

极紫外光刻照明系统宽带 Mo/Si 多层膜设计与制备

喻 波^{1,2} 李 春¹ 金春水¹ 王春忠³

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

³吉林大学物理学院, 吉林 长春 130012

摘要 针对极紫外光刻照明系统中一块小尺寸反射镜大入射角带宽的需求,采用Si层有效厚度与公转速度关系式和多层膜周期厚度与公转速度关系式,完成了宽带 Mo/Si 多层膜设计膜系的制备工作。在磁控溅射镀膜机上制备了一系列不同周期厚度和 Γ 值(Mo层厚度与多层膜周期厚度的比值)的 Mo/Si 多层膜规整膜系,并利用掠入射 X 射线反射谱表征,分别得到多层膜周期厚度、Mo层有效厚度和 Si 层有效厚度与公转速度的关系式以及多层膜界面粗糙度。采用 Levenberg-Marquardt 算法完成了宽带膜系设计,设计结果为在 $16.8^\circ\sim 24.8^\circ$ 范围内 $R=42\%\pm 1\%$ 。根据 Mo/Si 多层膜周期厚度和 Si 层有效厚度与公转速度的对应关系制备所设计的膜系,并对其极紫外波段反射率进行测量,实验结果为在 $16.8^\circ\sim 24.8^\circ$ 范围内 $R=41.2\%\sim 43.0\%$,实验结果与设计结果吻合得很好,进一步的制备误差反演分析表明实验结果与设计结果之间的细微偏差主要来自 Mo/Si 多层膜 Γ 值及界面粗糙度标定过程中的系统误差。

关键词 薄膜; 极紫外光刻; 宽带多层膜; Mo/Si 多层膜

中图分类号 O484.5; O434.19

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0407001

Design and Fabrication of Broadband Mo/Si Multilayer Films for Extreme Ultra Violet Lithography Illumination System

Yu Bo^{1,2} Li Chun¹ Jin Chunshui¹ Wang Chunzhong³

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract To meet the wide angular bandpass requirement of a small-size mirror in extreme ultra violet (EUV) lithography illumination system, the designed broadband molybdenum (Mo) /silicon (Si) multilayer stack is deposited by using the relationship between effective thickness of Si layers and velocity and the relationship between periodic thickness of multilayers and velocity. Mo/Si periodic multilayers with different periodic thicknesses and Γ (ratio of Mo layer thickness and periodic thickness of multilayer films) are deposited by magnetron sputtering and characterized by small-angle X-ray reflectometry. The relationship between periodic thickness of multilayers and velocity, the relationship between effective thickness of Mo and Si layers and velocity, and the interface roughness of multilayers are provided by characterization of X-ray reflection spectrum. The broadband multilayer stack is designed by utilizing the Levenberg-Marquardt algorithm, and the designed EUV reflectance is $R=42\%\pm 1\%$ at the range of $16.8^\circ\sim 24.8^\circ$. The designed stack is deposited according to the relationship between effective thickness of Si layers and velocity and the relationship between periodic thickness of multilayers and velocity. The measured EUV reflectance of the broadband Mo/Si multilayer stack is $41.2\%\sim 43.0\%$ at the range of $16.8^\circ\sim 24.8^\circ$, which is very

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-13

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX02501-004)

作者简介: 喻 波(1986—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事极紫外多层膜方面的研究。

E-mail: yubodisan@126.com

导师简介: 金春水(1964—),男,博士,研究员,主要从事短波光学方面的研究。E-mail: jin_chunshui@yahoo.com.cn

close to the designed value. Further fabrication error reversion indicates that the small difference between the experimental and designed results is mainly caused by the systematic error in the calibration of Γ value and interface roughness of Mo/Si multilayers.

