

文章编号: 0253-2239(2007)08-1529-7

K9 和石英玻璃基片上 Au 膜真空紫外反射特性研究

干蜀毅^{1,2} 徐向东¹ 洪义麟¹ 刘颖¹ 付绍军¹

(¹ 中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)
(² 合肥工业大学机械与汽车工程系, 合肥 230009)

摘要: 采用离子束溅射法, 分别在经过不同前期清洗方法处理过的 K9 及石英玻璃光学基片上, 选择不同的镀膜参量, 镀制了多种厚度的 Au 膜。对镀制的 Au 膜在真空紫外波段较宽波长范围内的反射率进行了连续测量。测试结果表明: 辅助离子源的使用方式、Au 膜厚度对反射镜的反射率有重大影响。基片材料、镀前基片表面清洗工艺等对反射率也有一定影响。采用镀前离子轰击, 可显著提高 Au 膜反射率及膜与基底的粘合力; 获得最高反射率时的最佳膜厚与基片材料、镀膜工艺密切相关。对经过离子清洗的石英基片, 膜厚在 30 nm 左右反射率最高; 比较而言, 石英基片可获得更高的反射率; 辅助离子源的使用还显著影响获得最高反射率时对应的最佳膜厚值, 且对 K9 基片的影响更显著。

关键词: 薄膜光学; 真空紫外反射镜; 离子束溅射; 真空紫外反射膜; Au 膜; K9 玻璃基片; 石英玻璃基片
中图分类号: TB133 文献标识码: A

Reflectivity of Au Film on K9 and Quartz Substrate in Vacuum Ultraviolet

Gan Shuyi^{1,2} Xu Xiangdong¹ Hong Yilin¹ Liu Ying¹ Fu Shaojun¹

(¹ National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)
(² Department of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Au films of various thicknesses are fabricated by ion-beam sputtering with different coating parameters on quartz and K9 substrate which are processed with different cleaning procedures. Their reflectivity is measured continuously in a broad vacuum ultraviolet range. It is indicated that the auxiliary ion-beam source and the film thickness impact significantly on the reflectivity. Substrate material and cleaning procedure also affect reflectivity of Au film to some extent. Ion-beam bombardment of substrate before deposition can significantly enhance the reflectivity and adhesion of films. The optimal film thickness for the highest reflectivity connects closely with substrate material and coating techniques. For quartz substrate processed by ion bombardment pre-deposition, the optimal film thickness is about 30 nm, and the reflectivity of quartz is higher than K9. The use of auxiliary ion beam source influences the optimal film thickness for the highest reflectivity, and the influence is larger for K9 substrate.

Key words: film optics; vacuum ultraviolet mirror; ion beam sputtering; vacuum ultraviolet reflecting film; Au film; K9 substrate; quartz substrate

1 引言

在真空紫外波段物质表现出强烈的吸收特性, 可用作反射镜的薄膜材料比可见区和近红外区少得多。迄今为止, 还没有一种反射膜在所讨论的波长范围内都能获得很高的反射率^[1~20]。目前, 真空紫外反射镜的制作主要有两种方法, 一是采用复合膜

或介质膜, Al+MgF₂、SiC、B₄C 膜均属于此类; 另一种方法则是用全金属薄膜作为真空紫外反射膜, 优点是薄膜制作相对简单, 通过对镀膜过程相关参量的选择, 可在一定程度上控制膜的厚度、组织结构、光学常数, 使其在较宽的波长范围内获得较高的反射率。适合做金属单层反射膜的材料主要是贵金属

作者简介: 干蜀毅(1963—), 男, 安徽人, 副教授, 博士研究生, 主要从事光学薄膜技术及设备方面的研究。

E-mail: gansy@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 付绍军(1952—), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 主要从事短波光学, 二元光学衍射光学, 微细加工技术方面的研究。E-mail: sjfu@ustc.edu.cn

收稿日期: 2006-11-09; 收到修改稿日期: 2007-02-01

和难熔金属,如 W、Mo、Re、Ru、Rh、Os、Pt、Ir、Au 等。其中以 Au 膜最常见,Ir 膜综合特性最好。鉴于 Au 化学性质稳定,熔点相对较低,本文以 Au 为膜材,分别以不同的工艺参量,在 K9 和石英玻璃基片上镀制了不同厚度的 Au 膜。系统研究了其在真空紫外波段的反射特性与各种工艺参量、基片材料、膜厚间关系。在此基础上找出最佳真空紫外 Au 反射镜制作工艺。

