

文章编号: 0258-7025(2009)08-2158-08

# 用傅里叶变换方法实现的纳米多层膜性能表征

蒋 晖 徐 敬 朱京涛 黄秋实 白 亮 王晓强 王占山 陈玲燕

(同济大学物理系, 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘要** 利用傅里叶变换(FFT)分析了纳米多层膜的 X 射线掠入射反射率测试曲线,模拟了各种制备和测试条件对多层膜结构参数测试结果的影响,检验了傅里叶变换方法的适用性和精确度。分析结果表明,相对于传统的反射曲线拟合方法,傅里叶变换方法具有直观和快速的优点,在不引入主观的膜层结构模型的情况下可以较为准确地定出复杂的多层膜结构参数,为多层膜结构表征提供了一种分析方法。

**关键词** 薄膜; 纳米多层膜; 傅里叶变换; 自相关函数; 曲线拟合; 界面

**中图分类号** O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2158

## Applications of the Fourier Transform to Characterize the Performances of Nanometer Multilayer Structures

Jiang Hui Xu Jing Zhu Jingtao Huang Qiushi Bai Liang Wang Xiaoqiang

Wang Zhanshan Chen Lingyan

(Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Fourier transform is used to analyze the grazing incidence X-ray reflectivity curve of nanometer multilayer structures. The influences of preparing and measuring conditions on measuring results of multilayer structure parameters are simulated and the applicability and accuracy of Fourier transform is verified. The results show that the Fourier transform is more intelligible and quicker than traditional curve fitting method. The Fourier transform can exactly determine complex multilayer structure parameters without any subjective layer-structure model, which is a powerful analysis method for characterization of multilayer structures.

**Key words** thin films; nanometer multilayer; Fourier transform; auto-correlation function; curve fitting; interface

### 1 引 言

集成电路制作的光刻技术、同步辐射应用、等离子体诊断、天文观测等现代科技领域存在的一个核心难题是获得极紫外和软 X 射线波段的正入射高反射元件。解决这一难题公认的有效方法是研制高性能纳米多层膜。由于薄膜厚度非常小,制备过程中细微的偏差将造成薄膜结构无法达到设计值,从而影响多层膜的光学性能,所以多层膜的准确结构表征是研制高性能极紫外与软 X 射线波段多层膜的关键技术之一。最常见的表征方法之一是 X 射线掠入射反射测

量,它可以获得包含薄膜厚度、界(表)面粗糙度和材料堆积密度等结构信息<sup>[1~3]</sup>。主要的分析方法是基于 Parrat 递推公式<sup>[4]</sup>的全谱曲线拟合的方法<sup>[5,6]</sup>。但是材料间的扩散和表面的氧化等都会使反射曲线拟合引入很大的误差。虽然可以通过介入主观的经验来辅助拟合<sup>[7]</sup>,但引入较多拟合变量将使拟合的可信度下降。对掠入射 X 射线反射曲线进行傅里叶变换,所得振荡频率可对应多层膜中各个界面间的距离。通过傅里叶变换(FFT),Bridou 等<sup>[8,9]</sup>将反射曲线从波矢域转化到膜层厚度域上。定义自相关函数表示

收稿日期: 2008-09-16; 收到修改稿日期: 2008-12-31

**基金项目**: 国家自然科学基金(10435050,1067091,10675092)、国家 863 计划(2006AA12Z139)和上海市科学技术委员会基金(07DZ22302)资助课题。

**作者简介**: 蒋 晖(1984—),男,硕士研究生,主要从事极紫外和软 X 射线多层膜研究。E-mail: timberwolfsh@163.com

**导师简介**: 王占山(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事极紫外和软 X 射线光学研究。

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

薄膜材料折射率变化率的自乘积,由于多层膜中只有界面处有折射率突变,所以自相关函数曲线在界面位置将出现较大波动。傅里叶变换中对反射曲线采用了运动学近似,故不能使用反射曲线的全反射部分,否则会出现伪峰,影响多层膜结构参数的测量。傅里叶变换计算简单、结果直观,近年来得到了有效的应用。在对液体和固体界面进行分析中,清晰地分辨了周期仅约 1 nm 的分子层结构<sup>[10]</sup>。在对 HfO<sub>2</sub> 薄膜的研究中,还测量得到了不同晶态的薄膜的界面以及 Si 基底的氧化层厚度<sup>[11]</sup>。在对金-硅合金薄膜结构表征中,还得到了薄膜中成分的变化<sup>[12]</sup>。

薄膜结构表征中,尽管 X 射线掠入射反射曲线的傅里叶变换已取得一些应用,但系统研究各种测试条件和材料特性对表征精度的影响较少。对纳米多层膜结构参数表征,傅里叶变换方法还没有得到广泛的应用。本文重点研究了应用傅里叶变换方法表征制备过程引起的多层膜结构偏差和测试时带来的反射曲线的精度。傅里叶变换在突出自己直观和快速优点的同时,也可以结合传统的反射曲线拟合方法,使多层膜结构参数表征更加全面和准确。

