

激光与光电子学进展

基于 X 射线吸收光谱全能谱拟合的金属薄膜面密度测量方法

王硕然¹, 鄢志鸿¹, 孙亦宸¹, 王琦^{2**}, 罗守华^{1*}¹东南大学生物科学与医学工程学院, 江苏 南京 210096;²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 提出一种基于 X 射线吸收光谱(XAS)的全能谱拟合方法,先通过样品元素的衰减系数曲线和射线源的本底能谱曲线获得样品的理论吸收能谱,再将理论吸收能谱与实际穿过样品的吸收能谱进行拟合,由退火算法计算得到薄膜样品的元素面密度值。该方案有效降低了噪声与探测器响应函数引入的误差。实验结果表明,系统在单元素下的测量结果重复测量标准偏差较小,测量不确定度在 10^{-4} g/cm² 量级,且能进行多元素薄膜面密度的测量,满足惯性约束聚变实验中对金属薄膜无损与高稳定的测量需求。

关键词 X 射线吸收光谱; 金属薄膜; 面密度

中图分类号 TP391.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230506

Approach for Measuring Surface Density of Metal Thin Films Based on Full Range Fitting of X-Ray Absorption Spectra

Wang Shuoran¹, Yan Zhihong¹, Sun Yichen¹, Wang Qi^{2**}, Luo Shouhua^{1*}¹School of Bioscience and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract We propose a method based on X-ray absorption spectra (XAS), which allows the calculation of each channel in the energy spectrum. The theoretical absorption energy spectrum of the sample is obtained using the attenuation coefficient curve of the sample elements and the background energy spectrum of the radiation source, and compares with the actual absorption energy spectrum of the sample. The energy spectrum is fitted and the element surface density is calculated with the annealing algorithm. The results show that the standard deviation of repeated experiments when measuring a single element is low and the measurement uncertainty is in the order of 10^{-4} g/cm². This system can also be used for the measurement of the areal density of multi-element thin films, meeting the requirements of non-destructive and highly stable measurements of metal thin films in inertial confinement fusion experiments.

Key words X-ray absorption spectroscopy; metal thin film; areal density

1 引言

惯性约束聚变(ICF)技术利用激光在高原子序数材料制造的黑腔中辐照包含氘氚燃料的靶丸,引发聚变反应^[1]。惯性约束聚变研究涉及冲击波速度定标关系研究、辐射烧蚀及状态方程物理实验研究等,常利用 10~100 μm 的 Al、Cu 等自支撑金属薄膜材料进行模

拟实验。冲击波速度与压强等实验结果与金属薄膜的面密度有关^[2],因此需要对薄膜的面密度进行测量。

针对薄膜材料面密度的测量方法种类繁多,由于待测材料的物理特性不同,其适用的厚度测量方法不尽相同。台阶仪^[3]作为一种常用的薄膜厚度测量设备,利用一个高精度的机械探针在待测物体表面运动,测量物体表面的厚度变化。当金属薄膜的厚度低至

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-02-27; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61871126)、江苏省重点研发计划(BE2022828)、江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20222002)

通信作者: *luoshouhua@seu.edu.cn; **wangqi_caep@163.com

20 μm 时,这种物理检验手段对超薄材料的检测精度较低,且容易对样品本身造成损伤。因此,科研人员提出了多种无损光学测量手段,较有代表性的有椭圆偏振法^[4]、干涉法^[5]、光谱法^[6]等。

在各种光谱测量方法中,X射线光谱分析是重要的检测手段之一,通过X射线光谱分析可以研究等离子体特性的诸多物理量,如电子和离子的温度、密度、电场、磁场、粒子速度及其分布等。传统的X射线荧光光谱(XRF)可用于薄膜的厚度测定,计算方案包括经验系数(EC)法和基本参数(FP)法,其中FP法基于Sherman方程进行迭代计算,相较于EC法可以获得更加准确的计算结果^[7]。上述方法多利用从样品散射得到的光线特征对样品厚度及面密度进行测量,测量过程受到样品表面粗糙度的影响,需考虑的环境参数较多,要求操作者具备丰富的相关实验经验。根据从薄膜样品出射的光线特征来计算样品面密度的实验方案,即测量出射X射线的吸收光谱(XAS),可以避免或减少上述因素的影响。XAS表征入射X射线强度与出射X射线强度之间的关系,由于不同元素吸收边所在的能量位置不同,对指定元素的面密度测量过程不会受到其他元素的影响,因此XAS可以有效避免由薄膜样品元素含量空间分布不一致导致的测量误差。Fong等^[8]基于XAS的基本原理,利用两个垂直对准的小孔产生近似垂直于薄膜表面入射的X射线,分别测量穿过样品前后的能谱,结合已知元素的衰减系数曲

