



·惯性约束聚变物理与技术·

# 靶丸壳层厚度及其分布的白光反射光谱测量技术

樊 婷<sup>1,2</sup>, 马小军<sup>1</sup>, 王宗伟<sup>1</sup>, 王 琦<sup>1</sup>, 何智兵<sup>1</sup>, 易 勇<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 为了精密检测靶丸壳层厚度及其分布数据, 开展了靶丸壳层厚度及其分布的白光反射光谱测量技术研究。介绍了靶丸壳层的白光反射光谱及其光谱数据处理方法(极值法、峰值拟合法、干涉级次校正法等)的基本原理, 搭建了基于白光反射光谱的精密回转轴系测量装置; 开展了 GDP 靶丸壳层厚度及其分布的白光反射光谱测量、数据处理和可靠性验证实验, 获得了靶丸壳层厚度圆周分布曲线。结果表明, 基于峰值拟合法和干涉级次校正的白光反射光谱技术可实现靶丸壳层厚度及其分布的准确测量, 其测量误差小于 0.1  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 白光反射光谱; 厚度分布; 峰值拟合法; 干涉级次校正法; 靶丸

中图分类号: TL632<sup>+.1</sup>

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210179

## White light spectroscopy technology for measuring the uniformity of capsule shell thickness

Fan Ting<sup>1,2</sup>, Ma Xiaojun<sup>1</sup>, Wang Zongwei<sup>1</sup>, Wang Qi<sup>1</sup>, He Zhibing<sup>1</sup>, Yi Yong<sup>2</sup>

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** To measure accurately the thickness and its distribution of capsule, the white light reflection spectrum measurement technology is studied. The basic principle of white light reflection spectrum and the corresponding data processing methods, such as the extreme value method, the peak fitting method and the interference order correction method, are analyzed. Based on the white light reflection spectrum and the precision rotary axis system, the measuring apparatus applied to determine the shell thickness and its distribution of the capsule is developed. The white light reflectance spectrum measurement, data processing and reliability verification experiments of GDP capsule are carried out and the circular thickness distribution curve of capsule is obtained. The research results show that the thickness and its distribution of capsule can be measured accurately by white light reflectance spectrum technology based on spectral peak fitting method and interference order correction method and the measurement error is less than 0.1  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** white light reflection spectroscopy; thickness distribution; peak fitting method; interference order correction method; capsule

靶丸壳层厚度分布特征等任何偏离理想球形的初始扰动与靶丸内爆性能紧密相关, 因此, 靶丸壳层厚度均匀性是激光惯性约束聚变(ICF)物理实验中需要严格控制的技术指标之一<sup>[1]</sup>。

目前, 常用的靶丸壳层厚度及其分布测量方法主要有干涉条纹形状法<sup>[2]</sup>、X 射线照相法<sup>[3-5]</sup>和激光差动共焦法<sup>[6-9]</sup>。在上述测量方法中, 干涉条纹形状法基于马赫-森德干涉原理, 通过分析干涉条纹图像获得靶丸壳层厚度, 该方法测量精度约 10%, 不能获得靶丸壁厚分布数据。X 射线照相法利用底片或光耦 CCD 测量 X 射线透过靶丸各壳层材料后的灰度图像, 通过对靶丸灰度图像各壳层界面的精确定位实现对靶丸壁厚及其分布的测量, 该方法测量效率高, 测量不确定度约 1  $\mu\text{m}$ 。激光差动共焦法利用激光差动共焦技术对靶丸壳层的内、外表面进行精密层析定焦, 根据靶丸内外表面各点的定焦信息获得靶丸壁厚参数, 结合三维回转扫描技术, 可实现靶丸壁厚分布的测量,

\* 收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-09-02  
基金项目: 科学挑战专题项目(TZ2018006)  
联系方式: 樊 婷, fanlixil@163.com。  
通信作者: 马小军, maxj802@163.com。