Key words thin films; extreme ultra violet lithography; broadband multilayer films; Mo/Si multilayer films

OCIS codes 310.4165; 230.4170; 040.7480; 340.7480

1 引言

极紫外光刻(EUVL)技术是下一代光刻技术,预期能够突破 14 nm 光刻节点。极紫外光刻使用波长为 10~14 nm 的光源照明,几乎所有已知光学材料在这一波段都具有强吸收,所以无法采用传统的折射式光学系统。因此,极紫外光刻系统的照明系统、掩模和投影物镜均采用反射式设计,其反射光学元件需镀有周期性多层膜以提高反射率。但是,周期性多层膜的干涉特性导致其反射光谱带宽和入射角带宽很窄,限制了多层膜在某些场合的应用,因此需要采用非周期性多层膜来增大多层膜反射带宽。宽带多层膜的概念最早源于可见光波段,1966年,Heavens等^[1]提出了梯度多层膜的概念,用以拓宽可见光波段反射镜的带宽。1992年,美国哈佛-史密松森天体物理中心的 Joensen等^[2]提出一种设计 X 射线宽带多层膜的幂律函数法,并且制备了掠入射角为 3.5 mrad 下的 W/Si 宽带多层膜。1996年,日本的 Tawara等^[3]提出设计 X 射线宽带多层膜的分堆栈法,设计并制备了 Pt/C 宽带多层膜。1998年,俄罗斯的 Protopopov等^[4]从晶体光学理论出发提出了设计 X 射线宽带多层膜的分析方法理论,并且制备了 W/C 宽角度宽带多层膜。近年来,在极紫外光刻研究的带动下,越来越多关于极紫外波段宽带多层膜的研究见诸报道^[5-8]。这些研究主要聚焦于膜系设计算法和多层膜膜层间扩散处理两方面。算法方面主要包括两大类,一类是以遗传算法(GA)为代表的基于随机数的全局寻优算法,另一类是以 Levenberg-Marquardt(LM)为代表的局部寻优算法。在极紫外波段,由于膜层厚度在纳米量级,膜层间扩散对多层膜反射谱影响很大,因此对扩散的处理是极紫外波段膜系设计和制备的共性问题,处理方式主要包括两层模型和四层模型。两层模型主要是用统计的方法来描述扩散对多层膜反射率的影响,即用各界面的菲涅耳反射系数乘以衰减因子^[9],四层模型则把扩散作为单独的一层予以考虑^[10]。

目前,关于极紫外宽带多层膜的报道在膜系设计方面均有较详细的阐述,而在膜系制备方面,特别是如何使制备得到的宽带膜系实际结构与设计膜系结构尽量相吻合方面,讨论得相对笼统。因此,本文以磁控溅射制备宽带 Mo/Si 多层膜为例,详细阐述了极紫外宽带膜系的具体实现工艺。

2 Mo/Si 多层膜膜层有效厚度与公转速度关系式的标定

所有 Mo/Si 多层膜均采用磁控溅射镀膜机制备,镀膜机为德国莱宝光学生产的大型直流磁控溅射镀膜系统 Nussy 1900,镀膜机装备有 6 个 600 mm×125 mm 大小的矩形靶,最大镀膜基底口径为 $\Phi 650$ mm,本底真空度优于 8×10^{-10} Pa,通过公转调速曲面基底上膜厚控制精度能够达到 $\pm 0.1\%$ ^[11]。测量多层膜掠入射 X 射线反射谱的 X 射线衍射仪为荷兰 Panalytical 公司生产的 X'Pert PRO MRD 衍射仪,测量多层膜极紫外反射谱的极紫外光谱仪为德国 Bruke ASC 生产的 CXUVS 光谱仪^[12]。