线计算出样品的面密度,其计算精度达到了10~100 μm 超薄金属薄膜的测量要求。

本文首先基于Fong等^[8]提出的XAS面密度测量方案,搭建了一套X射线吸收光谱测量软硬件系统,利用硅漂移探测器对穿透薄膜样品指定位置的聚焦X射线进行测量;然后,优化了样品面密度的测量方法,对理论谱线与实际谱线进行全能段拟合,并用退火算法计算得到薄膜样品的元素面密度值;最后,通过实验验证该方法对金属薄膜元素面密度测量的准确性,并对其不确定度进行分析估计。

2 测量方法

通常情况下,一束X射线通过物体后强度发生衰减是因为X射线被物体散射和吸收,并且吸收是强度衰减的主要原因。穿过样品前后的光强变化符合基本的朗伯-比尔定律,对于给定的元素种类*i*,X射线的出射强度与入射强度之比 I/I_0 可表示为

$$(I/I_0)_i = \exp[-(\mu_i/\rho_i)\rho_i t], \quad (1)$$

式中: I_0 与 I 分别为射线源入射能谱与薄膜样品的吸收谱; ρ_i 为元素*i*的密度; t 为薄膜厚度($\rho_i t$ 即为给定元素薄膜的面密度); μ_i/ρ_i 为元素*i*关于X射线的衰减系数,其大小仅与元素种类和光子能量有关。本实验中使用的衰减系数均来源于Zschornack^[9]所著*Handbook of X-ray data*中的衰减系数数据库,射线源本底能谱和Cu薄膜的吸收谱如图1(a)、图1(b)所示。

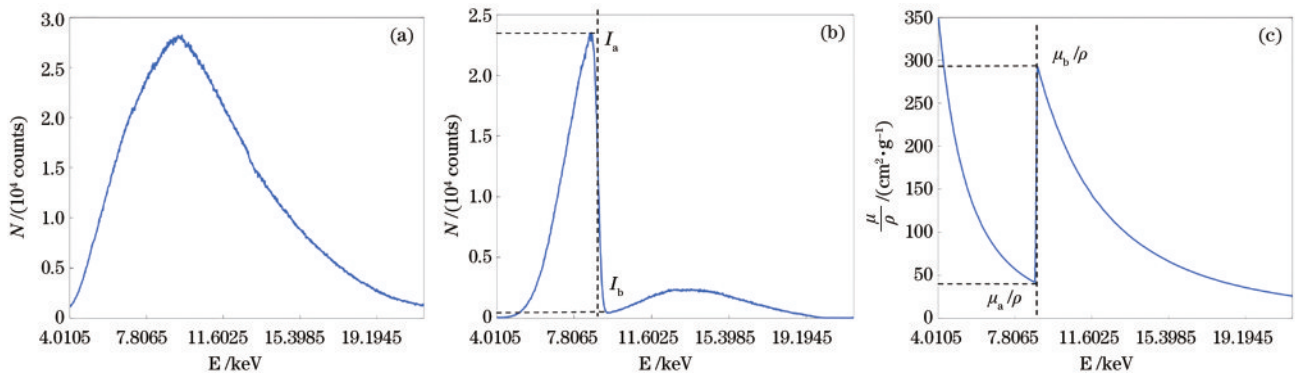


图1 能谱与衰减系数曲线示意图。(a)射线源本底能谱;(b)Cu薄膜吸收谱;(c)Cu元素衰减系数曲线

Fig. 1 Schematic of energy spectra and attenuation coefficient curve. (a) Ray source background energy spectrum; (b) absorption spectrum of Cu film; (c) attenuation coefficient curve of Cu element

图1(c)为Cu元素对应的衰减系数曲线,可以看到,该元素在8.9117 keV前后存在K吸收边,此处的衰减系数存在较大的突变。假设衰减系数突变前后的数值分别为 μ_a/ρ_i 与 μ_b/ρ_i ,在吸收边前后测量得到的吸收谱强度分别为 I_a 与 I_b ,结合式(1)可对待测面密度 $\rho_i t$ 进行估算:

$$(I_a/I_b)_i = \exp[-(\mu_{a,i} - \mu_{b,i})t]. \quad (2)$$

通过式(2)计算面密度时不需要已知入射样品之前的本底能谱 I_0 。但在实际实验中,由于散粒噪声^[10]、

探测器脉冲堆积与探测器响应对吸收光谱的影响,无法准确地获得吸收边前后的能谱强度,因此计算得到的强度比 I_a/I_b 与理论值存在较大的误差。这一过程中,如果能够考虑能谱曲线上除吸收边外其他区域的数值信息,即拟合测量能量范围内的完整吸收谱曲线,可在最大程度上减少测量误差。利用下式对吸收谱进行拟合,通过调节面密度 $\rho_i t$ 的大小,使计算样品能谱与实测样品能谱的均方误差最小,即

$$\arg \min_{\rho_i, t_i \in \mathbf{R}} \left\| I(E, T) - I_0(E, T) \exp\left\{-\left[\mu(E)/\rho\right]\rho t\right\}\right\|_2, \quad (3)$$

