

# “加窗”傅里叶变换表征极紫外薄膜

段 伟 王凤丽 李文斌 王占山

(同济大学物理系先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 傅里叶变换法分析薄膜掠入射 X 射线反射率曲线是获得膜层厚度、界面粗糙度等重要结构信息的分析方法之一。在傅里叶变换分析中,窗函数的选择对变换结果有重要的作用。通过对比分析“矩形窗”傅里叶变换(FFT)和“小波窗”傅里叶变换(WFFT),发现 WFFT 有效抑制了 FFT 自相关函数出现的大量干扰峰,这对于分辨真假峰和邻近两个峰值具有重要的意义。此外,研究发现 FFT 和 WFFT 的膜层厚度分辨误差随着信号截取长度的增加呈非周期性振荡,该振荡变化与反射率曲线振荡有关,在布拉格衍射峰谷附近截断信号会得到较好的厚度分辨结果。对实验制备的单层 Ni 和四层 Si/Ti/Ni/Ti 薄膜进行了 FFT 和 WFFT 分析,验证上述结论,为分析非传统周期薄膜提供一种精确表征的方法。

**关键词** 薄膜;傅里叶变换;窗函数;自相关函数;厚度误差

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0307003

## Windowed Fourier Transform to Characterize Extreme Ultraviolet Thin Film Structures

Duan Wei Wang Fengli Li Wenbin Wang Zhanshan

(Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Ministry of Education, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Fourier transform is used to analyze grazing incidence X-ray reflectivity curve of thin film. It is a powerful analysis method for the characterization of layer thickness, interface roughness, etc. In the Fourier transform analysis, the window function has a very important effect on the transform result. By analyzing the Fourier transform of rectangular window (FFT) and wavelet window Fourier transform (WFFT), it is found that WFFT can effectively suppress the appearance of interferential peak in the FFT auto-correlation function, which is very important for identifying true and false peaks and the adjacent peaks. In addition, the film thickness error varies in aperiodic oscillation with the increasing signal length, and this change is associated with the oscillation of reflectivity curve. The ability to distinguish layer thickness is better when intercepting the reflectivity curve near the valley of Bragg diffraction peak. Ni film and Si/Ti/Ni/Ti multilayer are characterized by FFT and WFFT, which verifies the above conclusions and provides a powerful analysis method for the characterization of unconventional multilayer structures.

**Key words** thin films; Fourier transform; window function; auto-correlation function; thickness error

**OCIS codes** 310.6870; 340.7480; 300.6300

## 1 引 言

纳米量级的极紫外与软 X 射线薄膜已在极紫外光刻、天文观测、显微分析、等离子体诊断和同步

辐射等许多领域得到了广泛的应用。由于制备工艺的缺陷和存放条件变化都会造成薄膜结构的变化,从而影响薄膜的光学性能,因此对薄膜结构进行精

收稿日期: 2012-10-11; 收到修改稿日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(10825521)资助课题。

作者简介: 段 伟(1987—),女,硕士研究生,主要从事极紫外、X 射线薄膜等方面的研究。

E-mail: duanwei11998877@126.com

导师简介: 王凤丽(1976—),女,博士,副教授,主要从事极紫外、X 射线多层膜等方面的研究。

E-mail: wangfengli@tongji.edu.cn(通信联系人)

确表征尤为重要。掠入射 X 射线反射是分析薄膜结构的常用手段之一,通过分析反射率随掠入射角变化的曲线可以得到薄膜的结构信息。常用的数据处理方法是根据布拉格修正公式对反射曲线中布拉格衍射峰位的正弦平方与相应级次平方进行线性拟合得到膜层周期;或者建立一定的结构模型,通过全谱曲线拟合得到薄膜每一层的厚度、界面粗糙度、材料密度等结构参数。对于含有氧化层、界面层等复杂结构的多层膜,如果全谱曲线拟合过程中涉及到较多的拟合参数,将使得拟合的可信度下降。