Mo/Si 多层膜膜层间扩散使得 Mo 层和 Si 层在极紫外波段的光学厚度发生变化,因此在制备宽带 Mo/Si 多层膜之前首先通过改变基片公转速度制备了 5 个不同周期厚度和 Γ 值(Mo 层厚度与多层膜周期厚度的比值)的 Mo/Si 多层膜规整膜系(ML1~ML5),以实现膜层有效厚度与公转速度关系式的标定。原则上,最直接的方法是采用两层模型拟合规整 Mo/Si 多层膜的极紫外反射谱来得到 Mo/Si 多层膜的 Γ 值,进而得到 Mo 层和 Si 层的有效厚度。但是,多层膜极紫外反射谱需要在真空下测量,样品从真空腔中拿进拿出十分不便,且样品的装调也十分麻烦,因此对大量样品的极紫外反射谱进行测量,无论在时间上还是费用上都耗费较大。作为替代方案,采用掠入射 X 射线反射谱来得到 Mo/Si 多层膜的 Γ 值则十分方便,因为掠入射 X 射线反射谱的测量无需在真空中进行,且样品可以自动批量测量。具体来说,多层膜的周期厚度由修正后的布拉格公式拟合得到^[13],然后固定多层膜的周期厚度,采用两层模型拟合掠入射 X 射线反射谱得到多层膜的结构参数。Mo/Si 多层膜可以认为是由理想的纯 Mo 层和纯 Si 层交替堆积而成,Mo 层与 Si 层间的扩散归入膜层间的界面粗糙度 σ 中,界面粗糙度对反射率的影响由 Nevot-Croce 修正因子 $\exp(k_i k_{j+1} \sigma^2 / 2)$ 来近似描述^[9]。在所有拟合

过程中,膜层密度均取体材料的密度。由于测量掠入射 X 射线反射谱的 X 射线衍射仪工作波长为 0.154 nm,而极紫外反射谱的波长在 13.5 nm 附近,因此,用两种手段表征多层膜时不可避免地存在系统偏差。为减小两者间的系统偏差,掠入射 X 射线反射谱的散射矢 k ($k = 4\pi \sin \theta/\lambda$)与极紫外反射谱的散射矢应尽量一致。多层膜掠入射 X 射线反射谱的第一布拉格衍射峰一般在 0.6° 附近,对应散射矢为 0.85 nm^{-1} ,宽带多层膜在 13.5 nm 波长处的正入射角在 20° 附近,即掠入射角在 70° 附近,对应散射矢为 0.87 nm^{-1} ,两者基本相符。因此,通过拟合全反区(全反角能够较敏感地反映多层膜的 Γ 值)及第一个布拉格衍射峰附近角度范围($0.2^\circ \sim 1^\circ$)的掠入射 X 射线反射谱来反演多层膜的结构参数比较合适。采用该方式反演得到的 Mo/Si 多层膜规整膜系的结构参数如表 1 所示,其中 σ_1 和 σ_2 分别为 Mo/Si 多层膜 Mo 层在 Si 层上和 Si 层在 Mo 层上的界面粗糙度。将由 ML1、ML2 和 ML3 的反演结构参数计算得到的极紫外波段的反射率与其实测反射率曲线进行比较(图 1),从图 1 可以看出,两者相差较小,反射率曲线的中心波长差别小于 20 pm,峰值反射率差别小于 1%,这充分说明,拟合 $0.2^\circ \sim 1^\circ$ 角度范围内的掠入射 X 射线反射谱完全可以替代直接拟合极紫外反射谱得到 Mo/Si 多层膜的 Γ 值,进而得到 Mo 层和 Si 层的有效厚度。

表 1 不同公转速度下 Mo/Si 多层膜周期厚度 d 与 Γ 值

Table 1 Periodic thickness d and Γ value of Mo/Si multilayer films under different velocities

No.	$v_{\text{Si}} / (\text{r/min})$	$v_{\text{Mo}} / (\text{r/min})$	d / nm	Γ	σ_1	σ_2
ML1	1.4108	0.7147	7.455	0.554	1.06	0.00
ML2	1.1355	0.7147	8.4333	0.485	0.95	0.01
ML3	1.4108	0.9438	6.4865	0.493	0.97	0.03
ML4	0.9501	0.7147	9.3862	0.429	0.98	0.07
ML5	1.4108	1.3889	5.5455	0.418	0.90	0.00