2 理论计算

单层金属膜反射率的计算比介质膜要复杂的多。介质膜中,由于吸收很小,消光系数 k 通常忽略不计;而金属膜的 k 值很大,不能忽略。因此与介质膜相比,金属膜的折射率从实数变为复数,不仅严重地影响波在分层介质中光学特性的量值,也使金属中波的性质发生了本质上的变化。图1给出了单层金属反

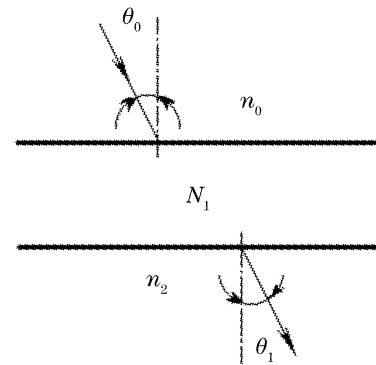


图1 单层金属反射膜的计算模型

射膜的理论计算模型。平面电磁波以入射角 θ_0 从折射率为 n_0 的介质入射到复折射率为 $N_1 = n_1 - jk_1$ 、厚度为 d_1 的金属膜上,薄膜基底折射率 n_2 。由折射定律: $n_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$ 。因 N_1 是复数, θ_1 必须是复角,这样 $\sin \theta_1$ 也是一个复数。经过推导,得到单层膜的反射率 R 的解析表达式为^[21,22]

$$R = \frac{|r_1|^2 \exp(2\beta K) + |r_2|^2 \exp(-2\beta K) + 2|r_1||r_2| \cos(\varphi_{1r} - \varphi_{2r} + 2N_z \beta)}{\exp(2\beta K) + |r_1|^2 |r_2|^2 \exp(-2\beta K) + 2|r_1||r_2| \cos(\varphi_{1r} + \varphi_{2r} - 2N_z \beta)}, \quad (1)$$

对 s 分量:

$$|r_1|^2 = \frac{(n_0 \cos \theta_0 - N_z)^2 + K^2}{(n_0 \cos \theta_0 + N_z)^2 + K^2}, \quad (2)$$

$$\varphi_{1r} = \arctan \frac{-2Kn_0 \cos \theta_0}{N_z^2 + K^2 - n_0^2 \cos^2 \theta_0}, \quad (3)$$

$$|r_2|^2 = \frac{(n_2 \cos \theta_2 - N_z)^2 + K^2}{(n_2 \cos \theta_2 + N_z)^2 + K^2}, \quad (4)$$

$$\varphi_{2r} = \arctan \frac{-2Kn_2 \cos \theta_2}{N_z^2 + K^2 - n_2^2 \cos^2 \theta_2}, \quad (5)$$

对于 p 分量:

$$|r_1|^2 = \frac{[n_0 N_z - (n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_0]^2 + [n_0 K - 2n_1 k_1 \cos \theta_0]^2}{[n_0 N_z + (n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_0]^2 + [n_0 K + 2n_1 k_1 \cos \theta_0]^2}, \quad (6)$$

$$\varphi_{1r} = \arctan \frac{2n_0 \cos \theta_0 [2n_1 k_1 N_z - (n_1^2 - k_1^2) K]}{n_0^2 (N_z^2 + K^2) - \cos^2 \theta_0 (n_1^2 + k_1^2)^2}, \quad (7)$$

$$|r_2|^2 = \frac{[(n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_2 - n_2 N_z]^2 + [2n_1 k_1 \cos \theta_2 - n_2 K]^2}{[(n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_2 + n_2 N_z]^2 + [n_2 K + 2n_1 k_1 \cos \theta_2]^2}, \quad (8)$$

$$\varphi_{2r} = \arctan \frac{2n_2 \cos \theta_2 [(n_1^2 - k_1^2) K - 2N_z n_1 k_1]}{(n_1^2 + k_1^2)^2 \cos^2 \theta_2 - n_2^2 (N_z^2 + K^2)}, \quad (9)$$