式中： E 、 T 分别为光子能量、测量时间； $I_0(E, T)$ 与 $I(E, T)$ 分别为入射能谱与出射能谱； $I_0(E, T) \exp\left[-(\mu(E)/\rho_i)\rho_i t\right]$ 为根据入射能谱与待定系数 $\rho_i t$ 计算得到的出射能谱。通常情况下，韧致辐射能段中的 3~17 keV 涵盖了精确测量 K 边缘所需的绝大多数元素^[11]，故能谱的基本拟合范围为 3~17 keV。当薄膜样品中包含了其他不同种类的金属元素，或几种不同金属薄膜叠加在一起进行测量时，需要通过吸收谱中吸收边的位置判断元素的种类，在已知元素种类的情况下，可通过下式计算元素 i 的面密度 $\rho_i t_i$ ：

$$\arg \min_{\rho_i, t_i \in \mathbf{R}} \left\| I(E, T) - I_0(E, T) \exp\left\{-\sum_i \left[\mu_i(E)/\rho_i\right]\rho_i t_i\right\}\right\|_2. \quad (4)$$

图 2 为总体测量方法的示意图。为了对待测金属薄膜样品的面密度进行计算，首先需要得到射线源出射的本底能谱 $I_0(E, T)$ 与穿过样品的吸收能谱 $I(E, T)$ ，然后根据 $I(E, T)$ 中吸收边所在能段确定待检测的元素种类，从标准数据库中获取对应元素的衰减系数曲线 $\mu_i(E)/\rho_i$ ，并将已知的两条能谱与衰减系数曲线代入式(4)，此时式(4)中的变量为 N 个元素的面密度 $\rho_i t_i$ 。当 N 种不同金属元素叠加测量时，需要拟合多个相关系数，由于拟合模型中包含指数函数，本实验使用基于单纯形的模拟退火算法进行求解。

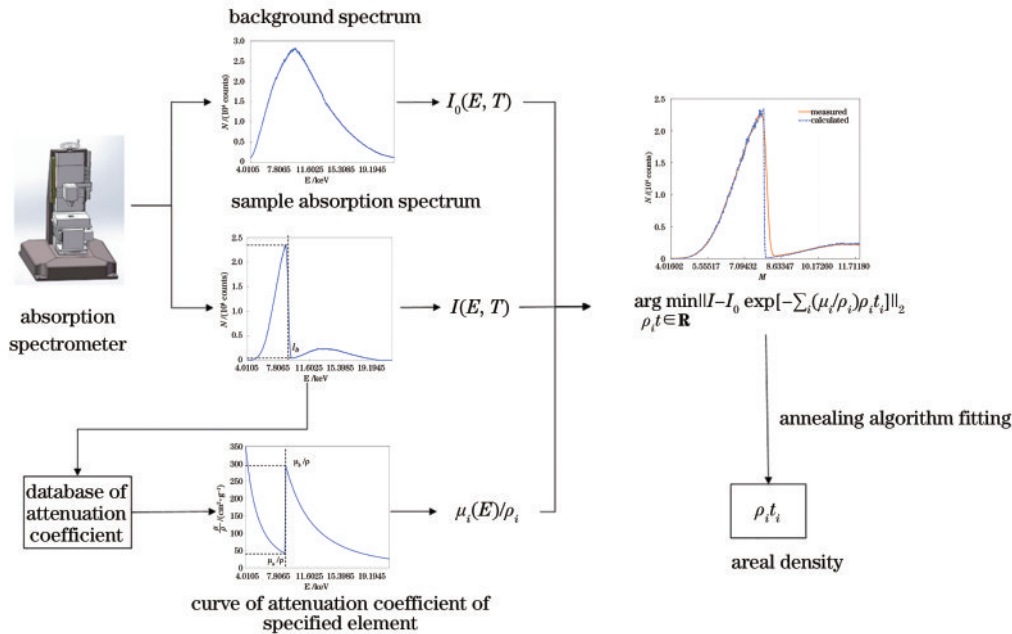


图 2 测量方法示意图

Fig. 2 Schematic of the measurement

3 实验装置设计

本实验所设计的吸收谱仪如图 3 所示，用一个接收平面较小的高分辨率硅漂移探测器接收从垂直光轴出射的光子，就能得到误差较小的吸收光谱。

吸收谱仪的主体结构由射线源、载物台、硅漂移能谱探测器三部分组成。X 射线从装配有聚焦管的射线源发出，焦点对准待测金属薄膜的下表面，此时薄膜样品被放置在三维移动载物台上，X 射线经过样品后由垂直于光轴的硅漂移探测器接收；在硅漂移探测器上安装限制散射光影响的准直器组件，对穿过薄膜样品后不同能量的光子进行计数，测得穿透样品点前后的能谱。样品上的一个点测量完毕后，载物台按照既定程序水平移动至下一个测量位置，最终得到待测样品