对掠入射 X 射线反射率(XRR)测试曲线进行频谱分析,无需使用结构模型,可直接将反射率曲线从测量的波矢域转化到膜层的厚度域,进而分析出薄膜的厚度信息。Bridou 等<sup>[1,2]</sup>对反射率曲线  $Q^4$  加权后进行傅里叶变换,计算结果用表征薄膜材料折射率变化自乘积的自相关函数(ACF)表示,因为薄膜只有界面处有折射率突变,所以自相关函数在薄膜界面间距位置出现波动。傅里叶变换计算简单快速,结果直观,蒋晖等<sup>[3]</sup>讨论了[Mo(5 nm)/Si(10 nm)] $\times$ 5 周期多层膜在 X 射线衍射仪测试掠入射角为  $10^\circ$  时测试角分辨率、角步长对膜层厚度精度的影响,同时讨论了材料光学常数和膜层界面宽度对傅里叶变换结果的影响,用傅里叶变换方法对 W/B<sub>4</sub>C/Cr 三层膜和扩散严重的 Mg/SiC 周期多层膜样品进行分析,获得的结构参数作为初始值,能够拟合到与测试曲线更吻合的结构,进一步说明傅里叶变换方法在分析膜层厚度方面的作用。1998 年,Smigiel 等<sup>[4]</sup>引入短时傅里叶变换,将反射曲线用一个小的窗口函数分割成许多段,然后将每一段进行傅里叶变换,得到波矢与膜层厚度谱,进而分析出两层膜的膜层次序。随后,Smigiel 等<sup>[5]</sup>用在时频域有良好的局域化特性的“墨西哥小帽”基小波函数代替短时傅里叶变换中的 e 指数,有效消除了噪声干扰并得到了更为清晰的波矢与膜层厚度谱。2001 年 Prudnikov 等<sup>[6]</sup>对傅里叶变换的自相关函数进行小波变换,转化到波矢域,在尺度因子固定时相当于一种“加窗”傅里叶变换(前面提到的傅里叶变换也是一种“加窗”傅里叶变换),得到了与傅里叶变换类似的自相关函数曲线,在特征峰位置,根据自相关函数与尺度因子的关系拟合可以得到膜层界面的粗糙度。该方法在分析常规的曲线拟合难以表征含有界面层、氧化层、厚度漂移的薄膜结构时得到了应用,Starykov 等<sup>[7]</sup>利用该方法分析出 Gd 单层膜与基底 Si 形成了 2.3 nm 厚的扩散层;蒋晖等<sup>[8,9]</sup>鉴别出 V 单层膜的表面存

在约 3 nm 厚的氧化层,并根据每一个峰值由几个界面作用的结果,计算了 Ni/C 多层膜中的膜层厚度和厚度漂移现象。上述文献把频谱分析方法引入到薄膜结构表征中,并在表征较厚的膜系时得到了很好的应用,但都没有详细分析信号采样步长和信号长度对分辨膜层厚度及厚度误差的影响。本文从信号处理的角度出发,分析了“小波窗”和“矩形窗”傅里叶变换对自相关函数峰形的影响,研究了信号采样步长和信号长度对膜层厚度分辨及厚度误差的影响。

## 2 基本理论

Bridou 等<sup>[1,2]</sup>用傅里叶变换方法对薄膜掠入射反射率曲线进行分析时,采用反射率近似表达式:

$$R(Q) = \frac{4\pi}{Q^4} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dn}{dz} \exp(iQz) dz \right|^2, \quad (1)$$

式中  $Q$  代表了垂直于入射界面的波矢分量的两倍,即  $Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_0$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,  $\theta_0$  为掠入射角,  $z$  为薄膜厚度,  $n$  为薄膜材料折射率。

反射率曲线  $Q^4$  加权后进行傅里叶变换,变换结果用自相关函数  $f_{ACF}(z)$  表示,表达式为

$$f_{ACF}(z) = \frac{1}{(4\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} Q^4 R(Q) \exp(iQz) dQ. \quad (2)$$

在实际反射率曲线测试过程中,由于信号强度等因素的影响,测得的反射率信号长度是有限的,所以(2)式应该是在有限区间  $[0, Q_{max}]$  内的积分,代入(1)式得到:

$$f_{ACF}(z) = \sum_{i,j=0}^N (n_{j+1} - n_j)(n_{i+1} - n_i) \times \exp\left[-\frac{iQ_{max}(z - z_{ji})}{2}\right] \frac{\sin[Q_{max}(z - z_{ji})/2]}{Q_{max}(z - z_{ji})/2}, \quad (3)$$