该方法测量精度较高,测量系统较为复杂。

白光反射光谱技术是一种传统的薄膜涂层厚度及光学常数测量技术,具有稳定性好、测量精度高、非破坏性测量等优点,在平面薄膜涂层折射率、厚度等参数的测量中得到广泛应用。由于ICF靶丸为空心球壳,在靶丸顶点数 $10\ \mu\text{m}$ 范围内可近似为平面薄膜<sup>[10]</sup>,因此,本文开展了基于显微白光反射光谱的靶丸壳层厚度及其分布测量技术研究,搭建了基于显微白光反射光谱和精密旋转轴系的靶丸壳层厚度及其分布测量装置,开展了基于不同峰值探测算法的靶丸壳层厚度及其分布测量实验,获得了靶丸壳层厚度分布测量数据,其测量偏差小于1%。

## 1 测量原理

当一束光线垂直入射到靶丸上表面时,在靶丸上表面顶点可近视为平面的局部区域内,光线经过靶丸壳层内、外表面反射后在入射光一侧发生干涉,干涉光强 $I_R$ 可表示为<sup>[11]</sup>

$$I_R = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} h\right) \quad (1)$$

式中: $I_1, I_2$ 分别为靶丸内外表面反射光强度; $h$ 为靶丸壳层厚度; $\lambda$ 为入射光波长。

从式(1)可以看出,靶丸壳层干涉信号强度与靶丸壳层厚度呈类余弦分布,当靶丸壳层厚度与入射光波长满足下式时,干涉光强具有极大值

$$2nh + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad (2)$$

式中: $n$ 为靶丸壳层折射率; $m(m=1,2,3,\dots)$ 为干涉级次。

若相邻干涉峰极大值对应的波长为 $\lambda_i, \lambda_j$ ,则靶丸壳层厚度可表示为

$$h = \frac{\lambda_i \lambda_j}{2n(\lambda_i - \lambda_j)} \quad (3)$$

由式(2)可以看出,基于靶丸壳层不同波长下的干涉光强信号即白光反射光谱,通过2个相邻干涉谱峰的波长可计算出靶丸壳层的厚度。上述通过白光反射光谱峰值波长计算待测样品厚度的方法叫做极值法,是目前白光反射光谱技术中应用最为广泛的数据处理方法。

由于白光反射光谱呈类余弦变化,其波峰位置光强变化率为0,同时,系统噪声亦会造成波峰位置光强起伏较大,难以实现谱峰位置的准确测量<sup>[12]</sup>。此外,当样品厚度较厚时,干涉谱峰密集,相邻两谱峰间隔较小;从式(2)可以看出,极小的谱峰波长误差亦会引起较大的厚度测量误差。为了解决此问题,可采用峰值拟合算法,该方法与江毅等人<sup>[13]</sup>提出的稍有不同,其基本思想是通过计算一系列的相邻两极值波长乘积 $\{\lambda_i \lambda_{i+1}\}$ ,和两相邻极值波长间隔 $\{\Delta\lambda_i\}$ ,将相邻两极值波长乘积 $\{\lambda_i \lambda_{i+1}\}$ 和两相邻极值波长间隔 $\{\Delta\lambda_i\}$ 做线性拟合后得到一个关于 $\{\lambda_i \lambda_{i+1}\}$ 和 $\{\Delta\lambda_i\}$ 的线性方程

$$\Delta\lambda_i = k(\lambda_i \lambda_{i+1}) + b \quad (4)$$

式中: $k$ 为拟合直线的斜率; $b$ 为拟合直线的截距。利用拟合线性方程对两相邻极值波长间隔 $\Delta\lambda_i$ 进行修正得到 $\overline{\Delta\lambda_i}$ ,则靶丸壳层厚度可表示为

$$h = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{2n\overline{\Delta\lambda_i}} \quad (5)$$

上述基于白光反射光谱谱峰极值探测或极值拟合的数据处理方法不要求解干涉级次,克服了干涉级次的模糊识别问题。在实际测量过程中,亦可通过干涉级次校正法<sup>[14]</sup>提高靶丸壳层厚度的测量精度。该方法的基本思想为:首先,测量白光反射光谱谱峰所对应的波长,得到反射光谱的峰值波长序列 $\lambda_i$ ;然后,利用式(3)计算相邻谱峰所对应的靶丸壳层光学厚度,由式(2)求解对应波长的干涉级次并取整;最后,由相邻干涉谱峰干涉级次的连续性进行干涉级次判定,得到干涉级次 $m$ 并将其代入式(2)中计算靶丸壳层厚度。