## 2 理 论

当一束单色 X 射线掠入射到由  $N$  层(靠近基底的一层是第  $N$  层膜)薄膜组成的多层膜结构上时,由 Parrat 递推关系得到的多层膜内第  $j$  层膜的反射光振幅为

$$R_j = \frac{r_j E_j + R_{j+1} a_{j+1}}{1 + R_{j+1} a_{j+1} r_j E_j}, \quad (1)$$

其中  $r_j$  是第  $j$  个界面的菲涅耳(Fresnel)反射系数,  $E_j = \exp(-q_{j-1} q_j \sigma_j^2 / 2)$  是粗糙度因子<sup>[13]</sup>,  $a_{j+1} = \exp(-i q_{j+1} l_{j+1})$  是相位因子,  $q_j$  是第  $j$  个界面的传递波矢,  $l_j$  是第  $j$  层薄膜的平均厚度。多层膜基底的反射光振幅  $R_{N+1} = 0$  表示,根据(1)式可计算出多层膜的总反射率。

在远离全反射区域,可以忽略 X 射线在两种材料界面上的折射和不同材料的吸收差别。同时,由于界面对 X 射线的反射系数远小于 1,所以可以只考虑界面上的一次反射,这时多层膜的反射系数可以表示为<sup>[9,14]</sup>

$$R_0 = \sum_{j=1}^{N+1} r_j E_j \exp(-i \sum_{n=N}^{j-1} q_0 l_n), \quad (2)$$

式中  $q_0 = q_j = 2k_0 \sin \theta_0 = \frac{4\pi \sin \theta_0}{\lambda}$ ,  $k_0$  为入射光波矢的模,  $\theta_0$  为掠入射角。界面上的 Fresnel 反射系数可

近似为  $r_j \approx k_0^2 \delta \chi_j / q^2$ , 其中  $\delta \chi_j$  为第  $j$  个界面处材料极化率的变化,对应着材料折射率的变化。由此,表面处 X 射线的反射率为

$$|R_0(q)|^2 = (k_0^4 / q^4) \sum_{j,i=1}^{N+1} \delta \chi_j \delta \chi_i \exp(-q^2 \sigma_{ji}^2 / 2 - i q z_{ji}), \quad (3)$$

式中  $z_{ji} = |z_j - z_i|$  是两个界面间的距离,粗糙度为  $\sigma_{ji}^2 = \sigma_j^2 + \sigma_i^2$ 。如果修正全反射角引起的误差,则  $q = 2k_0 \sqrt{\sin^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_c}$ , 其中  $\theta_c$  是薄膜各种材料的平均全反射角。

为定义薄膜任意厚度折射率变化的相关性,引入一个自相关函数(ACF),其表达形式为

$$\text{ACF}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} n'(t) n'(t-z) dt. \quad (4)$$

由于(3)式包含了折射率变化的相关项,所以可利用傅里叶变换建立与反射率间的关系,可写为

$$\text{ACF}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q^4 |R_0(q)|^2 \exp(i q z) dq. \quad (5)$$

联立(3)和(5)式,可以得到

$$\text{ACF}(z) = \sqrt{2\pi} k_0^4 \sum_{j,i=1}^N (\delta \chi_j \delta \chi_i / \sigma_{ji}) \times \exp[-(z - z_{ji})^2 / (2\sigma_{ji}^2)]. \quad (6)$$

由(6)式可以看出自相关函数是一系列高斯函数的叠加。这些高斯函数的峰值间距离表示膜层界面的间距,半峰全宽  $\sqrt{2} \sigma_{ji}$  与界面粗糙度成正比<sup>[8]</sup>。

对有  $i$  个界面的多层膜,如果不考虑在  $z=0$  处的峰位,也就是每个界面与其自身的相关情况, X 射线掠入射反射曲线傅里叶变换后得到的自相关函数有  $i(i-1)/2$  个峰。对于膜层界面间距相等的周期多层膜,自相关函数曲线中的高斯峰是由几乎相同峰位的高斯形子峰重叠形成的。掠入射 X 射线曲线的最大测试角度直接影响傅里叶变换后薄膜厚度的最小分辨率。根据傅里叶变换的特性,可以得出这个最小分辨率<sup>[15]</sup>为

$$d_{\min} = \frac{2\pi}{q_{\max}} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}. \quad (7)$$

## 3 傅里叶变换表征薄膜结构参数的特性

### 3.1 厚度辨析的精度

在 Si 基底上构造了 [Si(10 nm)/Mo(5 nm)] × 5 的多层膜(以下未经说明均采用此结构),利用 Parrat 递推公式模拟 X 射线掠入射反射曲线