所以,有限区间  $[0, Q_{max}]$  内的反射率信号可以看作是无限宽范围内的  $Q^4 R(Q)$  函数与一个有限宽“矩形窗”函数相乘的结果,其傅里叶变换的结果可以表示为两者频谱的卷积。其“矩形窗”函数  $w(Q)$  为常数,窗口宽度与  $Q_{max}$  有关,对应的频谱函数为

$$W(z) = \frac{\sin[Q_{max}(z - z_{ji})/2]}{Q_{max}(z - z_{ji})/2} \exp(-iQ_{max}z/2). \quad (4)$$

图 1 给出的是  $Q_{max}$  分别取  $8.897 \text{ nm}^{-1}$  和  $4.452 \text{ nm}^{-1}$  的频谱示意图。由图 1 可见,“矩形窗”频谱除了主瓣外还有一些旁瓣,这些旁瓣会导致“矩形窗”傅里叶变换(FFT)的自相关函数出现杂峰,进

而影响膜层厚度的分辨；同时  $Q_{\max}$  越小，主瓣和旁瓣越宽，幅值越小；主瓣很宽容易导致傅里叶变换结果中两个间距较小的相邻特征峰产生交叠甚至无法分辨，这说明傅里叶变换结果受  $Q_{\max}$  的影响。

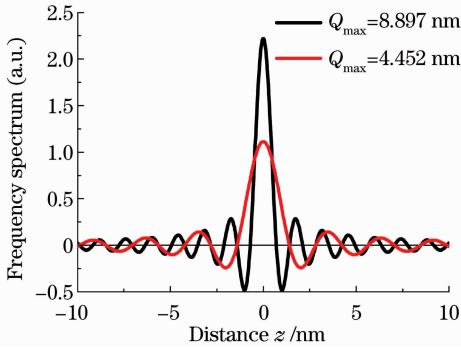


图 1 “矩形窗”频谱函数示意图

Fig. 1 Diagram of rectangular window frequency spectrum function

Prudnikov 等<sup>[6]</sup>采用“墨西哥小帽”基小波函数对自相关函数进行小波变换，表达式转化到波矢域，得到

$$WT_a(a, b) = (\sqrt{2\pi a}) \int_{-\infty}^{+\infty} Q^4 R(aQ)^2 \times \exp\left[-\frac{(aQ)^2}{2}\right] \exp(iQb) dQ. \quad (5)$$

当尺度因子  $a$  固定时，(5)式可看作反射率信号加权  $Q^4$  后“加窗”傅里叶变换，窗函数为“小波窗”，表达式为

$$\psi(Q) = \sqrt{2\pi a} (aQ)^2 \exp\left[-\frac{(aQ)^2}{2}\right], \quad (6)$$

对应频谱表达式为

$$\Psi(z) = \frac{1}{\sqrt{a}} \left[1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{(z/a)^2}{2}\right]. \quad (7)$$

图2给出的是  $a$  分别为 0.3 和 1 的“小波窗”函

数及其频谱示意图。由图 2 可知，“小波窗”窗口宽度由尺度因子  $a$  决定， $a$  值越大，窗口越窄并且中心位置向左移动，对应频谱主瓣和旁瓣越宽，幅值越小；与“矩形窗”的频谱相比，“小波窗”主瓣两侧各有一个负旁瓣，这可以有效抑制 FFT 结果中干扰峰的出现。