拟合面密度阵列。系统安装装置示意图如图 4 所示。

为了实现上述功能，本实验使用的射线源为微焦点射线源，X 射线管的管电压可调节范围为 0~50 kV，额定功率为 50 W，利用设备前端的聚焦毛细管^[12]将出射 X 光聚焦为 50 μm 的光斑，以实现定点测量的目的。所需测量的金属元素原子序数较低，其吸收边多集中在 20 keV 以内，因此射线源靶材选择为铈靶，以避免靶材特征峰对能谱曲线拟合的影响。本实验中选用的探测器为硅漂移探测器，该探测器内部有两个并行的信号处理通道，其以不同的峰值时间运行，每个峰值时间都经过优化以获取有关传入脉冲序列的不同信息。两个通道分别用于绘制图像与统计计数率，确保在光子计数不饱和的条件下获取准确的出射能谱。

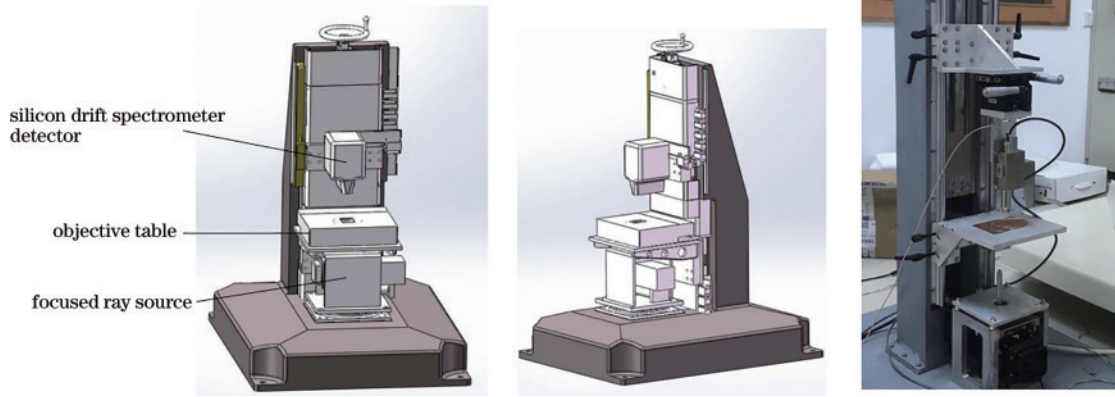


图 3 吸收谱仪主体结构示意图。(a)原理图的主视图;(b)原理图的左视图;(c)实物图

Fig. 3 Main structure diagram of absorption spectrometer. (a) Main view of the schematic; (b) left view of the schematic; (c) physical map



图 4 吸收谱仪外形示意图

Fig. 4 Outline diagram of absorption spectrometer

4 实验结果与测量不确定度分析

4.1 实验流程

本实验的待测样品以 Cu 金属箔为主,由于 Cu 元素的 K 吸收边位于 8.9117 keV 左右,为使其处于能谱拟合的中段,聚焦源的电压设置为 20 kV。对于不同厚度金属薄膜的吸收谱测量,可设置不同的电流大小。在探测器不发生脉冲堆积的情况下,相同时间下各能段统计的光子数与电流近似成正比,在测量射线源的本底能谱时,可适当地减小电流,控制光子计数率在 4000 s^{-1} 左右,以避免脉冲堆积对能谱拟合的影响。通过吸收光谱测量薄膜样品面密度的流程如图 5 所示。

开始测量前,设置射线源管电压为 20 kV,管电流为 0.002 mA,射线源聚焦管与探测器探头垂直对准,调整 Z 轴(控制载物台的升降)至样品下表面与聚焦管末端距离 20 mm,采集时间为 50 s,获得若干组不放样品条件下的本底能谱 $I_0(E)$ 。随后,适当增大电流,保持其他测量条件不变,放置待测样品,同样采集 50 s,获得放置样品后的能谱 $I(E)$ 。在目标起始点能谱测量完毕后,通过式(3)拟合出当前测量点的面密度数值,此时电动载物台步进移动至下一坐标,按此流程循环至全部待测坐标点能谱测量完毕,拟合得到金属薄膜的面密度阵列。