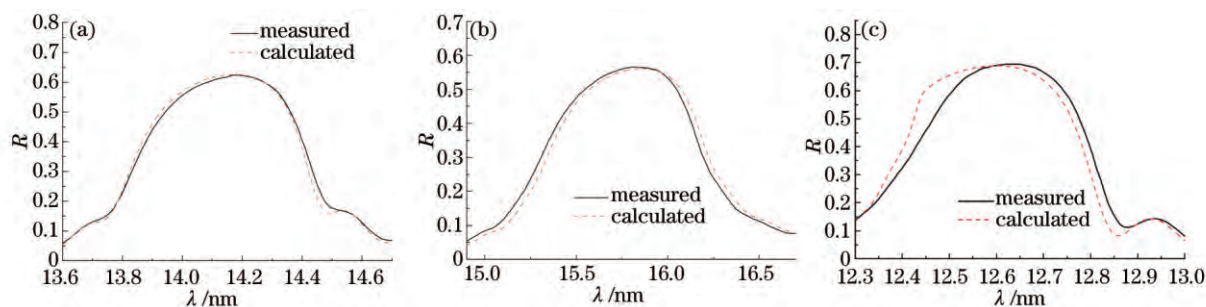


图 1 由多层膜反演结构参数计算得到的极紫外波段反射率与实测结果的比较。(a) ML1; (b) ML2; (c) ML3

Fig.1 Comparison result between measured and calculated extreme ultraviolet reflectance based on the multilayer film inversion structure. (a) ML1; (b) ML2; (c) ML3

周期厚度与公转速度满足 $d = av_{\text{Si}} + bv_{\text{Mo}} - \Delta$, 其中 Δ 为膜层间扩散引起的周期厚度的减小值。将表 1 中的数据代入拟合 d 与 $1/v_{\text{Si}}$ 和 $1/v_{\text{Mo}}$ 的线性关系,得到

$$d = 5.635/v_{\text{Si}} + 2.819/v_{\text{Mo}} - 0.483, \quad (1)$$

将周期厚度 d 与 Γ 的乘积定义为 Mo 层的有效厚度 d_{Mo} , d 与 $1-\Gamma$ 的乘积定义为 Si 层的有效厚度 d_{Si} , 拟合 d_{Mo} 与 $1/v_{\text{Mo}}$ 的线性关系、 d_{Si} 与 $1/v_{\text{Si}}$ 的线性关系, 分别得到

$$d_{\text{Mo}} = k_1/v_{\text{Mo}} + \Delta_1 = 2.668/v_{\text{Mo}} + 0.389, \quad (2)$$

$$d_{\text{Si}} = k_2/v_{\text{Si}} + \Delta_2 = 5.916/v_{\text{Si}} - 0.868, \quad (3)$$

$$d = d_{\text{Si}} + d_{\text{Mo}} = 5.916/v_{\text{Si}} + 2.668/v_{\text{Mo}} - 0.479. \quad (4)$$

可以看出, (1)式与(4)式存在微小的差别, (1)式对周期厚度的标定是准确的, 如果直接采用(2)式和(3)式会导致周期厚度的标定产生一定的误差。这种误差的影响将在后文中予以详细阐述。

3 宽带 Mo/Si 多层膜的设计及容差分析

极紫外光刻照明系统由 5 块反射镜(M1~M4 组成, 其中 M4 镜的尺寸非常小, 口径只有 6 mm, 入射角范围

为 $16.8^\circ \sim 24.8^\circ$, 在如此小的反射镜上不太可能镀制周期厚度横向梯度分布的多层膜来实现入射角与周期厚度的匹配^[11], 必须镀制周期厚度纵向梯度分布的多层膜来提高多层膜的角带宽。M4 镜宽带膜设计指标为在入射角 $16.8^\circ \sim 24.8^\circ$ 范围内的反射率尽可能高, 且反射率波动小于 $\pm 1\%$ 。根据设计指标定义评价函数为

$$f_{MF} = \frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} [R_0(\varphi) - R(\varphi)]^2 d\varphi, \quad (5)$$

