

文章编号 1004-924X(2010)12-2530-07

溅射法制备多层膜沉积速率的标定

张立超

(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)

摘要:为消除溅射沉积多层膜过程中产生的膜厚随机误差,实现多层膜膜厚的精确控制,提出了一种精确标定薄膜沉积速率的方法。该方法通过对多次实验结果进行最小二乘拟合得到薄膜沉积速率。对随机误差基本特性的分析表明,随着实验次数的增加,沉积速率将逐渐逼近真值。基于这一原理,可以对薄膜的沉积速率进行精确标定,同时提取出膜厚随机误差,进而确定镀膜机的膜厚控制精度,获得精确控制多层膜膜厚所需要的完整信息。选用两种精度不同的沉积设备,采用提出的方法对所制备的多层膜进行了测试。结果表明,多层膜的膜厚控制精度随沉积设备而异:其中低成本的普通镀膜机只能实现 0.1 nm 的膜厚控制精度;而另一台性能较高的镀膜机的膜厚控制精度优于 0.01 nm。

关键词:多层膜;溅射法;沉积速率;随机误差;控制精度

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2530

Calibration of deposition rates of multilayer coatings by sputtering depositions

ZHANG Li-chao

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A calibration method for deposition rates of multilayer coatings by sputtering depositions was proposed to eliminate the random thickness errors and to realize the accurate control of film thicknesses. In this method, the deposition rates were acquired by the least square fitting for results of different deposition experiments. An analysis on the basic properties of random variables shows that deposition rates can be converged to the true values in a case that the number of depositions is large enough. On the basis of above principle, accurate deposition rates can be acquired, random thickness errors can be extracted, and the thickness control accuracy of the coating machine can be determined as well. Furthermore, the complete information to realize the accurate control of film thicknesses can be also obtained. Experiments based on this calibration method were carried out by using two deposition systems. Results indicate that control accuracies are different for different deposition systems. The low cost deposition system shows a relative low thickness control accuracy in 0.1 nm, and the other one with high deposition performance could realize the thickness control accuracy in 0.01 nm.

Key words: multilayer coating; sputtering deposition; deposition rate; radom error; control accuracy

收稿日期:2010-04-06;修订日期:2010-10-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60678034);国家科技重大专项资助项目

1 引 言

自上世纪 80 年代起,多层膜的应用范围不断得到扩展,应用技术水平也逐步提高,尤其在极紫外与 X 射线波段,基于多层膜的反射式光学元件起着举足轻重的作用^[1]。多层膜由两种或两种以上的材料交替沉积而成,其膜厚在纳米量级,利用来自各界面反射光的干涉实现所需要的光谱响应曲线^[2]。目前,多层膜的制备面临两个重要问题,(1)在某些较为成熟的应用中,多层膜必须满足严苛的技术指标,比如在极紫外投影光刻系统中,为保证光学元件的反射率峰值与指标匹配,实际制备的多层膜周期厚度与其设计值之间的误差不能超过 0.025 nm^[3]; (2)在某些应用中,多层膜需要采取灵活的膜系设计,以实现宽带多层膜^[4-5]、超反射镜^[6]、偏振光学元件^[7]等非周期膜系结构,满足特定的应用需要。对多层膜来说,在制备过程中产生的膜厚误差将使其实际光学性能与设计结果出现偏差^[8],这种现象对于非周期型多层膜尤为明显。因此,发展高精度的膜厚控制方法,是使多层膜能够更好地满足实际应用需要的前提条件。

多层膜的制备通常采用磁控溅射或离子束溅射方法实现。从理论上来说,当电流、电压等沉积条件固定时,沉积速率不随时间变化,因此在准确地确定沉积速率后,可以通过设定沉积时间实现膜厚的精确控制。然而,在实际的制备过程中,由于各种随机因素的影响,多层膜的膜厚会存在随机误差,而且,这些随机误差的大小因镀膜机的控制精度高低而异。因此,发展合适的沉积速率标定方法,以实现膜厚随机误差的提取,进而确定镀膜机的膜厚控制精度,是实现多层膜膜厚高精度控制的前提条件。

本文提出了一种精确标定薄膜沉积速率的方

法。该方法通过对多次实验结果进行最小二乘拟合得到薄膜沉积速率,通过增加实验次数使沉积速率逐渐逼近真值,从而实现对沉积速率的精确标定。另外,通过提取膜厚随机误差,可进一步确定镀膜机的控制精度。选用两种不同精度的沉积设备对多层膜进行了测试,给出了测试结果并进行了标定精度分析。