## 2 测量装置

图1为基于白光反射光谱的靶丸壳层厚度及其分布测量装置示意图,该装置主要由白光反射光谱探测模块、靶丸吸附转位模块、三维运动模块、气浮隔震平台等组成。

在白光反射光谱探测模块中,从白光光源发出的光经过分光镜分光后,通过物镜聚焦到靶丸表面,靶丸壳层上

表面的反射光经过物镜、分光镜、聚焦透镜后，一部分光聚焦到光纤端面并到达光谱仪探测器，可实现靶丸壳层白光反射光谱的测量，一部分光到达 CCD 探测器，可获得靶丸表面的光学图像。靶丸吸附转位模块和三维运动模块分别用于靶丸的吸附定位和靶丸特定角度转位以及靶丸位置的辅助调整，测量过程中，将靶丸放置于轴系吸嘴前端，通过微型真空泵负压吸附于吸嘴上；然后，移动位移平台，将靶丸移动至 CCD 视场中心，通过  $z$  向位移台，使靶丸表面成像清晰；利用光谱仪探测靶丸壳层的白光反射光谱；靶丸在轴系的带动下，平稳转位到特定角度，由于轴系的回转误差，转位后靶丸可能偏移 CCD 视场中心，此时可通过调整轴系前端的调心结构，使靶丸定点位于视场中心并采集其白光反射光谱；重复以上步骤，可实现靶丸特定位置或圆周轮廓白光反射光谱数据的测量。利用上述数据处理方法，即可获得靶丸壳层厚度及其分布数据。

光谱仪和靶丸回转机构是影响靶丸壳层厚度及其分布测量的关键器件，本装置采用 mayaMapro 2000 微型光谱仪，其探测范围 188.7~1109.4 nm，光谱采集波长间隔 0.48 nm。精密回转轴系采用德国 PI 公司的 RS-40 微型精密转台，旋转范围 360°，角度分辨率 0.45 mrad，重复精度 87  $\mu$ rad。

### 3 测量结果及分析

#### 3.1 靶丸壳层厚度及其分布测量

图 2(a) 为直径约 850  $\mu$ m 辉光放电聚合物 (GDP) 靶丸的白光反射光谱测量数据，测量参数为：光纤芯径 600  $\mu$ m，显微物镜倍率 15 $\times$ ，旋转角度位置 0°。从图中可以看出，整个反射光谱包络呈高斯分布，波长小于 600 nm 区域的反射光谱强度较低，为提高反射光谱谱峰位置的计算精度，选取 580~850 nm 内的光谱进行计算，在此波段内，干涉信号强度较低，稳定性较好，可保证谱峰波长的测量精度。由于波峰或波谷位置附近存在多个光强变化率为 0 的点，而外界噪音等因素也使波峰或波谷的位置波动大，难以直接由光强极大值确定谱峰位置，因此本文采用曲线拟合方法确定谱峰位置。图 2(b) 为靶丸壳层白光反射光谱信号及高斯拟合曲线，本文采用高斯曲线拟合，从图 2 中可以看出，实验及拟合数据一致性较好，其拟合度为 0.996。