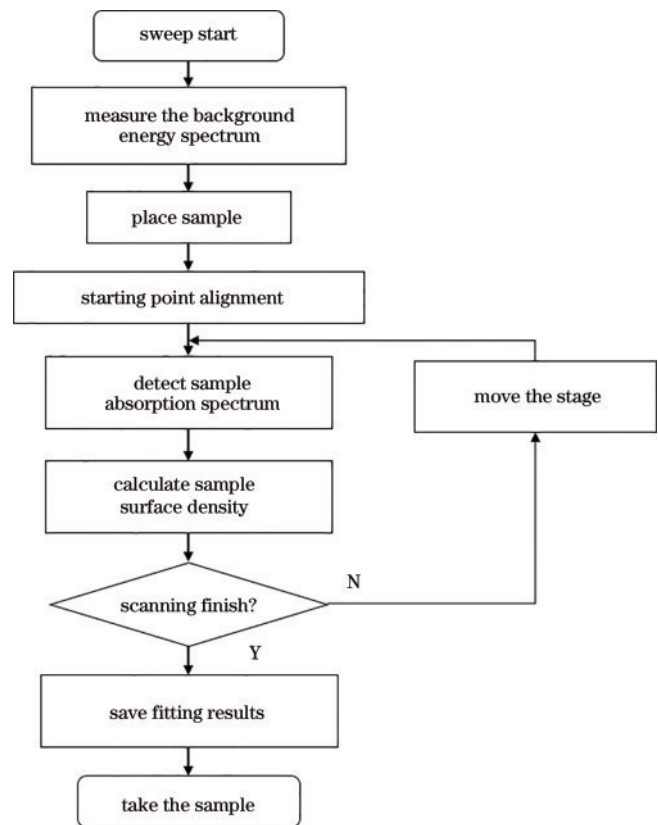


图 5 面密度测量流程示意图

Fig. 5 Schematic of surface density measurement

4.2 能量标定

XR-100 SDD 探测器可设置 2048 个能量通道,受到探测器内部的增益、峰化时间、快慢通道等因素的影响,实际使用过程中每个通道所表示的光子能量大小未知,因此需要对探测器的 2048 个通道进行能量标定。目前,普遍通过已知金属样品的荧光特征峰进行标定,图 6 为所测得的 Cu-Mo 荧光光谱。

已知 Cu 元素的 $K\alpha$ 谱线对应能量 E_{Cu} 和 Mo 元素的 $K\alpha$ 谱线对应能量 E_{Mo} 分别为 8.047 keV 和 17.479 keV,在所测荧光谱上找到两个荧光峰对应的通道 M_{Cu} 与 M_{Mo} ,由于通道与能量呈线性关系,对探测器的任意通

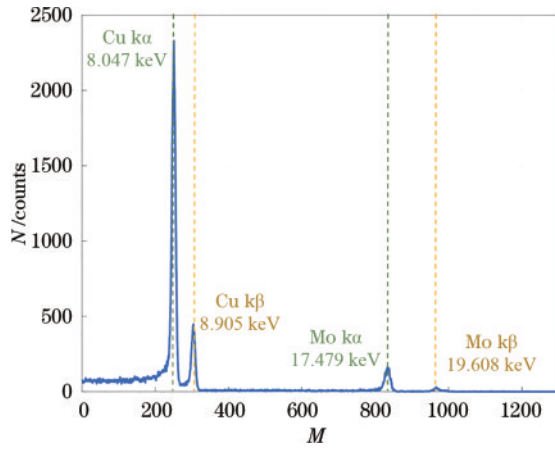


图 6 Cu-Mo 元素荧光光谱

Fig. 6 Fluorescence spectrum of Cu-Mo elements

道 M , 对应的能量 E 可用一次函数表示为

$$E = \frac{E_{\text{Cu}} - E_{\text{Mo}}}{M_{\text{Cu}} - M_{\text{Mo}}} M + \frac{M_{\text{Cu}} E_{\text{Mo}} - M_{\text{Mo}} E_{\text{Cu}}}{M_{\text{Cu}} - M_{\text{Mo}}}, \quad (5)$$

式中: E 为光子的能量, 单位 keV; M 为通道编号。实验过程中先在荧光谱上找到两种元素对应荧光峰的通道位置, 再结合已知的荧光能量大小, 基于式(5)完成线性变换, 得到任意通道对应的能量大小, 实现能量标定。

