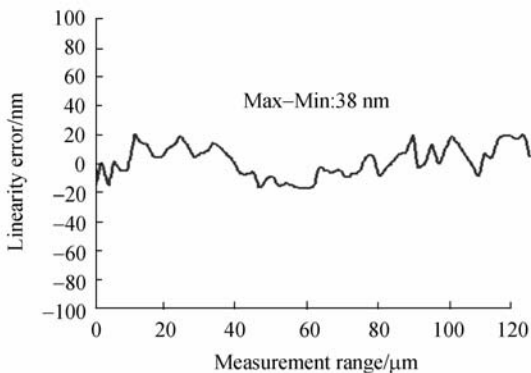
表 1 标样的共焦光谱测量数据

Tab.1 Measuring results of standard step sample (nm)

	测量值	误差	标称值
传感器 A	404	4.4	408.4±2.8
传感器 B	416	7.6	



(a)共焦传感器 A  
(a)Confocal sensor A



(b)共焦传感器 B  
(b)Confocal Sensor B

图 2 共焦传感器 A、B 的线性度误差

Fig.2 Linearity errors of chromatic confocal sensors A and B (data from STIL Company)

要 Z 轴扫描,在特定的光波常范围内,其波长与 Z 向位置一一对应,在其有效量程范围内,其测量线性度也会影响系统的测量不确定度。图 2 是对传感器 A、传感器 B 的线性度测量曲线,从测量结果可以看出,传感器 A、传感器 B 的线性度误差分别为 39 nm 和 38 nm,由此可以判定,在传感器的测量范围内,传感器的测量误差最大为 39 nm。

#### 3.2 校准样品制备及不确定度分析

校准样品的厚度  $t_s$  是影响系统测量不确定度的另一个主要误差来源,为提高系统的测量不确定度,需要将其厚度误差控制在合适的范围内。本文利用磁控溅射方法,制备了 1 μm 厚的 Au 薄膜校准样品,图 3 是利用白光干涉法测量的 Au 薄膜校准样品的厚度分布数据,从数据中可以看出,其厚度标准偏差  $u_1$  为 23 nm。设备校准误差引起的不确定度  $u_2$ ,可根据证书给出的标准台阶样品的最大不确定度采用 B 类方法进行评定。标准样品 [(9 804±61) nm)] 的最大误差为 61 nm,包含因子为  $\sqrt{3}$ ,当被测样品为 9 804 nm(不确

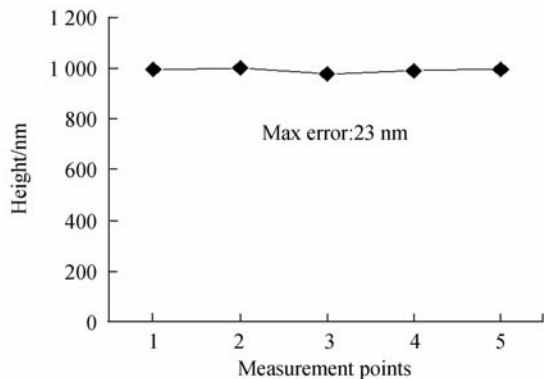


图 3 Au 膜的厚度分布数据

Fig.3 Thickness distribution data of Au film

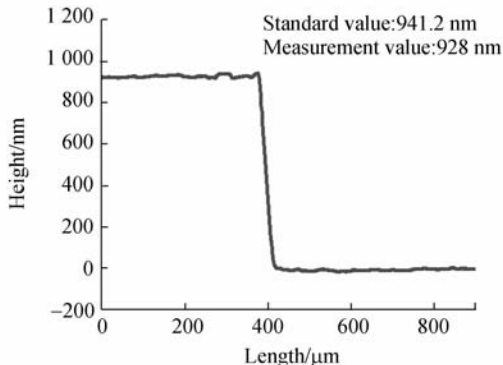


图 4 标准样品的白光干涉法测量轮廓

Fig.4 Profile of standard step sample measured by white interferometer

定度可能最大)时,标准不确定度  $u_2$  为:

$$u_2 = \frac{61}{\sqrt{3}} = 35.2 \text{ nm}, \quad (3)$$

由此可以判断,所制备的校准样品厚度误差  $u(t)$  为

$$u(t) = \sqrt{u_+ u} = \sqrt{23^2 + 35.2^2} = 42 \text{ nm}. \quad (4)$$

图 4 是白光干涉法对厚度与所制备校准样品厚度相当的 VLSI 标准样品的测量数据,从测量结果可以看出,白光干涉法测量结果与标样的标称值误差  $< 15 \text{ nm}$ ,好于所制备校准样品的厚度评定误差。