(Cu  $K\alpha$ 线, 波长 0.154 nm), 掠入射角步进  $0.01^\circ$ , 假设多层膜界(表)面粗糙度都为 0。

对除全反射外的掠入射角  $0.3^\circ \sim 10^\circ$  范围内的 X 射线反射曲线做傅里叶变换, 图 1 是反射曲线傅里叶变换后的自相关函数曲线, 其中的前 2 个峰是两种材料的单层膜厚度, 最后 1 个峰则是整个周期膜的总厚度。由于离散傅里叶变换的特性, 理论上呈狄拉克函数<sup>[8]</sup>的峰形得到了展宽, 半峰全宽约为 0.56 nm, 这将影响多层膜界面粗糙度的分析。表 1 列出了自相关曲线中前几个峰位和最后几个峰位对应的膜层厚度与理论计算结构厚度的比较。由此可以看出, 对 X 射线掠入射反射曲线进行傅里叶变换分析对于检测膜层厚度具有较好的可行性。

表 1 傅里叶变换得到的膜层厚度与理论厚度的比较

Table 1 Comparison of layer thickness from FFT with theoretical thickness

Structure	Theory /nm	FFT /nm	Structure	Theory /nm	FFT /nm
Mo layer	5	5.01	2 periods	30	30.01
Si layer	10	10.0	4 periods+Mo	65	64.99
A period	15	15.01	4 periods+Si	70	69.95
A period+Mo	20	20.02	Overall	75	75.09

### 3.2 X 射线反射测量角分辨率对测试结果的影响

影响 X 射线反射测量角分辨率的因素主要有入射 X 射线的准直性和探测器狭缝的宽度。如果测量时角分辨率不高, 将探测到界面粗糙引起的漫散射光, 导致反射峰变高和展宽, 并可能损失 Kiessig 振荡等信息。图 2(a) 给出了改变探测狭缝宽度而获得的不同角分辨率分别为  $0, 0.01^\circ$  和  $0.02^\circ$  的情况下反射率随掠入射角的变化。常规的拟合方

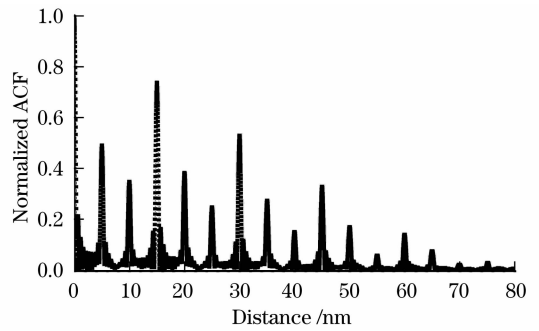
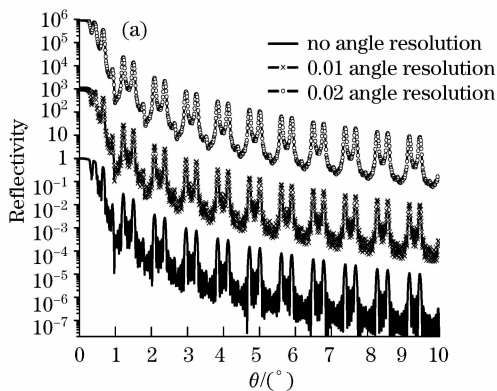


图 1 X 射线掠入射反射曲线傅里叶变换的归一化自相关函数

Fig. 1 Normalized ACF of the FFT of X-ray grazing-incidence reflectivity curve

法中不同参数间的调节有明显的相互干扰。图 2(b) 给出了使用傅里叶变换得到的自相关函数结果, 由此可以看出, 多层膜中不同结构参数在自相关函数中有很好的独立性。虽然测试时角分辨率的降低会在一定程度上降低自相关函数峰值的高度, 厚膜层处的峰位不易分辨, 但其对膜层厚度的辨析没有丝毫影响。傅里叶变换方法的这种膜层变量分离的特性与传统拟合方法相比具有明显的优势。

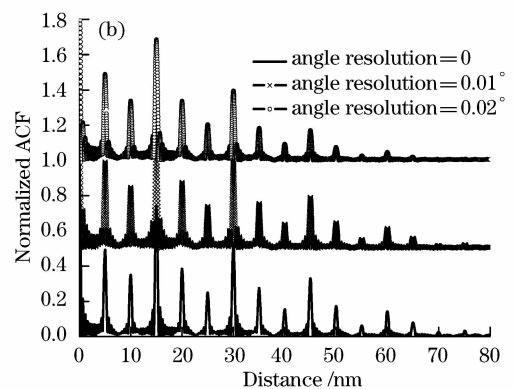


图 2 不同测试角分辨率的 X 射线掠入射反射曲线(a)及其傅里叶变换得到的归一化自相关函数曲线(b)