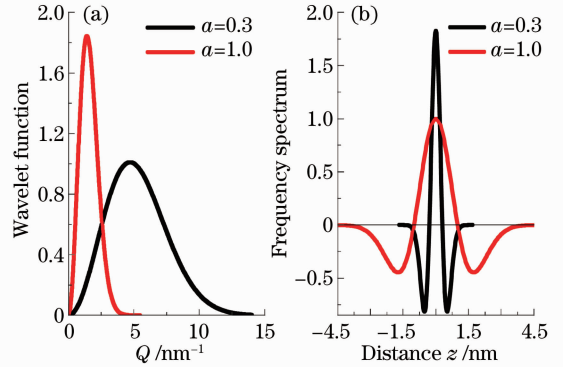


图 2 (a)“小波窗”及(b)频谱函数示意图

Fig. 2 Diagram of (a) wavelet window and (b) frequency spectrum function

### 3 “矩形窗”和“小波窗”傅里叶变换计算结果比较分析

忽略全反射区域，以三种薄膜结构为例介绍两种窗函数的计算结果。三种薄膜结构分别为 W (4.0 nm)/Si 单层膜、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.0 nm)/Mo (6.0 nm)/Si 两层膜和周期多层膜  $[\text{B}_4\text{C}(4.2 \text{ nm})/\text{W}(2.8 \text{ nm})] \times 5/\text{Si}$ ，界面粗糙度均为 0。根据  $Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_0$  得知，在波长  $\lambda$  一定时掠入射角与  $Q$  一一对应。计算了  $\lambda$  为 0.154 nm (Cu K $\alpha$  线) 反射率与  $Q$  的关系曲线，曲线中波矢间隔  $Q_0$  为  $0.007 \text{ nm}^{-1}$ ，最大波矢  $Q_{\max}$  为  $14.170 \text{ nm}^{-1}$ 。图 3 为 FFT 和“小波窗”傅里叶变换 (WFFT) 归一化的自相关函数曲线。

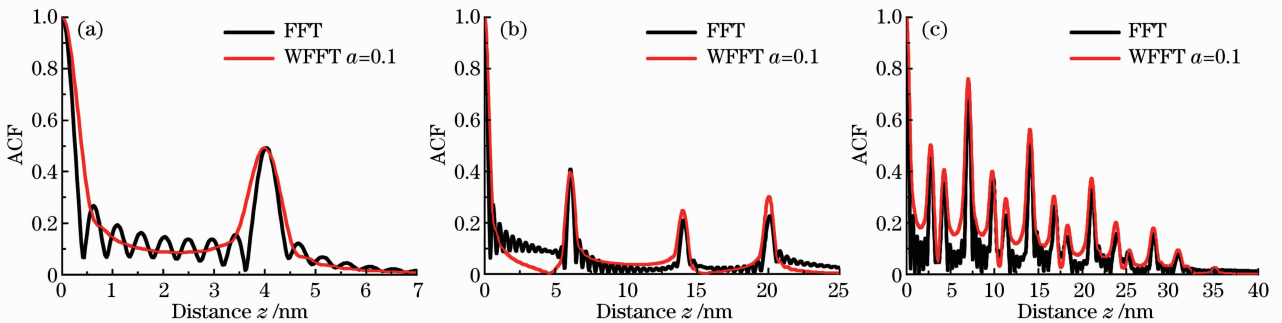


图 3 X 射线掠入射反射曲线 FFT 和 WFFT 的归一化自相关函数。(a) 单层膜 W；(b) 两层膜  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$ ；(c) 周期多层膜  $\text{B}_4\text{C}/\text{W}$

Fig. 3 Normalized ACF from FFT and WFFT of the reflectivity curves with X-ray grazing incidence.

(a) W single layer; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  bilayer; (c)  $\text{B}_4\text{C}/\text{W}$  periodical multilayer

由图 3 可知,相比于 WFFT 的计算结果,FFT 得到的自相关函数在两个特征峰之间出现了一些干扰峰,这是由矩形窗频谱旁瓣造成的。表 1 列出了三种膜系结构 FFT 和 WFFT 得到的膜层厚度和厚度误差  $\Delta z$  ( $\Delta z$  为计算厚度与理论值的差)。从表 1

表 1 FFT 和 WFFT 得到膜层厚度以及厚度分辨误差

Table 1 Layer thickness and thickness resolution error of FFT and WFFT

| Structure  | Thickness (thickness error) /nm |               |               |               |
|--|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|  | FFT                             |               | WFFT          |               |
| W(4.0 nm)/Si   | 4.027(0.027)                    |               | 3.999(-0.001) |               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (14.0 nm)/Mo(6.0 nm)/Si | 6.054(0.054)                    | 14.052(0.052) | 6.054(0.054)  | 14.052(0.052) |
| [B <sub>1</sub> C(4.2 nm)/W(2.8 nm)]×5                 | 2.794(-0.006)                   | 4.273(0.073)  | 2.794(-0.006) | 4.273(0.073)  |

### 4 FFT 和 WFFT 厚度分辨误差分析

在薄膜掠入射 X 射线反射率测试过程中,步进电机步长、测试时间长短、光源强度和噪声等因素影响了测试信号的采样间隔和有效信号长度,这些因素都会引起反射率曲线有用信息的丢失,进而影响到 FFT 和 WFFT 变换后的分辨结果。以 4 nm 厚的 W 单层膜为例,讨论波矢采样间隔  $Q_0$  和最大波矢  $Q_{max}$  对厚度分辨误差的影响。