4.3 探测器偏置电压校准

XR-100 SDD 探测器是通过收集电子实现探测功能的器件。探测器正面的漂移环与背面的电极之间需要加上合适的负偏压, 使探测器内部形成全耗尽区, 进而形成垂直于探测器表面的电场分量, 以保证探测器准确地对光子能量进行分辨, 而不合理的偏置电压设置会导致所测得的能谱存在大量的低能段光子。

图 7 为不同偏置电压下对无样品的射线源本底能谱的测量结果。可以看到: 在测量吸收谱之前, 如果偏置电压设置较大, 测量得到的能谱形状与理论能谱差别较大, 在能量较低的区域 (< 5 keV) 内存在大量的噪声光子; 逐渐降低偏置电压至 -180 V 左右时, 低能噪

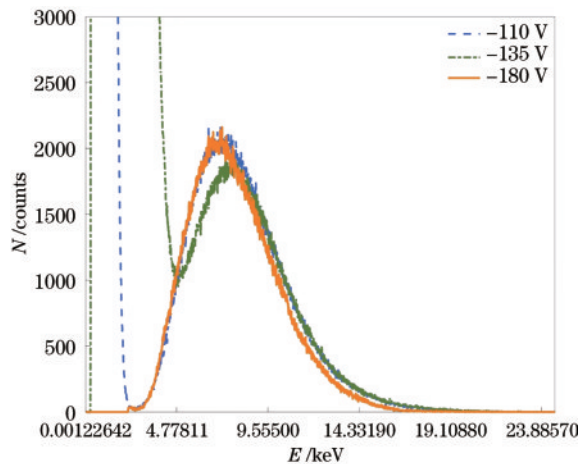


图 7 偏置电压对能谱的影响

Fig. 7 Effect of bias voltage on energy spectrum

声光子基本被除去, 能谱曲线趋于稳定, 吸收谱中 Cu 样品的能谱吸收边形状较为清晰, 可以进行后续的实验操作。

4.4 单质定点测量实验

在能量标定与偏置电压校准完成之后, 即按照规定的扫描流程对待测 Cu 膜进行实验, 实验中选取样品上一固定点进行重复测量, 得到放置样品前后的本底能谱 I_0 与样品吸收谱 I , 调节样品厚度 t , 控制其均方差达到最小, 拟合结果如图 8 所示。实际测量的吸收谱会受探测器脉冲堆积与自身响应函数的影响, 吸收边产生一定程度的倾斜, 因此衰减系数突变的这一能段不参与拟合。

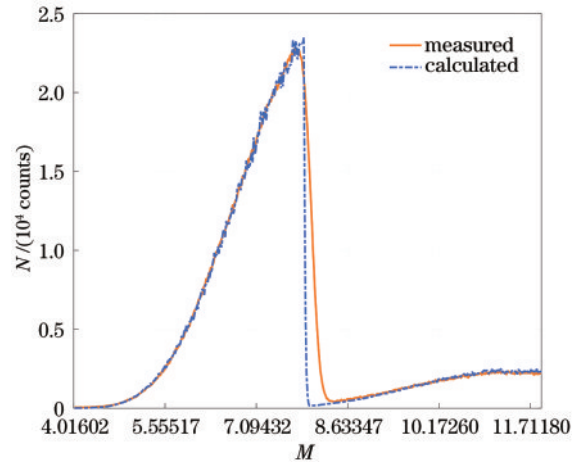


图 8 样品 Cu 吸收谱拟合结果

Fig. 8 Fitting results of absorption spectra of Cu sample

由于选用样品标签上所写厚度不能代表样品上待测点的真实厚度, 故在本实验前, 采用白光共聚焦法^[13]测得薄膜样品上待测点的参考厚度与面密度, 将特定波长的单色光聚焦在物体表面, 通过分析其单色光的颜色来判断物体所在位置, 测得 Cu 膜样品待测点的参考面密度为 $2.0132 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$ 。之后用所研制的吸收谱仪定点重复测量 10 次, 利用式(3)对待定的面密度进行计算, 结果如表 1 所示。计算结果表明: 通过吸收谱拟合得到的厚度与白光共聚焦法测得厚度的相对误差较小, 为 0.266%; 测量的面密度平均值为 $2.0185 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$, 厚度重复测量标准偏差为 46.24 nm, 面密度测量标准偏差为 $4.1289 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 。可见, 重复定位精度较高, 基本满足 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 金属薄膜样品的面密度测量需求。

4.5 混合薄膜测量实验

以上为单金属元素的薄膜面密度拟合实验, 而当需要测量的薄膜包含两种或以上的金属元素时, 需要通过吸收谱中各金属元素的 K 边缘判断元素的种类, 且衰减系数的突变位置不同于元素荧光特征峰的位置。以 Cu、Nb 和 W 元素为例, 其衰减系数突变最明显的位置如表 2 所示。