Fig. 2 X-ray grazing-incidence reflectivity curve (a) and normalized ACF curves

(b) at different angular resolutions

### 3.3 X 射线反射测量时步进角度大小的影响

为了节约多层膜 X 射线掠入射反射测量时间, 有时会采用大的步进角度, 其结果是损失反射测量

曲线中部分细节。当步进角度较大时, 会使测试的反射曲线发生畸变。图 3(a) 给出了不同步进测试角度时模拟得到的反射率曲线。图 3(b) 是对这些

曲线进行傅里叶变换后得到的自相关函数。由图 3(b)可以看出,随着步进角度的增加,能够得到的

最大膜层厚度逐渐减小,但在可分辨的膜层厚度测试部分,测试精确度与步进角度大小没有关系。

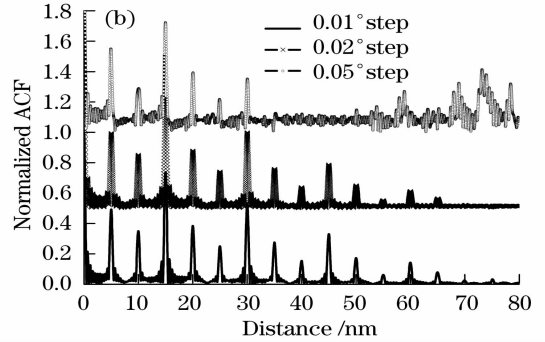
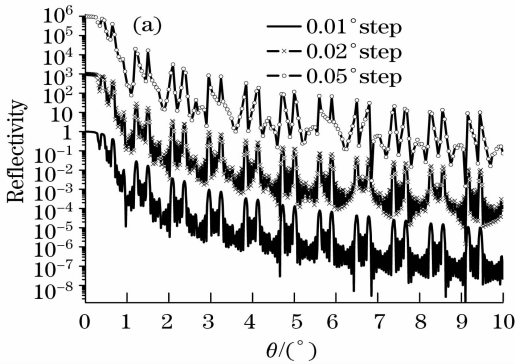


图 3 不同步进角度 X 射线掠入射反射曲线(a)及其傅里叶变换得到的归一化自相关函数曲线(b)

Fig. 3 X-ray grazing-incidence reflectivity curve (a) and their normalized ACF curves (b) at different angular steps

### 3.4 膜层材料光学常数差异对测试结果的影响

由自相关函数定义可知,膜层材料光学常数的变化是最关键的分辨多层膜结构参数的因素。为了检验傅里叶变换方法对材料光学常数的辨析能力,在上述计算模型中的每个周期 Mo 和 Si 两种材料界面处加入 1 nm 不同光学常数的间隔层材料,分别为 B<sub>4</sub>C, SiC 和 V。表 2 是这 5 种材料在 X 射线波长为 0.154 nm 处的光学常数。图 4 给出了厚度为 1 nm 的 B<sub>4</sub>C, SiC 和 V 作为间隔层的 Mo/Si 多层膜 X 射线反射曲线傅里叶变换的自相关函数曲线。由图 4 可知,由于 Si 与 B<sub>4</sub>C 的折射率接近,无法得到间隔层厚度的信息。这是由于傅里叶变换方

法忽略了材料的吸收,只考虑膜层材料光学常数的实部(也就是折射率)。

表 2 Mo, Si, B<sub>4</sub>C, SiC 和 V 在波长 0.154 nm 波长处的光学常数

Table 2 Optical constants at 0.154 nm for Mo, Si, B<sub>4</sub>C, SiC and V

Material	<i>n</i>	$\beta$
Mo	0.99997133	$2.05143 \times 10^{-6}$
Si	0.99999239	$1.76476 \times 10^{-7}$
B <sub>4</sub> C	0.99999242	$7.48947 \times 10^{-9}$
SiC	0.99998955	$1.75305 \times 10^{-7}$
V	0.99998251	$1.67848 \times 10^{-6}$