#### 4.1 波矢采样间隔 $Q_0$ 对厚度分辨误差的影响

$Q_0$  的取值需要满足采样定理,根据奈奎斯特采样定理可知,信号采样频率  $f_s$  必须大于被采样信号最高频谱(膜层界面最大间距)的二倍,否则将出现

可以看出,当最大波矢  $Q_{max}$  为  $14.170 \text{ nm}^{-1}$  时,FFT 和 WFFT 两种方法得到的膜层厚度误差都为亚埃量级( $1\text{Å}=0.1 \text{ nm}$ ),但是  $Q_{max}$  对可分辨的膜层厚度以及厚度误差具有较大的影响。

频谱混叠现象。 $f_s$  与  $Q_0$  的关系式为  $f_s = 2\pi/Q_0$ , 傅里叶变换得到的自相关函数的最大厚度值等于  $1/2f_s$ 。图 4 为  $Q_0$  分别取  $0.014, 0.071, 0.285, 0.855 \text{ nm}^{-1}$  的反射率曲线及 FFT 和 WFFT 得到的归一化自相关函数曲线。由图 4 可知,当  $Q_0$  为  $0.855 \text{ nm}^{-1}$  时,对应 FFT 和 WFFT 的自相关函数的最大厚度值为  $3.677 \text{ nm}$ , 出现频谱混叠现象,无法得到薄膜膜层厚度;其他三种情况对计算结果均没有影响,FFT 分辨出膜层厚度为  $4.027 \text{ nm}$ , WFFT 为  $3.999 \text{ nm}$ 。这表明在满足信号采样定理的前提下,采样间隔  $Q_0$  的改变对 FFT 和 WFFT 计算结果无影响。

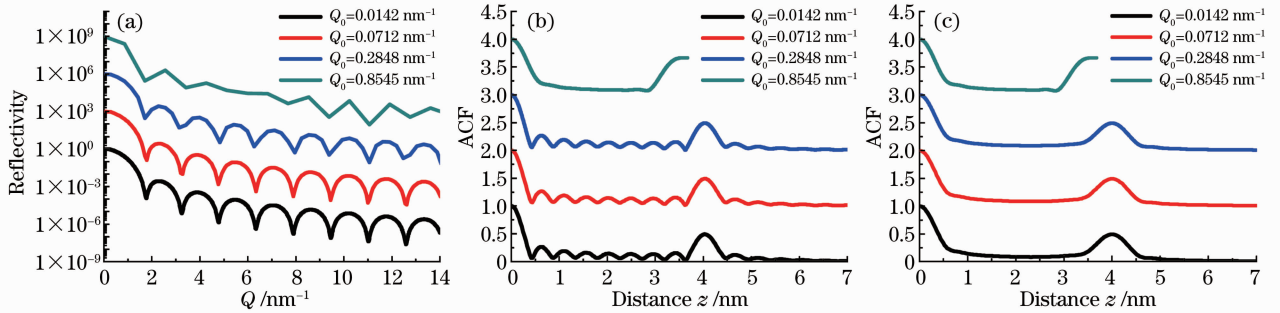


图 4 (a)不同采样间隔的 X 射线掠入射反射曲线及(b) FFT 和(c) WFFT 归一化自相关函数

Fig. 4 (a) Reflectivity curves of X-ray grazing incidence with different sampling intervals and normalized

ACF from (b) FFT and (c) WFFT

#### 4.2 波矢最大采样值 $Q_{max}$ 对厚度分辨误差的影响

为了定性分析  $Q_{max}$  对 FFT 和 WFFT 厚度分辨误差的影响,计算了不同  $Q_{max}$  对应的自相关函数,得到可分辨的膜层厚度,图 5 给出了 FFT 和  $a=0.2$  时 WFFT 的厚度误差  $\Delta z$  与  $Q_{max}$  关系曲线。可见,厚度误差并没有随着  $Q_{max}$  增大而变小,它呈现出一种非周期振荡,振荡幅值逐渐降低;通过与掠入射反射率曲线比较,发现误差曲线的变化趋势与反射率