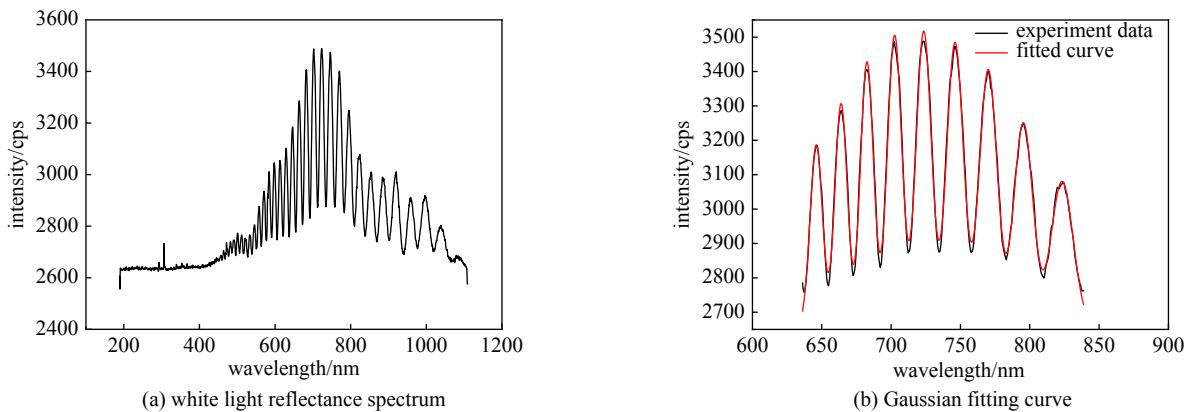


Fig. 2 White light reflectance spectrum of target shell and Gaussian fitting curve in the local wavelength

图 2 靶丸壳层白光反射光谱及局部波段内高斯拟合曲线

基于不同数据处理方法的靶丸壳层厚度测量数据如表 1 所示(靶丸壳层折射率采用白光垂直扫描干涉法测量，其测量值为 1.603)。从表 1 中可以看出，不同数据处理算法计算的靶丸壳层厚度值之间存在差异。对于极值法，极小的谱峰波长误差亦会引起较大的厚度测量误差，1 nm 的相邻谱峰波长差可能导致靶丸壳层壁厚偏差达数 100 nm，因此，极值法测量数据离散性较大，最大偏差 262 nm。峰值拟合法通过在取样波长范围内对相邻波长乘积和波长差进行线性拟合，有效地消除了干涉谱峰波长测量误差对靶丸壳层壁厚测量结果的影响，从表中数据可以看出，峰值拟合法测量结果离散性较好，靶丸壳层厚度平均值为 7270.5 nm，最大偏差约为 8 nm。干涉级次校正法

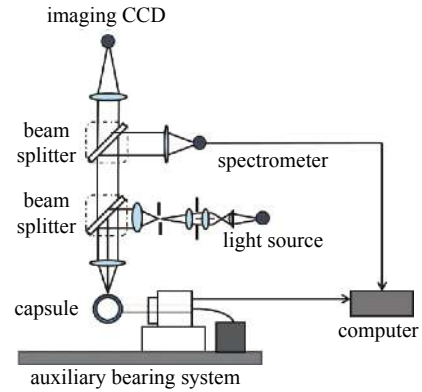


Fig. 1 Schematic diagram of the circular rotation measuring device

图 1 圆周回转测量装置示意图

表 1 靶丸壳层厚度测量数据

Table 1 Thickness measurement data of target shell

peak wavelength/nm	physical thickness $d$ /nm		
	extremum method	peak value fitting	grade correction method
646.3	7609.9	7525.2	7560.1
663.9	7620.3	7526.6	7558.7
682.4	7594.5	7528.0	7557.0
702.1	7498.7	7529.3	7555.9
723.2	7358.8	7530.7	7557.6
746.1	7513.2	7531.9	7563.9
770.0	7566.4	7533.2	7565.6

通过对干涉级次的校正,将干涉谱峰波长测量误差对靶丸壳层厚度测量结果的影响降低到数 10 nm 水平(其值等于干涉谱峰波长测量误差与干涉级次的乘积),从表中数据可以看出,干涉级次校正法测量结果离散性较好,靶丸壳层厚度平均值为 7291.2 nm,测量最大偏差约 9 nm。

为了得到靶丸壳层厚度分布数据,利用靶丸回转机构带动 GDP 靶丸旋转 to 特定的角度并进行白光反射光谱测量(测量过程中,其旋转角度间隔为  $5^\circ$ ),获得靶丸壳层不同角度位置的白光反射光谱序列,基于白光反射光谱序列数据,采用干涉级次校正法可获得靶丸壳层厚度及其分布数据。图 3 为靶丸壳层厚度分布测量数据,从图 3 可以看出,靶丸壳层厚度分布比较均匀,壁厚分布最大偏差为 26 nm。