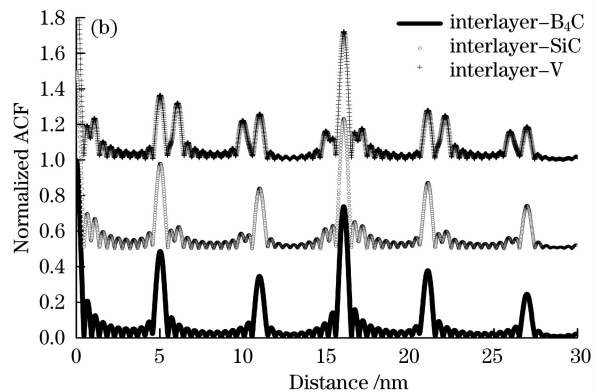
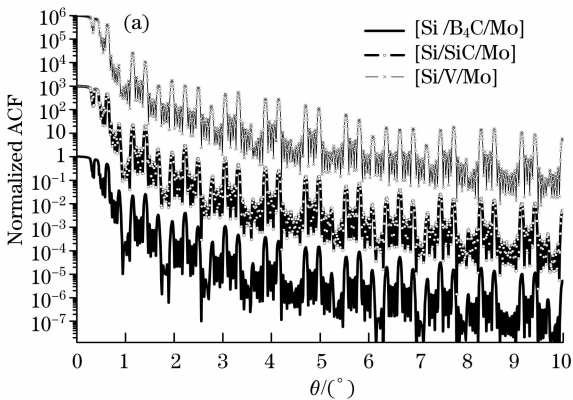


图 4 包含 1 nm 的 B<sub>4</sub>C, SiC 和 V 间隔层的 Mo/Si 多层膜反射曲线(a)及其傅里叶变换后归一化自相关函数(b)

Fig. 4 Reflectivity curves of Mo/Si multilayers including 1 nm B<sub>4</sub>C, SiC and V interlayer (a) and normalized ACF curves (b)

### 3.5 膜层间界面宽度对测试结果的影响

通常反射曲线拟合确定多层膜结构参数的最大难点是确定材料间的粗糙度和相互扩散。各种材料组合多层膜的界面不完全相同,这是由材料的原子尺度、结合能和化学稳定性等决定的。如在几种常用的

多层膜材料对中, W/B<sub>4</sub>C 和 W/Si 多层膜的界面清晰,界面宽度主要是纯粹的粗糙起伏<sup>[16]</sup>; Mo/Si 多层膜的界面除了粗糙起伏外,还有两种材料间形成的 MoSi<sub>2</sub> 为主的扩散层, Mo 在 Si 上面形成的扩散层比 Si 在 Mo 上面形成的扩散层厚<sup>[17~19]</sup>。

在通常反射曲线拟合中,一般认为界面处的折射率变化满足误差函数关系,模糊了材料相互扩散和粗糙度的区别<sup>[5]</sup>,Bridou 等<sup>[8]</sup>在用傅里叶变换方法研究膜层界面时就采用了这种模型。但事实上,一般材料组合如 Mo/Si, Mg/SiC 和 Ti/Ni<sup>[20]</sup>等存在着明显的扩散层或合金层,在处理这种扩散层与粗糙度共同作用的界面时,就不适合采用简单的误差函数。

还是以[Si(10 nm)/Mo(5 nm)] $\times$ 5 多层膜为例,讨论傅里叶变换方法在处理不同界面模型过程中的特点,为此,模拟了 3 种不同的界面模型。模型 1 是用误差函数定义的界面,Si 在 Mo 上层的界面宽度为 0.3 nm,Mo 在 Si 上层的界面宽度为 0.7 nm。模型 2 是认为界面为 MoSi<sub>2</sub> 扩散层,不考虑粗糙度,两种界面的扩散层分别是 0.3 nm 和 0.7 nm。为保持多层膜周期不变,Mo 和 Si 的厚度分别减少 0.5 nm。模型 3 综合考虑了以上两种情况,扩散层仍为 0.3 nm 和 0.7 nm,每个界面的粗糙度以误差函数表示,宽度为 0.2 nm。

图 5(a)给出了 3 种界面模型下多层膜的计算

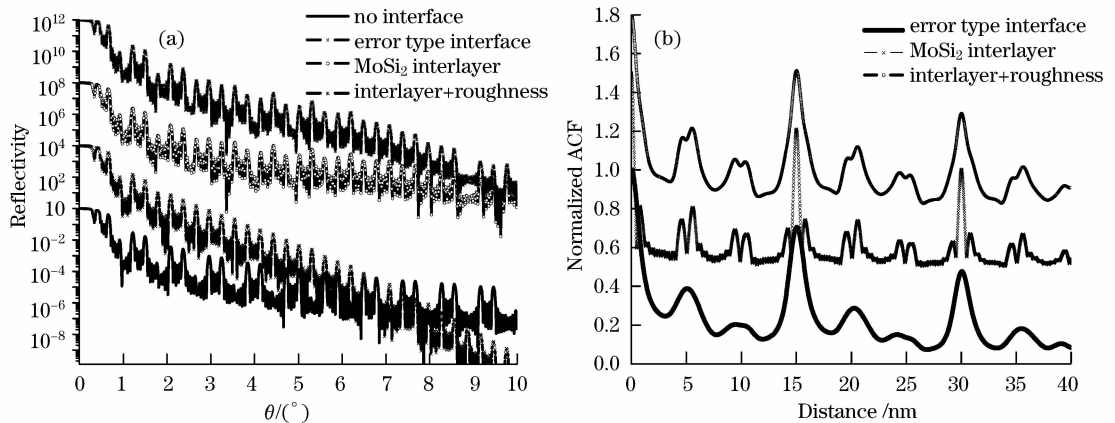


图 5 不同界面模型的 Mo/Si 多层膜计算反射曲线(a)及其傅里叶变换后得到的归一化自相关函数(b)