曲线的振荡有关,布拉格衍射峰谷附近对应的厚度误差偏小,范围在  $-0.165 \sim 0.136 \text{ nm}$  之间,一、二级衍射峰附近对应的 FFT 厚度误差优于 WFFT,其他位置 WFFT 优于 FFT。图 6 给出了  $Q_{max}$  分别取  $1.937, 2.820, 5.144, 8.742 \text{ nm}^{-1}$  时单层薄膜变换对应得到的自相关函数曲线,由图 6 可知, $Q_{max}$  的大小对特征峰宽度有很大影响, $Q_{max}$  越小,特征峰越宽,当  $Q_{max} = 1.937 \text{ nm}^{-1}$  时,特征峰的展宽现象过

于严重导致0 nm和 4 nm 处的特征峰没有分开。所以为了分辨出两个间距较小的相邻特征峰,所需要的  $Q_{\max}$  比较大。

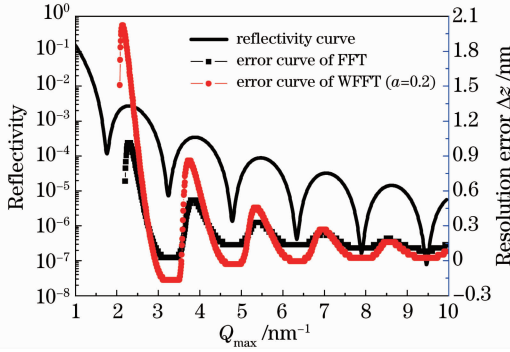


图 5 X 射线掠入射反射曲线和 FFT、WFFT 厚度分辨误差曲线

Fig. 5 Reflectivity curve of X-ray grazing incidence and layer thickness resolution error curves from FFT and WFFT

## 5 实验制备薄膜的表征

采用直流磁控溅射方法在 Si 基底上分别制作了非传统周期结构的单层 Ni 和四层 Si/Ti/Ni/Ti 薄膜样品。在 0.154 nm 波长处,用掠入射方法表征了两种薄膜的反射性能。分别用 FFT 和 WFFT 方法对反射曲线进行拟合分析。

### 5.1 单层 Ni 膜

图 7(a)为用英国 Bede 公司生产的 D1 型 X 射线衍射仪测量的单层 Ni 膜的掠入射反射曲线。对该反射曲线,忽略全反射区域,分别用 FFT 和 WFFT

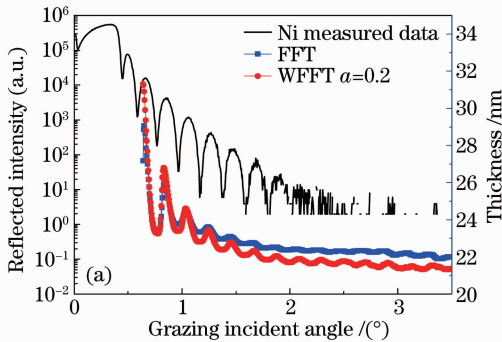


图 7 (a) 单层膜样品反射率测试曲线及 FFT、WFFT 厚度曲线; (b) 反射率曲线拟合结果

Fig. 7 (a) Reflectivity curve and layer thickness curves from FFT and WFFT; (b) fitting curve of reflectivity

### 5.2 四层 Si/Ti/Ni/Ti 膜结构

在上海光源 BL14B1 束线实验站测量了四层 Si/Ti/Ni/Ti 膜系的掠入射反射曲线,如图 8(a)黑线所示。在  $0.36^\circ \sim 2.44^\circ$  截取反射信号,分别用 FFT 和 WFFT 进行分析。由于 FFT 受干扰峰影响,其自相

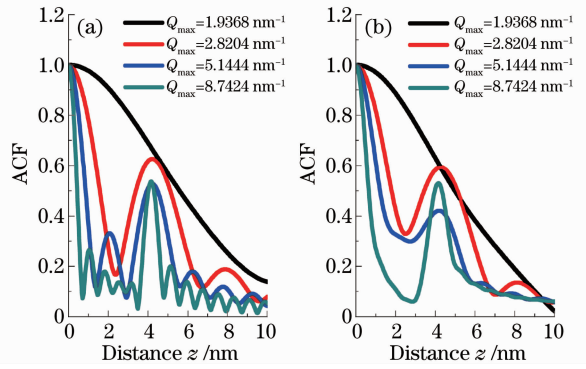
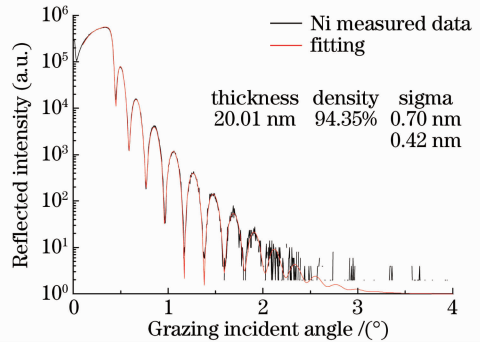