式中:

$$K^2 = \frac{1}{2} \{ -(n_1^2 - k_1^2) + n_0^2 \sin^2 \theta_0 + \sqrt{(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4n_1^2 k_1^2} \}, \quad (10)$$

$$N_z^2 = \frac{1}{2} \{ (n_1^2 - k_1^2) - n_0^2 \sin^2 \theta_0 + \sqrt{(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4n_1^2 k_1^2} \}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} d_1, \quad (12)$$

$$n_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (13)$$

由上述公式即可计算单层金属反射膜在各种条件下的反射率。图 2 给出了 55° 入射角时反射镜在各种入射波长下的膜厚优化计算结果。计算中 Au 的光学常数取自文献 [9], 基片折射率取 $n_2 = 1.5163^{[24]}$ 。由图可见, 对应于各种不同的入射波长, 获得最高反射率的膜厚不同。短波长时较薄的膜获得的反射率高, 长波长时厚膜获得的反射率高; 不论对何种波长, 当膜厚超过一定值后, 反射率趋向稳定; 最高反射率与趋于稳定时的反射率之差对 R_s 来说大概在 5%, 对 R_p 约 2~3%; 无论对 R_s 还是 R_p , 其反射率曲线只是在膜厚较薄时出现一个峰值。这是由于干涉所引起。随着膜厚的增加, 这种干涉效应很快消失, 这与介质膜明显不同, 后者在光学膜厚为 $\lambda/4$ 的奇数倍时都会出现反射率高峰。从图上还可以看出, 入射波长 $\lambda = 55 \text{ nm}$ 时所对应的反射率最高峰比 $\lambda = 100 \sim 120 \text{ nm}$ 时高, 说明反射率在 $\lambda = 55 \text{ nm}$ 有一个峰值, 这与文献 [23] 列出的有关结果一致。

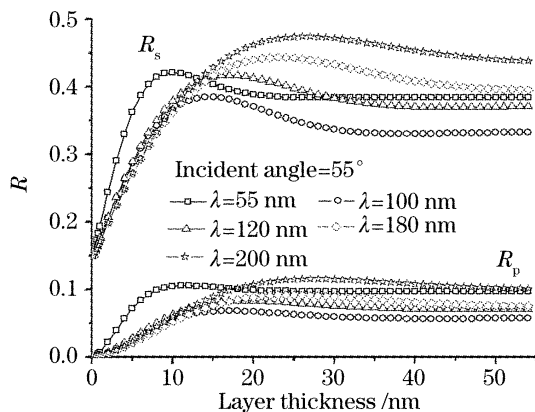


图 2 Au 膜厚度优化计算曲线

Fig. 2 Calculated optimized thickness for Au film

以上没有考虑镀膜工艺、厚度等因素对反射率的影响。实际上, 薄膜沉积过程中, 膜厚及各种相关的镀膜工艺参量都会对薄膜微观结构产生很大影响, 并因此导致薄膜光学常数、进而反射率的改变, 这已为现代薄膜技术所证实; 计算过程中基片折射率取的是实折射率, 没有考虑其消光系数; 这些因素加上反射率测定过程中不可避免的测量误差, 必然导致实验结果与计算的理论值之间出现偏差。

3 实验步骤和装置

基片放入镀膜机前需进行清洗。采用了两种不同的前期基片清洗工艺: 第一种工艺按正己烷、丙酮、乙醇、去离子水、盐酸+双氧水+氨水、两次异丙醇清洗的顺序对基片清洗^[26] (“7 步洗”。每步均在超声波

中进行); 第二种工艺是将基片在丙醇中超声清洗 20 min, 再在乙醇中超声清洗 20 min (“2 步洗”)。所有基片清洗后都用干氮气吹干。清洗后用聚光灯观察, 基本无亮点、无灰尘、无污斑、无划痕和裂纹。图 3 给出了其中一块 K9 基片清洗后的原子力显微镜 (AFM) 扫描图像 (单位 μm)。清洗后的基片表面较平整、光滑, 表面粗糙度值石英玻璃在 0.5 nm 左右, K9 玻璃在 1 nm 左右 (取样长度 $5 \mu\text{m}$)。