2 多层膜周期厚度随机误差的提取

在溅射沉积过程中,对于固定的沉积条件(电流、电压等),薄膜的沉积速率具有恒定值。这样,通过设置材料的沉积时间就能实现膜厚的精确控制。此时,多层膜的周期厚度表示为

$$t^A \times v^A + t^B \times v^B + \Lambda = d, \quad (1)$$

其中 v^A 和 v^B 分别为 A 与 B 两种材料的沉积速率; t^A 和 t^B 分别为两种材料的沉积时间; d 为多层膜的周期厚度; Λ 为常量,由两部分构成,一部分为膜层间扩散引起的周期厚度变化^[9],另一部分为沉积设备具体设置引起的周期厚度变化(比如基片在移入或移出溅射区域的时间内增加的膜厚)^[10]。

多层膜的周期厚度 d 由 3 项构成,即

$$d = d^A + d^B + \Lambda, \quad (2)$$

式(2)右边的 3 项分别对应式(1)左边的 3 项。在实际测试过程中,只能测出周期厚度值 d ,因此,对多层膜沉积速率进行标定的过程,就是对测试得到的周期厚度进行处理,从而得到沉积速率的过程。

在实际的多层膜制备过程中,由于各种随机因素的影响,每一次沉积时,膜厚都会出现随机误差。在这种情况下,式(1)将扩展为:

$$t^A \times (v^A + \delta v^A) + t^B \times (v^B + \delta v^B) + (\Lambda + \delta \Lambda) = d + \delta d, \quad (3)$$

当进行多次实验时,其矩阵形式如下:

$$\begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (v^A + \delta v_1^A) & (v^A + \delta v_2^A) & \dots & (v^A + \delta v_n^A) \\ (v^B + \delta v_1^B) & (v^B + \delta v_2^B) & \dots & (v^B + \delta v_n^B) \\ (\Lambda + \delta \Lambda_1) & (\Lambda + \delta \Lambda_2) & \dots & (\Lambda + \delta \Lambda_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (d_1^A + \delta d_1^A) + (d_1^B + \delta d_1^B) + (\Lambda + \delta \Lambda_1) \\ (d_2^A + \delta d_2^A) + (d_2^B + \delta d_2^B) + (\Lambda + \delta \Lambda_2) \\ \dots \\ (d_n^A + \delta d_n^A) + (d_n^B + \delta d_n^B) + (\Lambda + \delta \Lambda_n) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 v^A, v^B 与 Δ 分别为材料 A, B 的沉积速率与常量的期望值:

$$\begin{aligned} v^A &= \sum_{i=1}^{\infty} v_i^A; \\ v^B &= \sum_{i=1}^{\infty} v_i^B; \Delta = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta^i, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^A \\ v^B \\ \Delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v^A \\ \Delta v^B \\ \Delta \Delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta v_1^A & \delta v_2^A & \dots & \delta \Delta_n^A \\ \delta v_1^B & \delta v_2^B & \dots & \delta \Delta_n^B \\ \delta v_1 & \delta v_2 & \dots & \delta \Delta_n \end{pmatrix}, \quad (6)$$

上式左右两边第一项相等,去掉后变为:

$$\begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v^A \\ \Delta v^B \\ \Delta \Delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1^A & t_1^B & 1 \\ t_2^A & t_2^B & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ t_n^A & t_n^B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta v_1^A & \delta v_2^A & \dots & \delta \Delta_n^A \\ \delta v_1^B & \delta v_2^B & \dots & \delta \Delta_n^B \\ \delta v_1 & \delta v_2 & \dots & \delta \Delta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta d_1^A & \delta d_2^A & \dots & \delta \Delta_n^A \\ \delta d_1^B & \delta d_2^B & \dots & \delta \Delta_n^B \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta d_n^A & \delta d_n^B & \dots & \delta \Delta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta d_1 \\ \delta d_2 \\ \dots \\ \delta d_n \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其平均残差:

$$\begin{aligned} [v^2]/n &= \left\{ \sum_{i=1}^n (\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) - \delta d_i \right\}^2 / n = \sum_{i=1}^n \{ [(\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta)^2 - \\ & 2 \times (\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times \delta d_i + (\delta d_i)^2] \} / n, \end{aligned} \quad (8)$$