Fig. 5 Reflectivity curves of Mo/Si multilayers at different interlayer models (a) and normalized ACF curves (b)

## 4 傅里叶变换法在薄膜表征中的应用

### 4.1 W/B<sub>1</sub>C/Cr 三层膜结构表征

为了表征用磁控溅射方法由上至下在 Si 基底上沉积的 W/B<sub>1</sub>C/Cr 三层膜的结构参数,用高分辨率 X 射线衍射仪(Cu K $\alpha$  线)测量了薄膜的掠入射反射曲线。在全反射区域外对反射曲线进行了傅里叶变换,所得自相关函数曲线如图 6(a)所示。自相关函数曲线中的峰位是各个界面间的距离。从最小界面位置开始,曲线中包括基片氧化物、每层膜的厚度以及各膜层厚度之和,由此可以得到各个膜层的厚度,如表 3 所示。根据制备的薄膜结构,又进行了常用的反射

反射曲线,图 5(b)给出了傅里叶变换后的自相关函数。对于多层膜周期位置的峰,其计算界面宽度为 0.76 nm,对应的自相关函数半峰全宽是 1.075 nm。但实际的半峰全宽为 2.0 nm,这表明离散傅里叶变换下得到的界面半峰全宽与理论值相比有明显展宽,实际运用中只能做定性比较,很难定量。当界面以稳定的扩散层形式出现时,相当于界面是超薄的膜层。从自相关函数曲线分析来看,Mo 和 Si 层上下各有一个扩散层,得到的是 1 nm 的两个超薄扩散层厚度之和,而不是 0.7 nm 的扩散层厚度。当在每个周期内只有 1 个扩散层时,得到的是 0.7 nm 的扩散层厚度,而不是 0.3 nm 的扩散层厚度。这说明在检测包含超薄扩散层的界面间距时,得到的是偏厚的界面间距。事实上,不同材料组成多层膜中的界面包含了上述两种情况,这将使一些峰位接近的高斯峰展宽而部分重合。通过高次微分和傅里叶自去卷积等方法可以分辨这些重叠峰,以拟合来评估膜层界面状态。

曲线拟合,如图 6(b)所示,得到的膜层拟合结构参数也列在表 3 中。由表 3 可知,傅里叶变换方法得到的膜层厚度与传统的反射曲线拟合得到的膜层厚度吻合。两种方法得到膜层厚度偏差的最大处是表面层和基片上氧化层厚度,这是由于反射曲线拟合中引入了粗糙度的概念,使得其膜层厚度的定义与傅里叶变换中纯粹从光学常数引入的厚度略有差别。

### 4.2 Mg/SiC 多层膜界面的检测

Mg/SiC 是实现波长大于 25 nm 极紫外波段高反射镜的重要多层膜材料组合。由于这两种材料间有严重的扩散,仅用常规的反射曲线拟合方法得到

的膜层结构不够准确。为此利用傅里叶变换方法表征了这种多层膜。实验样品是 30 个周期的 Mg/SiC

多层膜。

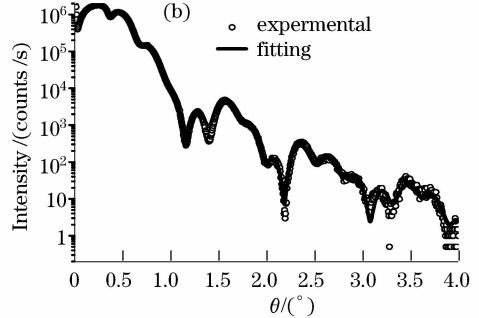
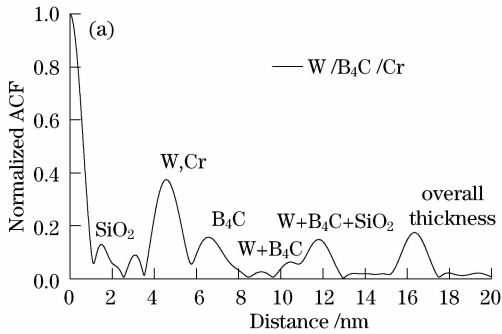


图 6 W/B<sub>4</sub>C/Cr 三层膜反射曲线的傅里叶变换后的归一化自相关函数(a)及其拟合曲线(b)