表 1 Cu 薄膜样品吸收谱拟合结果

Table 1 Fitting results of absorption spectra of Cu films

Reference area density / ($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Measured area density / ($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)					Average value / ($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Relative error	Repetitive error / ($10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
2. 0132	2. 0253	2. 0155	2. 0182	2. 0226	2. 0209	2. 0185	0. 00266	4. 1289
	2. 0209	2. 0155	2. 0120	2. 0119	2. 0146			

表 2 Cu 等金属元素 K 边缘位置

Table 2 Edge position of K of Cu and other metal elements

Element	E / keV	$\mu_a / (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\mu_b / (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
Cu	8. 912	41. 5	294. 0
Nb	18. 623	15. 4	85. 0
W	10. 010	98. 3	243. 0

本实验选择 Cu+Nb 以及 Cu+W 的组合方式, Nb 膜与 W 膜的厚度值分别为 $9 \mu\text{m}$ 与 $4 \mu\text{m}$, 利用式(4)进行能谱拟合, 结果如图 9 与图 10 所示。

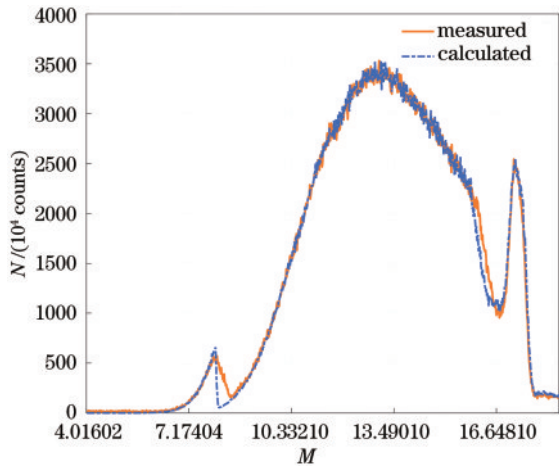


图 9 $12 \mu\text{m}$ Cu+ $9 \mu\text{m}$ Nb 吸收谱拟合结果

Fig. 9 Fitting results of absorption spectra of $12 \mu\text{m}$ Cu+ $9 \mu\text{m}$ Nb

添加 Cu 膜后, 测得的 Nb 膜与 W 膜厚度分别为 $8.74 \mu\text{m}$ 和 $3.65 \mu\text{m}$, 面密度分别为 $7.4989 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ 和 $7.0445 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$, 相对测量误差分别为 2.89% 和 8.75%, 交换 Cu 膜与其他金属膜的叠放次序, 其在相同条件下测得的能谱形状基本不变, 因此 XAS 相比于 XRF 等其他能谱测量方法具备更稳

表 3 不确定度来源与大小

Table 3 Source and magnitude of uncertainty

Standard uncertainty component	Source of uncertainty	Standard uncertainty / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Sensitivity coefficient
u_m	Spectrum fitting error	5.3134×10^{-5}	1
u_i	Sample intrinsic error	2.0093×10^{-5}	1
u_{random}	Measurement repeatability	4.1257×10^{-5}	1

依据一般不确定度计算公式来合成标准不确定度, 得到

$$u_L = \sqrt{u_m^2 + u_i^2 + u_{\text{random}}^2} = 7.0207 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2. \quad (6)$$

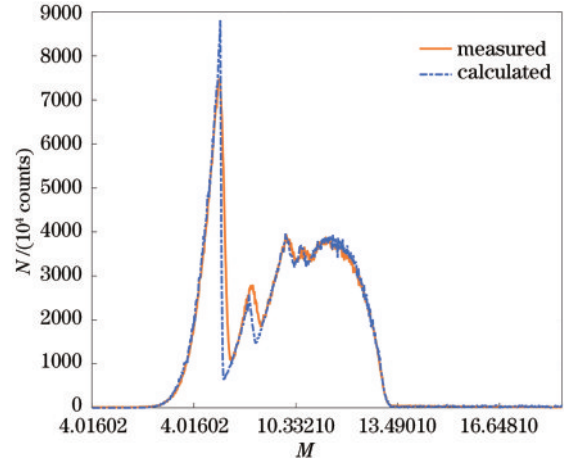


图 10 $12 \mu\text{m}$ Cu+ $4 \mu\text{m}$ W 吸收谱拟合结果

Fig. 10 Fitting results of absorption spectra of $12 \mu\text{m}$ Cu+ $4 \mu\text{m}$ W