上式分为 3 项。当 n 趋近于 ∞ 时,这 3 项分别为:

$$\{[v^2]/n\}_1 = \left[\sum_{i=1}^{\infty} (\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta)^2 \right] / n, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \{[v^2]/n\}_2 &= \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} [2 \times (\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times \delta d_i] \right\} / n = 2 \times E[(\Delta v^A \times t_i^A + \\ & \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times \delta d_i], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\{[v^2]/n\}_3 = \sum_{i=1}^n [(\delta d_i)^2] / n = D(d_i), \quad (11)$$

沉积时间与沉积速率误差是相互独立的变量,因此式(10)变为:

$$\begin{aligned} \{[v^2]/n\}_2 &= 2 \times E[(\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times \delta d_i] = 2 \times E[(\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times E(\delta d_i)] = \\ & 2 \times E[(\Delta v^A \times t_i^A + \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times E[t_i^A \times \delta v_1^A + t_i^B \times \delta v_1^B + \delta \Delta_1]] = 2 \times E[(\Delta v^A \times t_i^A + \\ & \Delta v^B \times t_i^B + \Delta \Delta) \times \{ [E(t_i^A) \times E(\delta v_1^A) + E(t_i^B) \times E(\delta v_1^B) + E(\delta \Delta_1)] \}]. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(5)可知, $E(\delta v_1^A) = 0$, $E(\delta v_1^B) = 0$, $E(\delta \Delta_1) = 0$, 因此,式(12)为 0, 而式(11)为定值。因此,按照最小二乘原则,式(8)应取最小值,这等价于式(9)取得最小值。式(9)中所有项均为平方项,当且仅当 $\Delta v^A = \Delta v^B = \Delta \Delta = 0$ 时,该式能取得最小值即 0。

上述分析表明:对于固定沉积条件,每次改变沉积时间的多层膜沉积系列实验来说,在实验次数增大的过程中,采用最小二乘法得到的平均残差将逐步逼近多层膜周期厚度随机误差的方差;

为求出沉积速率,对式(4)进行最小二乘拟合。设沉积速率拟合结果为 $(v^A)' = v^A + \Delta v^A$, $(v^B)' = v^B + \Delta v^B$, $\Delta' = \Delta + \Delta \Delta$, 其中 Δv^A , Δv^B 和 $\Delta \Delta$ 是对随机误差项的最小二乘拟合结果。式(4)的最小二乘拟合关系为:

同时,对于拟合得到的沉积速率来说,与真值的误差也逐渐缩小,将逐渐逼近真值。利用这一规律,可以精确地获得薄膜的沉积速率。

3 实验结果

按照第 2 节中确定的方法进行了多层膜沉积实验,采用 X 射线衍射方法测量多层膜周期厚度^[2]。测试采用 PANalytical X'pert-Pro-MRD

衍射仪进行,通过对样品在 Z 方向上的高度、 ω 轴与 χ 轴方位角进行精确校正^[11],以降低各级次衍射峰的角度测量误差。多次测量结果表明,多层膜周期厚度测试的重复精度优于 0.01 nm。

多层膜沉积实验采用一台 FJL600 型磁控溅射镀膜机与一台 Oxford-Ionfab600 型离子束溅射镀膜机进行。

3.1 磁控溅射方法沉积多层膜的实验结果

采用 Mo/Si 和 W/B₄C 组合,分别进行了系列沉积实验。各次实验的沉积时间设定见表 1:

表 1 磁控溅射多层膜的沉积时间与周期厚度

Tab. 1 Deposition time and period thickness in series tests performed by magnetron sputtering

实验序号	(t_{Mo}/t_W) /s	(t_{Si}/t_{B_4C}) /s	$(d_{Mo/Si})$ /nm	(d_{W/B_4C}) /nm
1	30	30	6.80	8.14
2	40	30	8.48	10.04
3	30	40	7.39	8.44
4	30	50	7.84	8.8
5	$30(t_{Mo})/40(t_W)$	60	8.25	11.19
6	40	60	9.95	11.11
7	17	110	8.56	8.54
8	19	90	7.88	8.21
9	40	40	8.98	10.41

(注:除在第五次沉积实验中 Mo 与 W 的沉积时间不同外,两次系列实验中其它的沉积时间均相同)

采用最小二乘法计算的两种组合的沉积速率见表 2 与表 3:

表 2 磁控溅射 Mo/Si 多层膜沉积速率计算结果

Tab. 2 Calculated deposition rates in Mo/Si series tests performed by magnetron sputtering

使用数据	$v_{Mo}/(nm \cdot s^{-1})$	$v_{Si}/(nm \cdot s^{-1})$	Δ/nm
1~3 次	0.168 0	0.059 0	-0.010 0
1~4 次	0.165 7	0.052 0	0.293 3
1~5 次	0.163 0	0.048 0	0.520 0
1~6 次	0.164 5	0.048 5	0.453 7
1~7 次	0.164 9	0.048 3	0.450 3
1~8 次	0.165 7	0.048 2	0.424 5
1~9 次	0.165 7	0.048 2	0.424 2

表 3 磁控溅射 W/B₄C 多层膜沉积速率计算结果

Tab. 3 Calculated deposition rates in Mo/Si series tests performed by magnetron sputtering

使用数据	$v_W/(nm \cdot s^{-1})$	$v_{B_4C}/(nm \cdot s^{-1})$	Δ/nm
1~3 次	0.190 0	0.030 0	1.540 0
1~4 次	0.191 0	0.033 0	1.410 0
1~5 次	0.197 2	0.036 7	1.077 7
1~6 次	0.196 0	0.036 0	1.140 0
1~7 次	0.194 0	0.036 9	1.170 1
1~8 次	0.193 5	0.037 0	1.184 9
1~9 次	0.193 6	0.037 0	1.183 3

3.2 离子束溅射方法沉积多层膜的实验结果

采用 Mo/Si 进行了系列沉积实验。各次实验的时间设定见表 4:

表 4 离子束溅射 Mo/Si 多层膜的沉积时间与周期厚度检测结果

Tab. 4 Deposition time and period thickness in Mo/Si series tests performed by ion beam sputtering

实验序号	t_{Mo}/s	t_{Si}/s	d/nm
1	120	120	12.78
2	180	180	19.61
3	210	150	18.41
4	126	87	10.46
5	150	200	20.04

采用最小二乘法计算的沉积速率见表 5:

表 5 离子束溅射 Mo/Si 多层膜实验的沉积速率计算结果

Tab. 5 Calculated deposition rates in Mo/Si series tests performed by ion beam sputtering

使用数据	$v_{Mo}/(nm \cdot s^{-1})$	$v_{Si}/(nm \cdot s^{-1})$	Δ/nm
1~3 次	0.036 92	0.076 92	-0.880 0
1~4 次	0.036 91	0.076 95	-0.884 8
1~5 次	0.036 93	0.076 93	-0.884 5

4 讨论

由第 2 节中的分析可知:在实验次数不断增大的情况下,对式(4)进行最小二乘拟合,得到的沉积速率将逐渐逼近真值,表 2、表 3 和表 5 中的数据充分说明了这一点。

在沉积速率不断逼近真值的过程中,拟合所

得到的平均残差也将趋近于多层膜周期厚度的方差,这可以作为判断沉积速率对真值逼近程度的依据。采用这一判据,对表 2 与表 3 中的数据进行考察,结果见表 6:

表 6 各次系列实验中多层膜周期厚度随机误差的标准差

Tab. 6 Standard deviations of random period thickness errors for multilayer coatings in series experiments

使用数据	磁控 Mo/Si 实验	磁控 W/B ₁ C 实验	离子束 Mo/Si 实验
1~4 次	0.028 6	0.012 2	0.000 8
1~5 次	0.041 5	0.030 1	0.001 0
1~6 次	0.038 4	0.032 1	—
1~7 次	0.035 7	0.032 0	—
1~8 次	0.035 9	0.031 1	—
1~9 次	0.033 9	0.029 4	—

表 6 显示了在实验次数增大的情况下,多层膜周期厚度标准差的变化情况。对于磁控溅射沉积实验来说,两种材料组合在进行 5~6 次实验后,得到的标准差数值都较稳定,不随实验次数的进一步增加而产生较大改变。此时,沉积速率的拟合结果开始向真值逐步逼近。Mo/Si 和 W/B₁C 组合各自的 9 次实验很好地展示了这一逼近过程,具体见表 2 与表 3 数据。