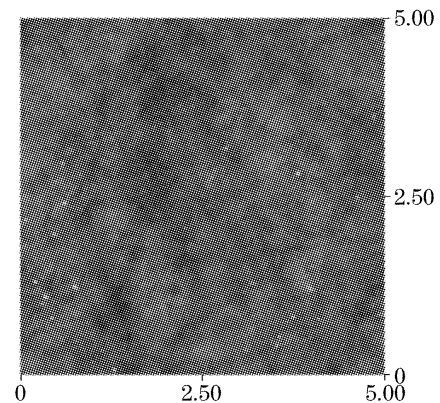


图 3 清洗后的 K9 基片原子力显微镜扫描图像

Fig. 3 AFM image of a cleaned BK7 substrate

实验样品在如图 4 所示的离子束溅射镀膜机上制备。图 4 中 P_1 为旋片泵, P_2 为分子泵, V 为真空阀门, 该机有主、辅两个离子源, 主源溅射靶材, 辅源则用来清洗基片、轰击薄膜 (辅助离子沉积)。真空室本底压强约为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 溅射时压强约为 $3.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。膜厚由镀膜时间控制, 用 α -500 台阶仪测量。

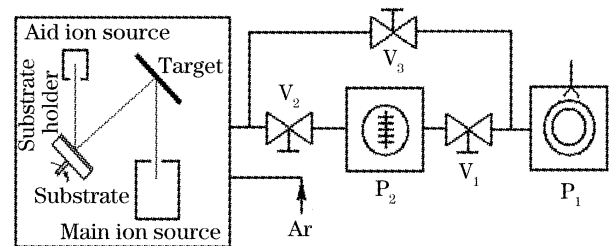


图 4 双离子源离子束镀膜机示意图

Fig. 4 Schematic of dual-ion-beam source coating machine

根据辅源的使用情况, 将样品分为 4 组, 分别为离子清洗加辅助离子沉积、只用离子清洗、只用离子辅助沉积、既无离子清洗也不用离子辅助沉积。对每组样品, 通过控制沉积时间来获得不同的沉积厚度, 分别为 $10 \sim 20 \text{ nm}$ 、 $20 \sim 30 \text{ nm}$ 、 $30 \sim 40 \text{ nm}$ 、 40 nm 以上。每次镀膜分别放入经不同前期清洗工艺处理的不同基片, 以保证沉积条件完全相同。

对获得的 Au 膜反射率进行测量。测试在中国科技大学国家同步辐射实验室的“光谱辐射标准与

计量光束线和实验站”上进行,测量波长在 115~140 nm 间。实际测量时,先测入射光强度 I_0 ,再把样品送入光路,测反射光强度 I_r ,取其比值为反射率。由于 I_0 、 I_r 不能同时测量,为消除两次测量过程中光强变化带来的误差,在 I_r 测量完成、退出样品后,再次测入射光强度,得 I'_0 。用下式对入射光强度进行修正:

$$I_{0m} = I_0 - \frac{I_0 - I'_0}{t} \cdot t_i, \quad (14)$$

式中 I_{0m} 为修正后的入射光强, t 为完成一个样品所有测试所用总时间, t_i 为 I_0 、 I_r 测试时间间隔。图 5 给出了经这种方法修正后的角度扫描测试结果曲线:入射波长固定为 120 nm,掠入射角在 5~87° 间变化。从图上可清楚地看到,间隔一段时间后、同样条件下二次测得的反射率曲线不重合,发生了明显的变化,但按上述方法修正后,修正后的两条曲线几乎完全重合,可见这种修正方法能够较好地消除入射光强随时间波动所带来的反射率测量误差。

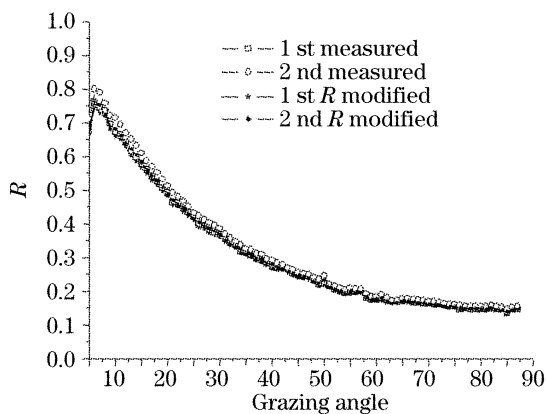


图 5 反射率测试结果曲线修正($\lambda=120$ nm, 角度扫描)

Fig. 5 Modification of measured reflectivity curve (angle scan at $\lambda=120$ nm)