Fig. 6 Normalized ACF curve from FFT of the reflectivity curve of W/B<sub>4</sub>C/Cr trilayers (a) and the fitted curve (b)

表 3 传统的曲线拟合结果与傅里叶变换结果的比较

Table 3 Comparison of the results from curve fitting with FFT

	W thickness (roughness)	B <sub>4</sub> C thickness (roughness)	Cr thickness (roughness)	SiO <sub>2</sub> thickness (roughness)
Fitted results /nm	3.93(0.37)	6.55(0.30)	4.63(0.42)	1.67(0.57)
FFT results /nm	3.66	6.57	4.60	1.50

图 7(a)和(b)分别给出了测试反射曲线的自相关函数曲线中的前 3 个周期的厚度和最后 3 个周期的厚度。前几个峰反映的是整个多层膜平均的结构信息。最后几个峰是由较少的子峰叠加的,反映了临近表面的膜层和接近基底膜层的界面信息。由于薄膜界面扩散严重,自相关函数峰形有明显的重叠,借助 2 次微分可以辨别峰位信息。所得结果列于表 4 中。自相关函数中的前 2 个峰显示 SiC 的厚度分别为 3.37 nm 和 3.39 nm,其为整个多层膜中 SiC 的平均厚度;由最后 2 个峰可知 SiC 厚度为 2.91 nm 和 3.14 nm,这表明在临界表面或基底处, SiC 厚度减小,最大偏差 14%。同样,自相关函数中的前 2 个峰可知 Mg 的平均厚度为 8.46 nm 和

8.29 nm,由最后 2 个峰显示 Mg 厚度为 8.24 nm 和 8.27 nm,表明在多层膜中 Mg 的厚度稳定,最大偏差小于 3%。自相关函数中的前 2 个峰分析可知周期膜中的两个界面层的厚度分别为 2.05 nm 和 2.3 nm,由最后 2 个峰分析可以得到 2.3 nm 的界面层变为 2.7 nm。自相关函数的最后 1 个周期峰位显示膜层总厚的漂移是 0.13 nm。如果只考虑制备中的随机误差<sup>[21]</sup>,每个周期的厚度漂移仅为 0.0003 nm。上述分析表明 Mg/SiC 多层膜反射曲线中反射峰展宽的主要原因是膜层材料间严重扩散,且扩散程度随周期变化。基于这样的模型进行反射曲线拟合,如图 8 所示,结果较理想。

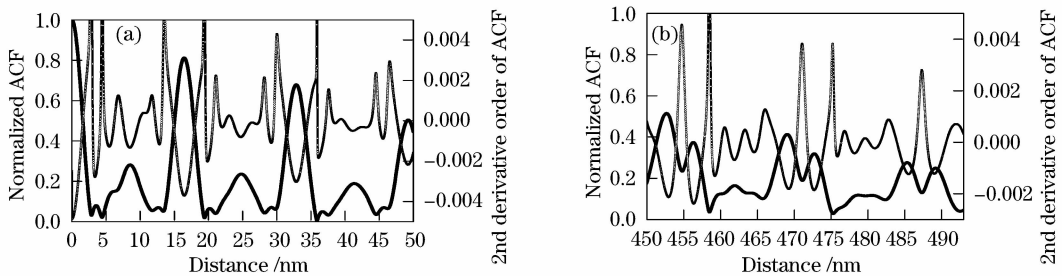


图 7 Mg/SiC 周期多层膜反射曲线傅里叶变换后的归一化自相关函数(a)及其二次微分曲线(b)

Fig. 7 Normalized ACF curves from FFT of the reflectivity curves of Mg/SiC periodic multilayers (a) and its second derivative curves (b)

表 4 Mg/SiC 周期多层膜反射曲线傅里叶变换后的自相关函数曲线峰位分析

Table 4 Analysis of ACF peak positions of FFT of reflectivity curve of Mg/SiC periodic multilayers

Peak position /nm	Structure	Peak position /nm	Structure
3.37	SiC	456.32	period×28
5.44	SiC+interlayer	459.23	period×28+SiC
8.46	Mg(SiC+ interlayer×2)	461.92	period×28+SiC+ interlayer
10.77	Mg+ interlayer	464.59	period×28 +Mg
12.82	Mg+ interlayer×2	469.25	period×28 +Mg+ interlayer×2
16.47	period	472.70	period×29
19.86	period +SiC	475.84	period×29+SiC
22.01	period +SiC+ interlayer	480.94	period×29 +Mg
24.76	period +Mg	485.53	period×29 +Mg+ interlayer×2
27.07	period +Mg+ interlayer	489.01	period×30