另一方面,沉积速率向真值逐渐逼近的过程,也是随机误差逐渐显现的过程。

图 1 与图 2 显示了随机误差逐渐向真值逼近的过程。两组图各自对应 Mo/Si 和 W/B₁C 的系列实验,其中每一个小图为系列实验中的一次实验,其横轴代表计算随机误差时采用表 2 或表 3 中哪一组沉积速率数据,纵轴为利用这些沉积速率,采用公式:

$$\delta d_i = (v_{fit}^A \times t_i^A + v_{fit}^B \times t_i^B + \Delta \Delta_{fit}) - d_{measured}, \quad (13)$$

计算得到的随机误差。从图中可见,随着沉积速率拟合所采用的实验次数增加,利用式(13)计算出的多层膜周期厚度随机误差趋于收敛。

基于上述实验可以进一步确定沉积设备的控

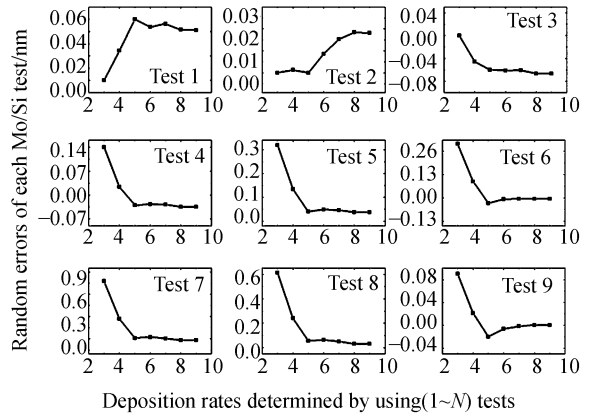


图 1 Mo/Si 系列实验中随机误差向真值逼近的过程
Fig. 1 Approaching process of random errors to their true values in Mo/Si series tests

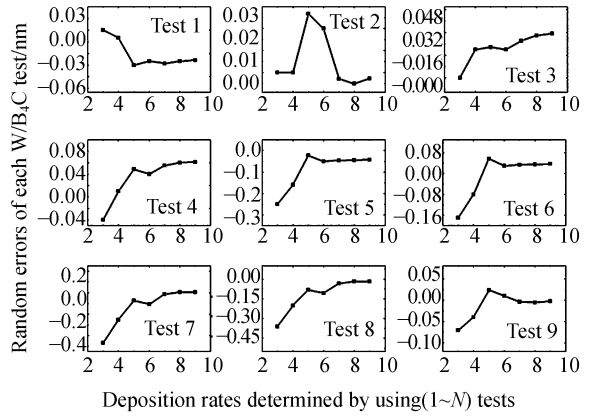


图 2 W/B₁C 系列实验中随机误差向真值逼近的过程
Fig. 2 Approaching process of random errors to their true values in W/B₁C series tests

制精度。对于具体的设备,其控制误差即为膜厚随机误差。对本实验中所采用的磁控溅射镀膜机来说,Mo/Si 多层膜与 W/B₁C 多层膜具有近似相同的随机误差标准差 $\sigma(\delta)$, 约为 0.03~0.04 nm(见表 6)。如果按照 3σ 的标准衡量,该设备的膜厚控制精度为 0.1 nm。

采用离子束溅射镀膜机进行的 Mo/Si 多层膜系列实验具有相同的规律。从具体结果来看,其随机误差非常小。无论采用表 5 中哪一列沉积速率结果,采用式(13)计算得到的各次实验的随机误差绝对值都小于 0.002 nm;多层膜周期厚度随机误差的标准差 $\sigma(\delta)$ 也均小于 0.001 nm(见表

6),表明采用该设备实现 0.01 nm 的膜厚控制精度应当无问题。

最后,有一点需要特殊说明。从本质上来说,磁控溅射与离子束溅射方法都能够保证稳定的沉积速率。就膜厚控制精度来说,两种方法本身并没有优劣之分。对不同镀膜设备而言,其具体的设计、部件的性能等因素共同决定其膜厚控制精度。本文中所采用的两台设备,其中的磁控溅射镀膜机是一台低成本普通镀膜机,其各方面性能远不如高性能的 Oxford-Ionfab600 离子束溅射镀膜机。采用这两台镀膜机的出发点,是为了利用膜厚控制精度不同的两个设备来验证本文所采用的方法。虽然结果显示 Oxford-Ionfab600 镀膜机具有更高的膜厚控制精度,但这只是两个特殊镀膜机个体之间的差异,并不能由此推出在膜厚控制方面离子束溅射方法优于磁控溅射方法。