### 3.2 测量结果验证与讨论

通过对 GDP 薄膜样品厚度的比对测试,对基于白光反射光谱技术的靶丸壳层厚度测量数据的准确性进行了验证。实验中,采用等低压离子体气相沉积技术在硅基片上制备了 GDP 薄膜,利用掩膜技术在基片上制造出台阶以便于其厚度测量。利用光谱仪测量 GDP 薄膜某特定位置的白光反射光谱信号,对 600~800 nm 内的波峰进行拟合,利用干涉级次校正算法计算得到薄膜厚度;然后,利用 GT-K 光学轮廓对同一测试位置的 GDP 薄膜厚度进行测量,由两者的测量数据一致性验证白光反射光谱测量数据的准确性。

GDP 薄膜的白光反射光谱测量数据如表 2 所示,薄膜平均厚度 6126.4 nm。图 4 为 GDP 薄膜厚度的光学轮廓仪测量曲线,其测量数值为 6182.2 nm,与白光反射光谱测量结果偏差为 55.8 nm,其相对偏差为 0.9%。

表 2 GDP 膜厚测量数据

Table 2 Thickness measurement data of GDP film

wavelength/nm	optical thickness/nm	physical thickness/nm
586.9	19 661.2	6132.7
604.8	19 658.4	6131.8
623.5	19 642.1	6126.7
644.1	19 645.8	6127.8
665.6	19 636.9	6125.0
689.0	19 638.7	6125.6
713.7	19 628.3	6122.4

上述研究结果表明,白光反射光谱技术可实现 GDP 靶丸壳层厚度及其分布的精密测量,为玻璃、聚苯乙烯(PS)、聚苯甲苯乙烯(PAMS)等透明靶丸的厚度及其分布的精密测量提供了一种新的思路。需要注意的是,白光反射光谱技术的厚度测量范围与光谱仪的波长范围和分辨率密切相关,采用近红外光谱仪和全谱拟合方法,其测量最

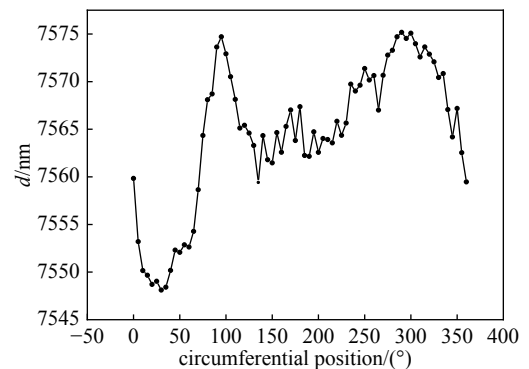


Fig. 3 Circumferential thickness measurement data of GDP target

图 3 GDP 靶丸的圆周厚度测量数据



大厚度可达数 100  $\mu\text{m}$ 。由于 ICF 靶丸为空心球壳, 只能采用干涉峰极值法对靶丸壳层厚度进行测量, 壳层厚度越大, 干涉峰越密集, 相邻干涉极值之间的波长间隔越小, 在干涉极值波长测量不确定度相同的情况下, 其厚度测量误差显著增大, 对于厚度为 50  $\mu\text{m}$  的靶丸, 1 nm 的相邻谱峰波长差可能导致靶丸壳层壁厚偏差达数  $\mu\text{m}$ 。此外, 若靶丸壳层材料透明度较低, 则靶丸壳层内、外表面反射光强差异较大, 其白光反射光谱曲线的干涉峰强度较低, 难以实现干涉极值波长及靶丸壳层厚度的准确测量。

## 4 结 论

本文搭建了基于白光反射光谱和精密回转轴系的靶丸壳层厚度及其分布检测装置, 该装置具备靶丸吸附、特定角度转位以及 360° 回转功能, 可实现靶丸壳层圆周厚度分布的测量。基于极值法、峰值拟合法、干涉级次校正法等不同的数据分析算法, 获得了靶丸壳层厚度及其圆周分布数据。实验结果表明, 谱峰拟合法和干涉级次校正法可实现靶丸壳层厚度的准确测量, 其测量结果偏差小于 1%。