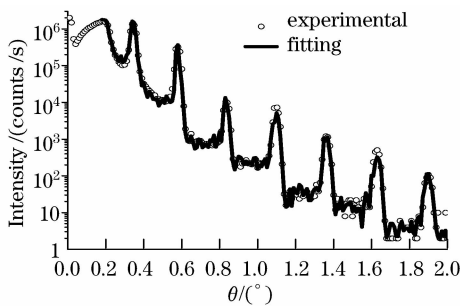


图 8 Mg/SiC 周期多层膜反射测试曲线及其拟合曲线

Fig. 8 Experimental and its fitted curves of Mg/SiC multilayers

## 5 结 论

用傅里叶变换分析了掠入射 X 射线反射测试曲线,无论是对独立的多层膜结构参数表征还是对常规的反射曲线拟合都具有重要作用。详细研究了不同测试、制备和材料本身性质变化情况对多层膜结构参数确定的影响,结果表明傅里叶变换方法是完全客观的分析手段,可以起到分离结构参数的作用,膜层厚度检测精度高。通过 W/B<sub>1</sub>C/Cr 三层膜和扩散严重的 Mg/SiC 周期多层膜结构参数的分析,得到了较精确的结构参数。

## 参 考 文 献

- 1 E. Spiller. Characterization of multilayer coatings by grazing incidence X-ray reflectometry [J]. *Rev. Phys. Appl.*, 1988, **23**: 1687~1700
- 2 M. Nayak, G. S. Lodha, R. V. Nandedkar. X-ray reflectivity investigation at interfaces of multilayer structures; application to Mo/Si multilayers [J]. *Bull. Mater. Sci.*, 2006, **29**(7): 693~700
- 3 Xu Yao, Wang Zhanshan, Xu Jing *et al.*. Characterization of low-Z material layer profiles in bilayer structures by X-ray reflectivity measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*,

2007, **15**(12): 1838~1843

徐 垚,王占山,徐 敬等.用 X 射线反射测量法表征双层结构中低原子序数材料的特性[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(12): 1838~1843

- 4 L. G. Parratt. Surface studies of solids by total reflection of X-rays [J]. *Phys. Rev.*, 1954, **95**(2): 359~369
- 5 D. L. Windt. IMD—software for modeling the optical properties of multilayer films [J]. *Computers in Physics*, 1998, **12**(4): 360~370
- 6 M. Wormington, C. Panaccione, K. M. Matney *et al.*. Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms [J]. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, **357**(1861): 2827~2848
- 7 D. Spiga, G. Pareschi, V. Cotroneo *et al.*. Multilayer coatings for X-ray mirrors: extraction of stack parameters from X-ray reflectivity scans and comparison with transmission electron microscopy results [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(8): 086501
- 8 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
- 9 F. Bridou, J. Gautier, F. Delmote *et al.*. Thin multilayers characterization by grazing X-ray reflectometry and use of Fourier transform [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**: 12~16
- 10 C. -J. Yu, A. G. Richter, A. Datta *et al.*. Observation of molecular layering in thin liquid films using X-ray reflectivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(11): 2326~2329
- 11 O. Durand, D. Rogers, F. H. Teherani *et al.*. Studies of oxide-based thin-layered heterostructures by X-ray scattering methods [J]. *Thin Solid Films*, 2007, **515**(16): 6360~6367
- 12 J. H. He, C. A. Carosella, G. K. Hubler *et al.*. Correlation between formation of layered nanoparticles in phase separated films and ion beam assisted deposition [J]. *Surface & Coating Technology*, 2007, **201**(19-20): 8448~8451
- 13 P. Croce, L. Nevot. Characterization of surfaces by grazing X-ray reflection [J]. *Rev. Phys. Appl.*, 1980, **503**(43): 761~779
- 14 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
- 15 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**: 1757~1763
- 16 A. F. Jankowski, D. M. Makowiecki. W/B<sub>1</sub>C multilayer X-ray mirrors [J]. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(12): 2003~2009
- 17 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Qin Shuji *et al.*. Analysis

- of the reflectivity of Mo/Si multilayer film for soft X-ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1362~1365
- 王洪昌,王占山,秦树基等. 软 X 射线 Mo/ Si 多层膜反射率拟合分析 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1362~1365
- 18 M. H. Modi, G. S. Lodha, M. Nayak *et al.*. Determination of layer structure in Mo/Si multilayers using soft X-ray reflectivity [J]. *J. Phys. B: Physics of Condensed Matter*, 2003, **325**: 272~280
- 19 S. S. Andreev, S. V. Gaponov, S. A. Gusev *et al.*. The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers [J]. *Thin Solid Films*, 2002, **415**(1,2): 123~132
- 20 R. Gupta, M. Gupta. Thermal stability of nanometer range Ti/Ni multilayers [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **515**(4, 5): 2213~2219
- 21 Wang Zhanshan. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(2): 136~138
- 王占山. 膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(2): 136~138