式中 φ_{\max} 和 φ_{\min} 分别为最大入射角和最小入射角 (φ 为入射角), $R_0(\varphi)$ 为目标反射谱。在膜系设计过程中, 各膜层的厚度为独立变量, 以 Mo/Si 多层膜规整膜系为初始结构, 采用 LM 局部寻优算法使评价函数 f_{MF} 最小以便使计算得到的反射谱尽可能接近目标谱。M4 反射镜宽带膜的优化设计结果如图 2 所示, 其设计结果为在 $16.8^\circ \sim 24.8^\circ$ 范围内 $42\% \pm 1\%$, 多层膜周期数均为 50, 从空气到基底周期数 N 逐渐增大。为使多层膜的扩散不随多层膜周期厚度和 Γ 值产生非线性变化, Mo 层厚度限定为 2~6 nm, Si 层厚度限定为 2~8 nm, 最外一层为 Si 层, 且在 Si 层上添加厚度为 2 nm 的自然氧化层 SiO_2 , 界面粗糙度 $\sigma_1=0.97, \sigma_2=0.01$, 分别取表 1 中的 5 个 Mo/Si 多层膜的平均值。

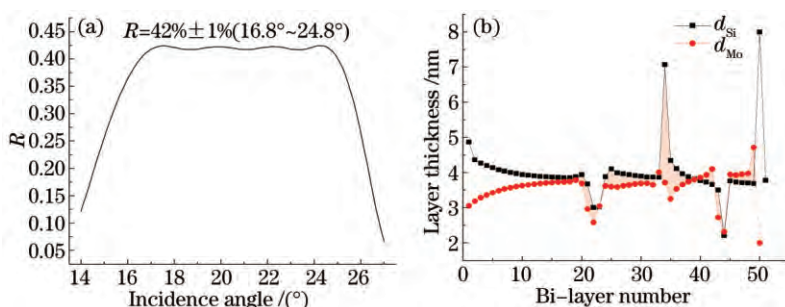


图 2 (a) M4 宽带膜反射谱 LM 算法设计结果; (b) M4 宽带膜系厚度

Fig.2 (a) Design result of M4 broadband films based on LM algorithm; (b) thickness of M4 broadband multilayer films

为评估该膜系设计的可制造性, 对膜系设计进行了容差分析, 包括系统误差和随机误差(图 3)。如图 3(a) 所示, 当膜层厚度一致增厚时, 反射率曲线整体向正入射角增大的方向偏移, 16.8° 入射角附近的反射率对这种偏移极为敏感, 膜层厚度每增加 0.1%, 反射率下降约 1%。导致多层膜层厚度整体偏移的因素主要有两个, 一是多层膜制备时溅射速率发生系统性偏移, 二是多层膜周期厚度定标式 $d = av_{\text{Si}} + bv_{\text{Mo}} - \Delta$ 有误差。对于前者, 经过评估发现 Nassy 镀膜机镀制 Mo/Si 多层膜规整膜系周期厚度的短期复现性优于 0.05%, 因此可以不予考虑; 对于后者, 将在下一节中进行阐述。如图 3(b) 所示, 当膜系各周期厚度即各 Mo-Si 双层厚度不变, Γ 值一致变大时, 反射率曲线整体向正入射角减小的方向偏移, 24.8° 入射角附近的反射率对这种偏移相对敏感, Γ 值每增加 1%, 反射率下降约 0.2%。导致 Γ 值整体偏移的原因主要是拟合掠入射 X 射线反射谱得到的 Γ 值与极紫外波段实际 Γ 值存在系统偏差, 为减小宽带膜反射谱设计值与实测值的偏差, 应尽量减小这种 Γ 值的系统偏差。图 3(c) 所示为宽带膜系各膜层厚度产生随机变化时对其反射谱的影响。其中, 控制参数是各膜层厚度变化的相对值, 如控制参数为 0.001 表示各膜层厚度的相对变化不超过 $\pm 0.1\%$, 由此控制参数生成