4 实验结果

如前所述,实验分四组,每组含不同材质的基片,以 K/Q 分别表示 K9 玻璃和石英。下面以 35° 掠入射(55° 入射角)时的测试结果为例,对实验结果分组进行讨论。

4.1 离子清洗和离子辅助沉积

本组实验基片编号及沉积结束后膜厚如表 1 所示。两种基片装入真空室镀膜前都是用“7 步法”清洗。图 6 是实际测试获得的反射率曲线(55° 入射角)。

膜厚最薄的一组样品 Q55/K5(膜厚 12 nm)反射率最高,分别约为 45% 和 41%,比其它组样品高 5% 以上;

膜越厚,反射率越低。这对两种基片都适用;膜厚较薄时,石英基片反射率比 K9 高;厚膜时,结论相反。

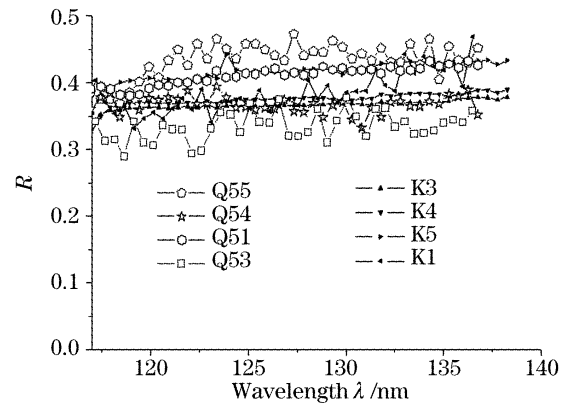


图 6 反射率测试结果(离子清洗和离子辅助沉积)

Fig. 6 Measured reflectivity of the samples with ion cleaning and ion-aided deposition

表 1 离子清洗和离子辅助沉积

Table 1 Ion-aided deposition with ion cleaning

Substrate No.	Film thickness /nm
K1/Q51	21
K3/Q53	49
K4/Q54	32
K5/Q55	12

4.2 无离子清洗和有离子辅助沉积

本组实验基片编号及沉积结束后膜厚如表 2 所示。基片 K21~24 装入真空室镀膜前采用“2 步法”清洗,其余都用“7 步法”清洗。图 7(a)是实际测试获得的 K9 基片反射率曲线,图 7(b)是石英基片反射率曲线(入射角均为 55°)。

表 2 离子辅助沉积时基片分组及膜厚

Table 2 Substrate groups and film thickness in ion-aided deposition

Substrate No.	Film thickness /nm
K6/K21/Q56	34
K7/K22/Q57	46
K8/K23/Q58	23
K10/K24/Q60	11

“7 步法”清洗的 K9 基片膜厚与反射率的关系与上组相同,即薄膜反射率高,厚膜反射率低;膜厚的变化在膜厚较薄时对反射率影响大(本例中在 10% 左右),厚膜时这种变化引起的反射率变化小;

“2 步法”清洗的 K9 基片膜厚与反射率的关系与“7 步法”的 K9 基片基本相同,但膜厚的变化对反射率影响比“7 步法”小;

石英基片在膜厚为 23 nm 时获得最高反射率,较薄和较厚样品反射率都会下降。这与 K9 有明显区

别。膜厚在 30 nm 以上时,反射率几乎没有变化;