## 参考文献:

- [1] Casey D T, Macgowan B J, Sater J D, et al. Evidence of three-dimensional asymmetries seeded by high-density carbon-ablator nonuniformity in experiments at the national ignition facility[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 26: 025002.
- [2] 刘元琼, 王凯, 雷海乐, 等. 条纹形状法在线表征聚变靶丸参数[J]. *光学学报*, 2016, 36: 1112002. (Liu Yuanqiong, Wang Kai, Lei Haile, et al. On-line parameter characterization of fusion capsules by fringe shape analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36: 1112002)
- [3] 王琦, 高党忠, 唐兴, 等. 靶丸X射线光学厚度的精密检测[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1039-1044. (Wang Qi, Gao Dangzhong, Tang Xing, et al. Precision measurement of X-ray optical thickness in capsules[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1039-1044)
- [4] 晏骥, 江少恩, 苏明, 等. X射线相衬成像应用于惯性约束核聚变多层球壳靶丸检测[J]. *物理学报*, 2012, 61: 068703. (Yan Ji, Jiang Shaoen, Su Ming, et al. The application of phase contrast imaging to ICF multi-shell capsule diagnosis[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 068703)
- [5] 赵学森, 高党忠, 马小军, 等. X射线法ICF靶丸几何参数批处理及壁厚分布计算[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(4): 487-492. (Zhao Xuesen, Gao Dangzhong, Ma Xiaojun, et al. Batch processing of geometric parameters and wall thickness distribution calculation of ICF capsule by X-ray imaging method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(4): 487-492)
- [6] Wang Longxiao, Zhao Weiqian, Qiu Lirong, et al. Laser differential confocal measurement of the outer surface profile of a laser inertial confinement fusion capsule[J]. *Measurement*, 2019, 135: 333-340.
- [7] 赵维谦, 王龙肖, 邱丽荣, 等. 激光聚变靶丸内表面轮廓测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1013-1023. (Zhao Weiqian, Wang Longxiao, Qiu Lirong, et al. Development of inner-surface profile measurement system for ICF capsule[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1013-1023)
- [8] Ma Xianxian, Ni He, Lu Mengshuang, et al. A measurement method for three-dimensional inner and outer surface profiles and spatial shell uniformity of laser fusion capsule[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106601.
- [9] Li Shaobai, Wang Yun, Wang Qi, et al. Rapid measurement and compensation method of eccentricity in automatic profile measurement of the ICF capsule[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3761-3769.
- [10] 樊婷, 马小军, 王宗伟, 等. 靶丸壳层折射率的白光干涉测量技术研究[J]. *量子电子学报*, 2020, 37(6): 641-649. (Fan Ting, Ma Xiaojun, Wang Zongwei, et al. Determination of refractive index of capsule by using white light interference techniques[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(6): 641-649)
- [11] 郭彤, 周勇, 李明惠, 等. 基于Linnik型白光显微干涉光谱测量方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(5): 360-365. (Guo Tong, Zhou Yong, Li Minghui, et al. White light microscopic spectral interferometric measuring method based on Linnik type[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(5): 360-365)
- [12] 江毅, 高红春, 贾景善. 光谱域光纤白光干涉测量技术[J]. *计测技术*, 2018, 38(3): 31-42. (Jiang Yi, Gao Hongchun, Jia Jingshan. Fiber optical spectral-domain white-light interferometry[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(3): 31-42)
- [13] Jiang Yi, Ding Wenhui. Recent developments in fiber optic spectral white-light interferometry[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 62-71.
- [14] Luo Zhenyue, Shen Weidong, Liu Xu, et al. Design of dispersive multilayer with particle swarm optimization method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3): 342-344.

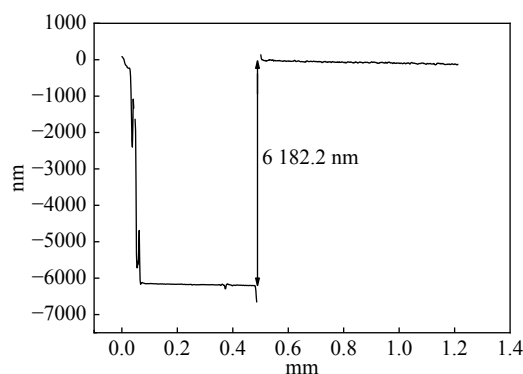


Fig. 4 White light vertical scanning interferometry curve of GDP film

图4 GDP薄膜的白光垂直扫描干涉测量曲线