图 6 不同采样长度下的 (a) FFT 和 (b) WFFT 归一化自相关函数

Fig. 6 Normalized ACF from (a) FFT and (b) WFFT at different sampling lengths

方法分析了不同掠入射角时获得的膜层厚度,如图 7(a)所示。膜层厚度随信号截取长度的增加呈非周期性振荡,且与实际厚度偏差变小;厚度变化趋势与反射率曲线振荡趋势相似,在谷附近厚度偏差出现极小。因此取  $2^\circ$  处 FFT 和 WFFT 得到的膜厚 22.36 nm 和 21.71 nm 作为初始结构,用数值拟合方法进行曲线拟合,拟合结果如图 7(b)所示,其中 density 表示薄膜材料堆积密度, sigma 表示界面粗糙度的全谱曲线拟合结果。拟合得到的薄膜厚度为 20.01 nm,界面粗糙度为 0.70 nm,与 WFFT 方法得到的厚度有约 1.0 nm 的偏差。这是因为数值拟合分析时,除了膜层厚度外,还引入了材料密度、界面粗糙度两个变量,这两个变量影响薄膜的光学性能,数值拟合是单纯从光学性能吻合程度上来确定结果的。



关函数的特征峰展宽严重,相邻特征峰无法分辨。只有 WFFT 的自相关函数的特征峰可分辨,如图 8(b)所示,其中 + 表示特征峰位置。自相关函数中前 3 个峰代表各个膜层的厚度值,后 5 个峰是几个子峰的叠加,从入射介质到基底依次用 A, B, C, D

代表四层膜,特征峰与膜层具体的对应情况在表 2 中给出。

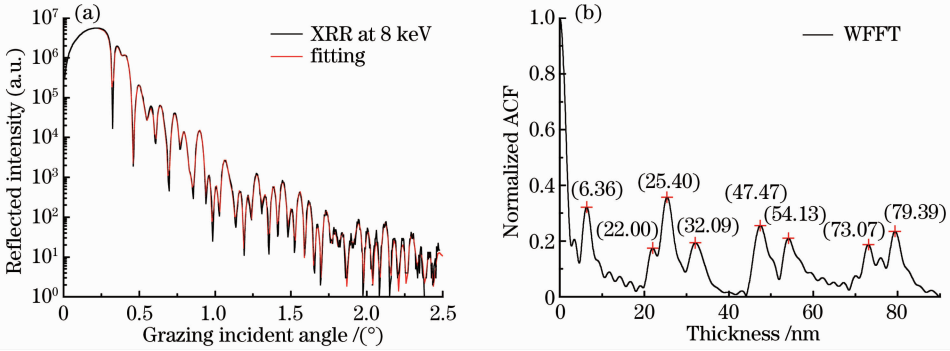


图 8 (a)四层膜系的掠入射反射结果和(b) WFFT 归一化的自相关函数曲线

Fig. 8 (a) Reflectivity result of grazing incident of multilayer; (b) normalized ACF curve of WFFT

表 2 膜系 Si/Ti/Ni/Ti 自相关函数曲线的峰位分析

Table 2 Analysis of ACF peak position of Si/Ti/Ni/Ti multilayer

| Peak position thickness /nm | Corresponding layers | Peak position thickness /nm | Corresponding layers |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| 6.36                        | A                    | 47.47                       | B+C, C+D             |
| 22.00                       | C                    | 54.13                       | A+B+C                |
| 25.40                       | B,D                  | 73.07                       | B+C+D                |
| 32.09                       | A+B                  | 79.39                       | A+B+C+D              |

经分析 A, B, C, D 对应膜层的厚度分别是

表 3 膜系 Si/Ti/Ni/Ti 反射曲线拟合初始结构和拟合结果

Table 3 Initial structure and fitting result from Si/Ti/Ni/Ti multilayer

|           | Initial structure |               | Fitting result |               |
|-----------|-------------------|---------------|----------------|---------------|
|           | Thickness /nm     | Thickness /nm | Density /%     | Roughness /nm |
| Si        | 6.36              | 6.10          | 102.36         | 0.55          |
| Ti        | 25.73             | 24.31         | 102.03         | 0.59          |
| Ti-on-Ni  | 0.50              | 0.60          | 92.82          | 0.22          |
| Ni        | 22.00             | 20.09         | 101.47         | 0.91          |
| Ni-on-Ti  | 0.50              | 1.61          | 89.56          | 1.21          |
| Ti        | 25.33             | 24.09         | 104.72         | 0.31          |
| Substrate |                   |               | 111.64         | 0.25          |