石英基片上 Au 膜的反射率比 K9 基片上 Au 膜高,其中经“7 步法”清洗后的 K9 基片上 Au 膜反

射率又比“2 步法”高。最高反射率:石英基片高于 55%,K9 基片分别为红 55%和小于 50%。

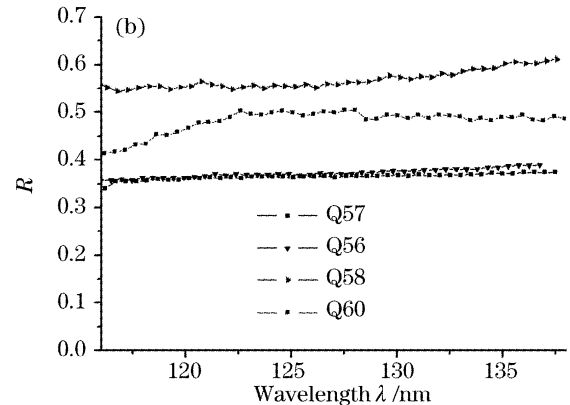
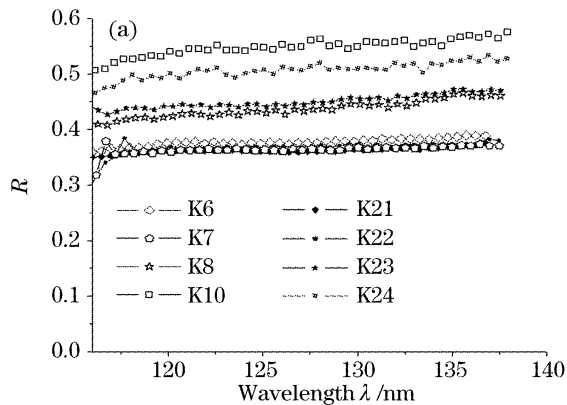


图 7 反射率测试结果。K9 基片,离子辅助沉积(a),石英基片,离子辅助沉积(b)

Fig. 7 Measured reflectivity of the samples with ion-aided deposition. BK7 substrates (a), quartz substrates (b)

4.3 有离子清洗和无离子辅助沉积

本组实验基片编号及沉积结束后膜厚如表 3 所示。基片 K25~28 装入真空室镀膜前采用“2 步法”清洗,其余都用“7 步法”清洗。图 8(a)是实际测试获得的石英基片反射率曲线,图 8(b)是 K9 基片反射率曲线(入射角均为 55°)。

表 3 有离子清洗时基片分组及膜厚

Table 3 Substrate group and film thickness in deposition with ion-cleaning

Substrate No.	Film thickness /nm
K12/K25/Q61	21
K13/K26/Q62	31
K14/K27/Q63	41
K15/K28/Q64	12

在镀前对基片进行离子清洗情况下,各种基片膜厚与反射率的关系与上面两组相比,表现迥异:最大反射率不再出现在膜厚最薄的基片上,对石英基片,获得的反射率按从高到低顺序所对应的膜厚分别为 31 nm、41 nm、12 nm、21 nm;对 K9 基片,这个顺序为 41 nm、31 nm、12 nm、21 nm;反射率随膜厚表现出明显的起伏,且各种基片获得的最高反射率遥遥领先于 4.1、4.2 两组:对石英,最高反射率在 60%以上,最低反射率也在近 40%;对 K9 达 55%。说明镀前对基片进行离子清洗对提高薄膜的真空紫外反射率极为有利,效果显著。

在镀前对基片进行离子清洗情况下,“7 步法”清洗的 K9 基片,其薄膜反射率几乎无一例外地比“2 步法”清洗的低,与 4.2 结论相反。

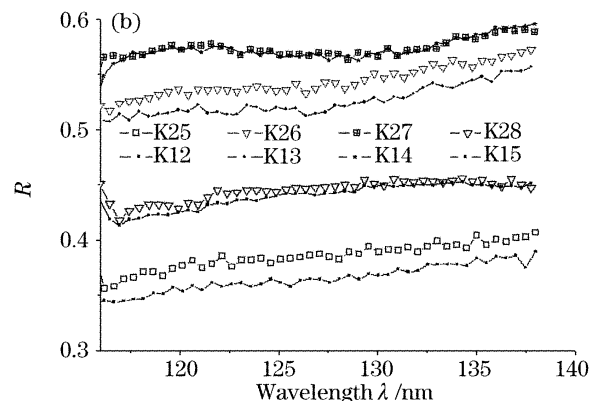
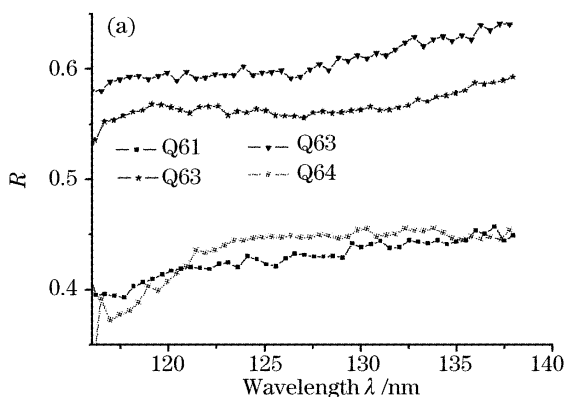