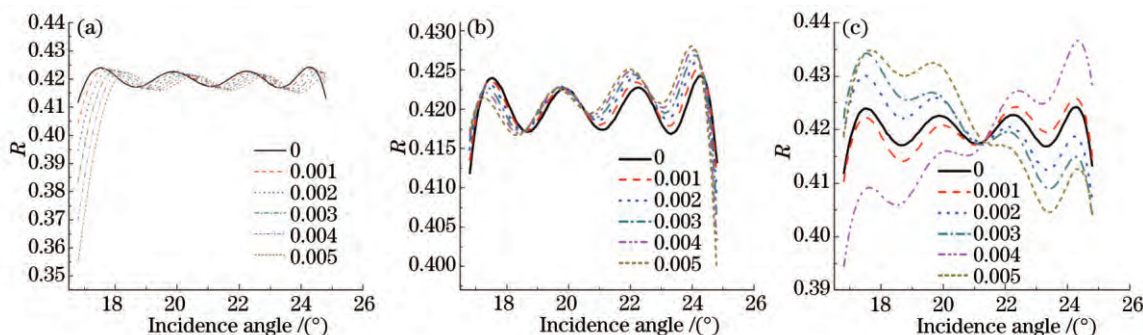


图 3 LM 算法设计的 M4 宽带膜系容差分析。(a) 膜层厚度系统性误差; (b) Γ 值系统性误差; (c) 膜层厚度随机性误差

Fig.3 Tolerance analysis of M4 broadband multilayer stacks based on LM algorithm. (a) Systematic error of layer thickness; (b) systematic error of Γ ; (c) random error of layer thickness

1000组在±0.1%内变化的随机数序列,计算出相应的1000条引入膜层厚度随机误差的宽带膜系反射谱,并选取其中相对于原反射谱变化最大的一条。从图3(c)可以看出,只要各膜层厚度的相对变化不超过±0.3%,则宽带膜系的反射谱变化不超过±1%,Nessy镀膜机的功率稳定性优于±0.1%,满足限制条件。

4 宽带 Mo/Si 多层膜的制备与测试分析

制备宽带多层膜之前,将膜系中单个膜层的厚度转化为对应的公转速度。首先,比较同一公转速度序列下分别采用周期厚度定标(1)式和(4)式得到的膜系各周期厚度序列(图4),其中,stack1和stack2分别为采用(1)式和(4)式得到的膜系各周期厚度序列,后者相对于前者相差约1%(相对值)。由容差分析可知,如此大的偏差是不允许的,因此,不能直接用(2)式和(3)式将膜系中单个膜层的厚度转化为对应的公转速度。

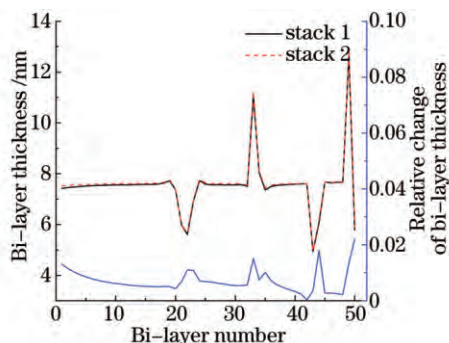


图4 同一公转速度序列下由(1)式和(4)式得到的周期厚度序列比较

Fig.4 Comparison of period thickness series obtained by equations (1) and (4) under the same velocity series

首先根据(3)式得到各层 Si 对应的公转速度为

$$v_{Si} = k_2 / (d_{Si} - \Delta_2) = 5.916 / (d_{Si} + 0.868). \quad (6)$$

由于与宽带多层膜反射谱最相关的是各个周期厚度的梯度分布,为使宽带膜各周期厚度尽可能与设计值相符合,各层 Mo 对应的公转速度并不由(2)式直接得到,而是由 $d_{Mo} = d - d_{Si} = (5.635/v_{Si} + 2.819/v_{Mo} - 0.483) - d_{Si}$ 得到,即