### 3.3 系统的安装不确定度分析

由于传感器 A、传感器 B 的对准安装不确定度会导致测量结果失真,本文通过一个微米级精度的三维运动平台调整传感器 A 与传感器 B 的相对位置,来确保两传感器的同轴度在要求的精度范围内。为了判断两传感器是否已达到对准精度,通过上下传感器对  $10 \mu\text{m}$  宽的通孔十字标记样品上下表面的同时测量,对两传感器的对准不确定度进行了分析评定,测量结果表明,两传感器在 X、Y 向的对准误差  $< 1 \mu\text{m}$ ,其对测量结果的影响可忽略。

### 3.4 系统测量不确定度分析

根据上述分析,利用双面白光共焦光谱法测量金属薄膜厚度,其误差来源主要有传感器 A、传感器 B 带来的测量误差,系统校准样品带来的系统误差等,同时,机械结构、环境振动等也会带入

随机误差。图 5 是系统对同一位置的重复性测量数据,从测量数据的分布可以看出,系统重复性测量数据的标准偏差为  $13 \text{ nm}$ 。

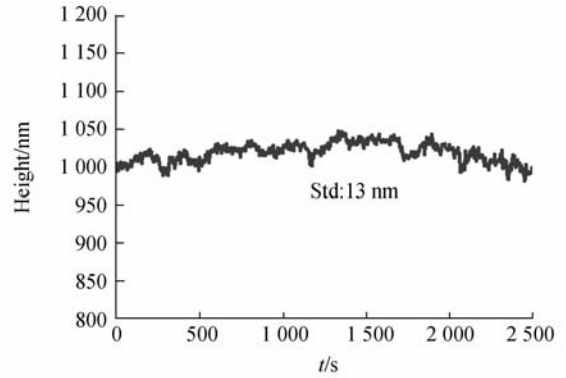


图 5 系统重复测量误差曲线

Fig. 5 Repeatability error curve of measuring system

按一般不确定度计算公式,合成标准不确定度为:

$$u(L) = \sqrt{u^2(a) + u^2(b) + u^2(t) + u^2(\text{random})} = 70 \text{ nm}. \quad (5)$$

由表 2 中各不确定度来源分量可以看出,各分量误差在同一量级,其分布可近似为均匀分布,取置信概率  $P=99\%$ ,则扩展不确定度为

$$U_{99} = 1.71 \times 68.4 = 119.7 \text{ nm}. \quad (6)$$

为进一步校验系统的测量不确定度,利用测量磁控溅射方法制备了  $3.7 \mu\text{m}$  厚的 Au 膜,图 6 是 Au 膜的垂直扫描干涉方法(VSI)与双面共焦光谱仪(CCM)对该样品的测试结果,其厚度分别为  $3.740 \mu\text{m}$  和  $3.743 \mu\text{m}$ ,二者的测量结果具有高度的一致性。

表 2 不确定度汇总表

Tab. 2 Summary of uncertainty

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度/nm	灵敏度系数
$u(a)$	传感器 A 测量误差	39	1
$u(b)$	传感器 B 测量误差	38	1
$u(t)$	校准样品固有误差	42	1
$u(\text{random})$	设备测量重复性	13	1

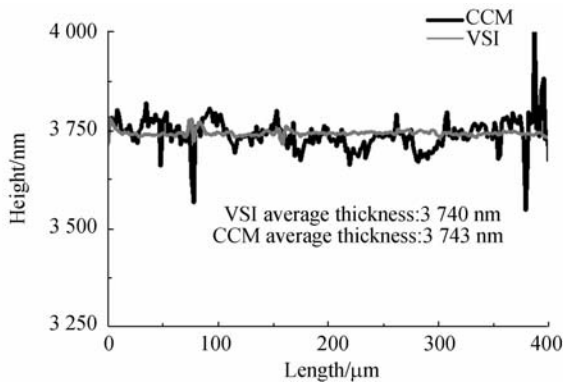


图6 Au膜的干涉法与共焦光谱法测量数据

Fig. 6 Measuring data of Au film measured by vertical scanning interferometer and chromatic confocal spectrum