5 结 论

本文针对多层膜制备中存在的膜厚随机误差问题,用最小二乘拟合沉积速率的方法进行了研究。在拟合所采用的实验次数不断增大的过程中,采用最小二乘法得到的平均残差将逐步逼近多层膜周期厚度随机误差的方差,同时拟合得到的沉积速率也将逐渐逼近真值;另一方面,沉积速率向真值逐渐逼近的过程,也是随机误差逐渐向真值逼近的过程;由此可以进一步确定沉积设备的膜厚控制精度。

根据以上原理,对溅射法制备的多层膜进行了测试。测试结果表明:采用溅射法制备多层膜,其膜厚控制精度主要由具体沉积设备本身的性能所决定,并不取决于所采用溅射方法的种类。

参考文献:

- [1] ATTWOOD D. 软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用. [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- ATTWOOD D T. *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [2] SPILLER E. *Soft X-Ray Optics* [M]. Bellingham: SPIE Press, 1994.
- [3] SPILLER E. High performance multilayer coatings for EUV lithography. [J]. *SPIE*, 2004, 5193: 89-97.
- [4] ZHANG L C, LIN H, JIN C S, *et al.*. Broadband multilayer-coated normal incidence blazed grating with ~10% diffraction efficiency through the 13~16nm wavelength region[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(6): 818-820.
- [5] 柯常军, 王占山, 郑咏梅, 等. 宽带平坦型软 X 射线多层反射膜的设计[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(3): 19-22.
- KE C J, WANG Z S, ZHENG Y M, *et al.*. The Design of Soft X-ray Broadband and Flat Multilayer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(3): 19-22. (in Chinese)
- [6] 张众, 王占山, 王凤丽, 等. X 射线超反射镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 49-54.
- ZHANG Z, WANG Z S, WANG F L, *et al.*. Design of X-ray supermirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 49-54. (in Chinese)
- [7] 朱京涛, 王占山, 王洪昌, 等. 极紫外宽带 Mo/Si 非周期多层膜偏振光学元件[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12): 1886-1893.
- ZHU J T, WANG Z S, WANG H C, *et al.*. Broadband aperiodic Mo/Si multilayer polarization elements for EUV region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1886-1893.
- [8] 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.
- WANG Z S. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 136-138. (in Chinese)
- [9] ROSEN R S, STEARNS D G, VILIARDOS M A, *et al.*. Silicide layer growth rates in Mo/Si multilayers. [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(34): 6975-6980.

- [10] WANG F L, WANG Z S, ZHU J T, *et al.*. Determination of the deposition rate of DC magnetron sputtering in fabrication of X-ray suppermirrors Chin[J]. *Opt. Lett.*, 2006,4(9):550-552.
- [11] 朱洪力,金春水,张立超. X 射线衍射仪装调误差

分析[J]. 分析仪器,2008(1):14-18.

ZHU H L, JIN C S, ZHANG L C. Analysis and correction of sample fixing and adjustment errors in X-ray diffractometer [J]. *Analytical Instrumentation* 2008(1):14-18. (in Chinese)

作者简介:



张立超(1979—),男,吉林人,博士,副研究员,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波光膜技术的研究。

●下期预告

弹性球状小磨头加工 Wolter I 型 掠入射反射镜的去函数

王永刚^{1,2}, 崔天刚^{1,2}, 马文生¹, 陈 斌¹, 陈 波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

研究了弹性球状小磨头加工 Wolter I 型反射镜的去函数。根据 Preston 方程、hertz 接触理论和掠入射反射镜特殊的柱面结构,推导出基于旋偏动模式的磨头去函数理论模型。实验结果表明,理论去函数曲线与实验曲线的均方根距离偏差 σ 为 $0.101\ 22\ \mu\text{m}$,偏差比例 κ 为 9.8% 。另外,分析验证了不同旋偏角对去函数的影响,随着旋偏角的增大最大去除值位置逐渐向 Y 轴正方向偏移。不同的旋偏角,最大理论去除深度与最大实际去除深度的均方根偏差为 $0.201\ \mu\text{m}$;最大理论去除位置与最大实际去除位置的均方根偏差为 $0.255\ \text{mm}$ 。旋偏角越大,材料去除量就越多,去函数也越显对称。实验结果很好地验证了去函数理论模型的准确性。该模型对加工 Wolter I 型掠入射反射镜去函数的工艺过程具有很好的预测性,便于实现确定性材料去除。