$$v_{Mo} = 2.819 / (d_{Mo} + d_{Si} - 5.635/v_{Si} + 0.483), \quad (7)$$

由(6)式和(7)式得到的公转速度 v_{Mo} 和 v_{Si} 满足周期厚度定标(1)式,因而由其得到的各周期厚度梯度分布是准确的。

按照 M4 宽带膜系设计和(6)、(7)式膜厚-公转速度转换关系制备的 M4 宽带膜的反射率测量结果如图 5 所示。M4 宽带膜膜系设计目标是在 $16.8^\circ \sim 24.8^\circ$ 范围内 $42\% \pm 1\%$,实验结果为在 $16.8^\circ \sim 24.8^\circ$ 范围内 $41.2\% \sim 43.0\%$,实验结果与设计结果吻合得很好。为进一步分析实验结果与设计结果之间的细微偏差,对所制备的宽带膜进行了误差反演分析。根据前文的设计容差分析结果,先假定制备误差的最大来源是 Mo/Si 多层膜 Γ 值及界面粗糙度在标定过程中的系统误差。因此,在误差反演分析过程中,周期厚度定标(1)式的三个定标参数固定不变,将 Si 层厚度-公转速度转换(6)式中的定标参数 k_2 和 Δ_2 以及多层膜界面粗糙度 σ_1 和 σ_2 共 4 个参数作为误差反演参数,对宽带膜实测反射谱进行拟合,拟合结果如图 6(a)所示,所对应的拟合参数分别为 $k_2 = 5.650, \Delta_2 = -0.783, \sigma_1 = 0.902, \sigma_2 = 0.106$,由 k_2 和 Δ_2 计算得到的宽带膜系厚度序列与设计值的比较结果如图 6(b)所示。从图 6(a)可以看出拟合结果与实测反射谱吻合得非常好,在一定程度上证实了“制备误差最大来源是 Mo/Si 多层膜 Γ 值及界面粗糙度标定的系统误差”这一推断。在前文中,为减小上述系统误差,选取掠入射 X 射线反射率谱全反区及第一个布拉格衍射峰的角度区域来拟合 Mo/Si 多层膜的结构参数。但是,由于掠入射 X 射线反射谱的评估波长与极紫外反射谱的评估波长差别较大,因此两者之间不可避免地存在系统偏差。同时,在宽带膜系设计过程中用到的结构参数由规整膜系得到,这也与实际制备得到的宽带膜的内部结构存在一定的偏差。上述两方面因素共同造成了宽带膜 Γ 值及界面粗糙度的系统误差。

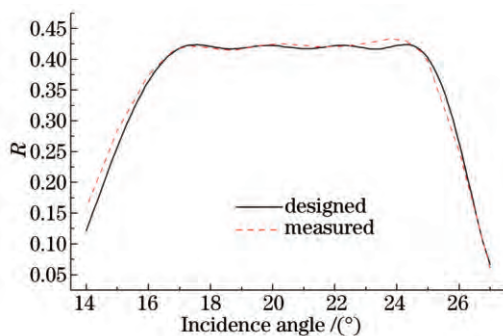


图5 M4宽带膜实测反射谱与设计反射谱的比较

Fig.5 Comparison between measured and designed reflectance spectrum of M4 broadband multilayer films

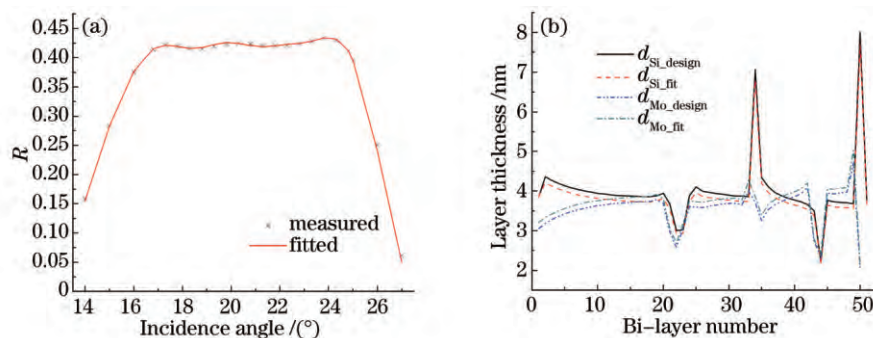


图6 (a) M4宽带膜实测反射谱拟合结果; (b) 由拟合参数计算得到的M4宽带膜系厚度序列与设计值的比较

Fig.6 (a) Fitting results of measured reflectance spectrum of M4 broadband multilayer films; (b) comparison between the M4 broadband multilayer stacks calculated by fitting parameters and the designed stacks