6.36、25.73、22.00、25.33 nm。考虑到 Ti 层和 Ni 层之间存在扩散,而 WFFT 无法分辨出较薄的扩散层,所以在 Ni-on-Ti 和 Ti-on-Ni 之间加入了 0.5 nm 的扩散层,基于这样的六层模型进行数值拟合,结果如图 8(a)虚线所示,最终得到的结构参数列于表 3。从表 3 可以看出,WFFT 得到的膜层厚度与数值拟合的结果比较吻合,略有差异是由于拟合时除了引入界面粗糙度和材料密度两个变量外,还引入了扩散层所造成的。

## 6 结 论

详细研究了“矩形窗”和“小波窗”傅里叶变换对极紫外薄膜膜层厚度的分辨情况,发现“矩形窗”频谱的旁瓣对膜层分辨的影响较大,易造成假峰,“小波窗”则较好地抑制了干扰峰的出现。采样信号的长度对膜层厚度的分辨影响较大,在满足信号采样定理的前提下,信号长,自相关函数的特征峰的宽度窄,容易分辨相邻的两个峰,从而易分辨膜层的厚度。但是随着信号长度的增加,膜层厚度误差呈现非周期的振荡变化,该变化与反射率曲线的峰谷位置密切相关,信号截断在谷位置附近,得到的厚度误差小。通过对实验制备的单层 Ni 和四层 Si/Ti/

Ni/Ti 薄膜样品的掠入射反射曲线进行 FFT 和 WFFT 分析,验证了上述结论,把 FFT 和 WFFT 计算结果作为初始结构进行数值拟合,得到了较为准确的结构信息,为分析非传统周期薄膜提供了一种精确表征的方法。

**致谢** 感谢上海光源 BL14B1 线站的协助完成多层膜反射测量。

## 参 考 文 献

- 1 F. Bridou, B. Pardo. Grazing X-ray reflectometry data processing by Fourier transform [J]. *J. X-Ray Science and Technology*, 1994, 4(3): 200~216
- 2 F. Bridou, B. Pardo. Application of the Fourier transform in a

- preliminary analysis of the reflectivity curve obtained by grazing X-ray reflectometry[C]. *SPIE*, 1994, **2253**: 667~678
- 3 Jiang Hui, Xu Jing, Zhu Jingtao *et al.*. Applications of the Fourier transform to characterize the performances of nanometer multilayer structures [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2158~2165  
蒋 晖, 徐 敬, 朱京涛 等. 用傅里叶变换方法实现的纳米多层膜性能表征[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2158~2165
- 4 E. Smigiel, A. Knoll, N. Broll *et al.*. Determination of layer ordering using sliding-window Fourier transform of X-ray reflectivity data[J]. *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 1998, **6**(1): 29~34
- 5 E. Smigiel, A. Cornet. Characterization of a layer stack by wavelet analysis on X-ray reflectivity data[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, **33**(15): 1757~1763
- 6 I. R. Prudnikov, R. J. Matyi, R. D. Deslattes. Wavelet transform approach to the analysis of specular X-ray reflectivity curves[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(7): 3338~3346
- 7 Oleksiy Starykov, Kenji Sakurai. Determination of interface roughness of Gd films deposited on Si surface using improved wavelet transform of X-ray reflectivity data[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **244**(1-4): 235~239
- 8 Jiang Hui, Xu Jing, Zhu Jingtao *et al.*. Applications of the wavelet transform to characterize the oxide layer, interlayer and thickness fluctuation in multilayer structures[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2288~2293  
蒋 晖, 徐 敬, 朱京涛 等. 小波变换表征多层膜氧化层, 界面层和膜厚漂移[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2288~2293
- 9 H. Jiang, J. T. Zhu, J. Xu *et al.*. Determination of layer-thickness variation in periodic multilayer by X-ray reflectivity[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(10): 103523

栏目编辑: 韩 峰