定的测量条件, 适用于多金属元素下的薄膜面密度测量。

4.6 系统不确定度测量

为了测量系统整体不确定度, 需要同时从能谱拟合不确定度、样品不确定度以及重复测量不确定度 3 个方面进行考虑。相较于标定值 $2.0132 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$, 利用吸收谱测得的薄膜样品面密度为 $2.0185 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$, 因此由能谱拟合产生的误差 u_m 为 $5.3134 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 。为了分析标定样品自身不均匀性对能谱拟合的影响, 对样品标定点处周围 0.3 mm 内的面密度分布进行测量, 计算标定样品面密度的标准偏差 $u_i = 2.0093 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 。最后, 在相同时间间隔下重复测量样品的吸收谱, 重复拟合相同样品点位的厚度数值, 以计算系统的重复测量误差, 最终求得的重叠标准偏差 $u_{\text{random}} = 4.1257 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 。表 3 为由此得到的所有不确定度影响因素。

表 3 中所有不确定分量的误差处于同一量级, 因此其可近似为均匀分布。若取置信概率 $P = 99\%$, 则扩展不确定度为

$$U_{99} = 1.71 \times 7.0207 \times 10^{-5} = 1.2005 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2. \quad (7)$$

5 结 论

基于 XAS 吸收光谱理论,搭建了一套完整的金属薄膜厚度与面密度测量系统,该系统不仅可用于测量金属单质薄膜的厚度,还可用于测量多种元素混合条件下各元素的面密度。XAS 测量方式避免了散射谱测量方法所面临的由元素空间分布不一致导致的误差问题。同时,进一步优化了 XAS 测量方法,对理论谱线与实际谱线进行全能谱拟合,通过退火算法计算得到薄膜样品的元素面密度值,从而降低了量子散粒噪声、探测器脉冲堆积与响应函数引入的误差。实验结果表明:该系统测量手段对样品无损,相比于其他光学检测方法,实验组件结构简单且易于操作,适用于薄膜样品的快速阵列扫描;该测量系统的绝对不确定度在 10^{-4} g/cm^2 量级,可满足惯性约束聚变实验中对于 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 金属薄膜的无损与高稳定的测量需求。该测量系统进一步验证了多元素薄膜样品面密度测量的可行性,测试精度达到了 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 多元素金属薄膜面密度的测量要求。受到实验中所用样品 Nb 膜与 W 膜厚度均匀性较差的限制,未能开展多次单点测量实验与白光共焦对比实验,将在后续的实验研究中进行完善。

参 考 文 献

- [1] Shan L Q, Wu F J, Yuan Z Q, et al. Research progress of kinetic effects in laser inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(1): 012004.
- [2] 江少恩, 李三伟. 辐射温度与其驱动 Al 冲击波速度的定标关系研究[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8440-8447. Jiang S 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.
- [3] 李加福, 朱小平, 杜华, 等. 金属薄膜厚度测量技术分析[J]. 计量技术, 2020(7): 62-65, 50. Li J F, Zhu X P, Du H, et al. Metallic thin film thickness measurement technology and its analysis[J]. Measurement Technique, 2020(7): 62-65, 50.
- [4] 张裕, 连洁, 魏铭洋, 等. 椭圆成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 1000001. Zhang Y, Lian J, Wei M Y, et al. Research progress of imaging ellipsometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(10): 1000001.
- [5] Chen K H, Hsu C C, Su D C. A method for measuring the complex refractive index and thickness of a thin metal film[J]. Applied Physics B, 2003, 77(8): 839-842.
- [6] Musílek L, Prokeš R, Trojek T. Overview of methods for determining the depth distribution of elements in X-ray fluorescence analysis[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 200: 110388.
- [7] Vrielink J A M, Tiggelaar R M, Gardeniers J G E, et al. Applicability of X-ray fluorescence spectroscopy as method to determine thickness and composition of stacks of metal thin films: a comparison with imaging and profilometry[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(6): 1740-1744.
- [8] Fong J R, Eddinger S A, Huang H, et al. X-ray absorption spectroscopy for ICF target characterization [J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55(4): 367-372.
- [9] Zschornack G. Handbook of X-ray data[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [10] 杨鹏, 柯学志, 张风雷, 等. 亚散粒噪声亚赫兹激光干涉测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0127001. Yang P, Ke X Z, Zhang F L, et al. Sub-shot-noise sub-hertz laser-interferometric measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0127001.
- [11] Huang H, Sequoia K, Yamaguchi M, et al. Improved X-ray mass attenuation coefficient (opacity) measurements for Fe, Ni, and Au[J]. Journal of Physics B Atomic Molecular and Optical Physics, 2021, 54(11): 115003.
- [12] 孙天希. 毛细管 X 射线透镜技术及其应用[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134002. Sun T X. Capillary X-ray lens technology and its applications[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134002.
- [13] 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 Z, Yang M S, et al. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 17-22.