5 结 论

针对极紫外光刻照明系统小尺寸反射镜大入射角带宽的需求,通过标定Si层有效厚度与公转速度的关系式和多层膜周期厚度与公转速度的关系式,完成了宽带膜设计膜系的制备工作。制备了一系列不同周期厚度和 Γ 值的Mo/Si多层膜规整膜系,并通过拟合这些规整膜系 $0.2^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 角度范围内的掠入射X射线反射谱完成了多层膜结构参数的反演,进而得到了多层膜周期厚度、Mo层有效厚度和Si层有效厚度与公转速度的关系式以及多层膜界面粗糙度。采用LM算法完成了宽带Mo/Si多层膜设计,反射率设计结果为在 $16.8^{\circ}\sim 24.8^{\circ}$ 范围内 $R=42\%\pm 1\%$,膜系设计容差分析结果表明制备误差在设计容差之内。同时采用Si层有效厚度与公转速度的关系式和多层膜周期厚度与公转速度的关系式得到对应于设计膜系的公转速度序列,按此公转速度序列将所设计的膜系在磁控溅射镀膜机上进行制备,并对其极紫外反射谱进行测量,实验结果为在 $16.8^{\circ}\sim 24.8^{\circ}$ 范围内 $R=41.2\%\sim 43.0\%$,实验结果与设计结果吻合得很好,进一步的制备误差反演分析表明,实验结果与设计结果之间的细微偏差主要由Mo/Si多层膜 Γ 值及界面粗糙度标定过程中的系统误差造成。

参 考 文 献

- 1 Heavens O S, Liddell H M. Staggered broad-band reflecting multilayers[J]. Appl Opt, 1966, 5(3): 372-375.
- 2 Joensen K D, Hoghoj P, Christensen F, et al.. Multilayered supermirror structures for hard X-ray synchrotron and astrophysics instrumentation[C]. SPIE, 1994, 2011: 360-372.
- 3 Tawara Y, Yamashita K, Kunieda H, et al.. Multilayer supermirror coating for hard X-ray telescope[C]. SPIE, 1996, 2805: 236-243.
- 4 Protopopov V V, Kalnov V A. X-ray multilayer mirrors with an extended angular range[J]. Opt Commun, 1998, 158(s1-6): 127-140.
- 5 Wang Z S, Michette A G. Broadband multilayer mirrors for optimum use of a soft X-ray source output[J]. J Opt A Pure Appl Opt, 2000, 2(5): 452-457.
- 6 Aquila A L, Salmassi F, Dollar F, et al.. Developments in realistic design for aperiodic Mo/Si multilayer mirrors[J]. Opt Express, 2006, 14(21): 10073-10078.

- 7 Kuhlmann T, Yulin S, Feigl T, *et al.*. Design and fabrication of broadband EUV multilayer mirrors[C]. SPIE, 2002, 4688: 509–515.
 - 8 Yakshin A E, Kozhevnikov I V, Zoethout E, *et al.*. Properties of broadband depth-graded multilayer mirrors for EUV optical systems[J]. Opt Express, 2010, 18(7): 6957–6971.
 - 9 Nevot L, Croce P. Characterization for surfaces by grazing X-ray reflection: application to the study of polishing of some silicate glasses [J]. Rev Phys Appl, 1980, 15(3): 761–779.
 - 10 Yakshin A E, Louis E, Görts P C, *et al.*. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry [J]. Physica B, 2000, 283(1–3): 143–148.
 - 11 Yu B, Jin C S, Yao S, *et al.*. Control of lateral thickness gradients of Mo - Si multilayer on curved substrates using genetic algorithm[J]. Opt Lett, 2015, 40(17): 3958–3961.
 - 12 Blaschke H, Balasa I, Lothar K, *et al.*. Optics characterization with compact EUV spectrophotometer[C]. SPIE, 2008, 6922: 692228.
 - 13 Zhang Lichao. Calibration of deposition rates of multilayer coatings by sputtering depositors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2530–2536.
- 张立超. 溅射法制备多层膜沉积速率的标定[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12): 2530–2536.

栏目编辑: 韩 峰