## 参考文献:

- [1] 常铁强,张均,张家泰,等.激光等离子体相互作用与激光聚变[M].长沙:湖南科学技术出版社,1991.  
CHANG T Q, ZHANG J, ZHANG J T, *et al.*. *Laser-Plasma Interaction and Laser Fusion* [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1991.
- [2] 江少恩,李三伟.辐射温度与其驱动冲击波速度的定标关系研究[J].物理学报,2009,58(12):8440-8447.  
JIANG SH E, LI S W. Investigation of scaling laws for radiation temperature with shock wave velocity in AL[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8440-8447. (in Chinese)
- [3] NOBILE A, DROPINSKI S C, EDWARDS J M, *et al.*. Fabrication and characterization of targets for shock propagation and radiation burnthrough measurements on Be-0.9% AT. % Cu alloy[J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 127-136.
- [4] 王孝坤,王丽辉,张学军.干涉法实时测量浅度非球面技术[J].光学精密工程,2008,16(2):184-189.  
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing of weak asphere surface by real-time interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 184-189. (in Chinese)

## 4 结 论

基于“相相对顶安装”的两白光共焦传感器、精密位移平台及高不确定度的校准样品,实现了对厚度为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 的自支撑金属薄膜的厚度及其分布的精确测量,其绝对不确定度在 $0.12\ \mu\text{m}$ 左右。将该技术成功应用于辐射烧蚀、状态方程等物理实验用靶中金属薄膜厚度及Al台阶样品的精确测量,解决了长期以来对自支撑金属薄膜厚度测量样品制样及薄膜-基底间连接误差难以控制的难题,提高了测量结果的置信度。

- [5] HARASAKI A, SCHMIT J, JAMES C, *et al.*. Offset of coherent envelope position due to phase change on reflection[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2102-2106.
- [6] DOI T, TOYODA K, TANIMURA Y. Effects of phase changes on reflection and their wavelength dependence in optical profilometry [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(28): 7157-7161.
- [7] SUNGDO C, PAUL C L, ZHU H, *et al.*. Non-translational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2605-2613.
- [8] KEBIN S, P LI P, YIN S Z, *et al.*. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light [J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2096-2101.
- [9] GARZON J, GHARBI T, MENESES J. Determination of the refractive index and thickness in tissues by chromatic confocal microscopy[J]. *Revista Colombiana de Fisica*, 2008, 40(1): 140-142.
- [10] CHUN B S, KIM K, GWEON D. Three-dimensional surface profile measurement using a beam scanning chromatic confocal microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 7(80): 73706-73712.

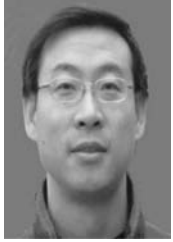
## 作者简介:



**马小军**(1979—),男,四川南部人,助理研究员,2003年于西安电子科技大学获学士学位,主要从事 ICF 靶参数精密检测技术的研究。E-mail: wildhorseyun@yahoo.com.cn



**赵学森**(1979—),男,黑龙江鸡西人,博士,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为中国工程物理研究院激光聚变研究中心博士后,主要从事 ICF 靶丸表面形貌检测技术的研究。E-mail: zhaoxuesen@yahoo.com.cn



**高党忠**(1968—),男,山西孟县人,副研究员,1994年于兰州大学获得硕士学位,主要从事 ICF 靶分析测试技术的研究。E-mail: dgaocn@yahoo.com.cn



**叶成钢**(1977—),男,四川绵阳人,2008年毕业于绵阳师范学院,主要从事 X 射线无损检测技术的研究。E-mail: yilu.yang@yahoo.com.cn



**杨蒙生**(1973—),男,四川绵阳人,副研究员,2007年于北京机械工业学院获得硕士学位,主要从事薄膜热处理技术的研究。E-mail: yangmengsheng@126.com



**唐永建**(1955—),男,四川仁寿人,研究员,博士生导师,现为中国工程物理研究院激光聚变研究中心科技委主任,主要从事 ICF 物理实验及靶科学与制备技术的研究。E-mail: tangyongjian2000@sina.com

## ● 下期预告

## 空间能量传导通道模型的实验和理论成果

V. Apollonov, N. V. Pletnev

(A. M. Prokhorov General Physics Institute, Vavilov Str., Moscow 119991 Russia)

展示了关于研制空间能量传递的超长传导通道技术的实验和理论工作结果。分析了高重频脉冲激光系统和这一项目中的最重要的组件。详细讨论了基于大范围能量传递的传导通道这一想法的光学系统和尘埃等离子体。讨论了测试等离子体导电性的实验方法和新的测量数据。强调了“脉冲发生器”的新应用。