图 8 反射率测试结果。石英基片,离子清洗(a),K9 基片,离子清洗(b)

Fig. 8 Measured reflectivity of the samples with ion-cleaning. quartz substrates (a), K9 substrates (b)

4.4 无离子清洗和无离子辅助沉积

本组实验基片编号及沉积结束后膜厚如表 4 所示。8 块基片装入真空室镀膜前都用“7 步法”清洗。图 9 是实际测试获得反射率曲线,(入射角 55°)。

在不使用辅助离子源的情况下,各个样片的反射率都低,最高反射率只能到达 40%;

对石英基片,最薄的 Au 膜反射率最高,但最高和最低反射率之间相差不大,都在 35%附近,即膜

厚对反射率影响不是很显著；

K9 基片上的 Au 膜反射率则表现为厚膜反射率高,膜越薄,反射率越低,32 nm 厚的 Au 膜比 17 nm 厚的高约 15%;而 32 nm 厚的 Au 膜与 43 nm 的反射率没有区别,说明在这种工艺条件下,32 nm 的膜厚已经进入了膜的厚度极限,此时增加膜厚对提高反射率没有任何意义。

表 4 无离子清洗和离子辅助沉积

Table 4 Deposition without ion cleaning and ion-aided deposition

Substrate No.	Film thickness /nm
K2/Q52	23
K16/Q65	43
K17/Q66	32
K18/Q67	17

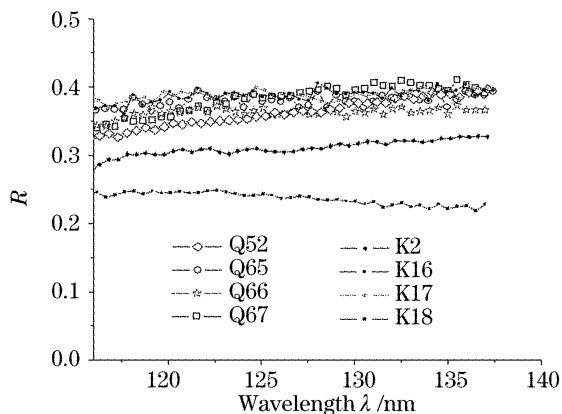


图 9 反射率测试结果(无离子清洗,无离子辅助沉积)

Fig. 9 Measured reflectivity of the samples without ion cleaning and ion-aided deposition

5 结 论

离子束清洗和离子束辅助沉积同时使用或不用辅助离子源,均不能获得对真空紫外的高反射率。镀膜前对基片进行离子清洗,或镀膜过程中用辅源进行离子辅助沉积,都可大幅提高 Au 膜真空紫外反射率,其中又以离子清洗效果更佳。鉴于镀前的离子清洗还可增加 Au 膜与基片间的粘合力,因此离子轰击有利于提高 Au 膜的综合性能。

辅助离子源的使用还显著影响获得最高反射率时对应的最佳膜厚值。从 4.1 节~4.3 节可见,最佳膜厚是逐渐增加的,这一趋势在 K9 上表现更明显。

Au 膜厚度对反射率有重大影响,但这种影响与镀膜的工艺条件和所用基片有很大关系。

上述各种工艺条件下,出现最大反射率的 Au 膜都是以石英为基片,因此石英基片比 K9 玻璃更有可能获得高真空紫外反射率。

对 K9 基片,镀前溶剂清洗工艺对反射率影响明显。综合来看,“2 步法”清洗较好,清洗过程也更简便。

所有样片实测反射率均随波长增加呈上升趋势,与理论计算结果吻合;国外类似 Au 反射膜在此波段内正入射反射率约 15%^[23]。比较而言,用离子束溅射获得的 Au 膜正入射反射率一般都在 20%以上。这可能与镀膜方法、工艺等参量有关。

致谢 感谢周洪军、霍同林老师在反射率测量方面所提供的帮助;感谢熊瑛、刘刚老师和刘绍阳、肖凯同学在离子束镀膜机、台阶仪使用方面提供的方便与帮助。感谢王劫、张国斌老师在真空紫外反射率测试方面所提供的有益提示和讨论;感谢刘正坤、邱克强、谭鑫、张自军等同学在反射率计算等方面提供的有益讨论。

参 考 文 献

- David L. Windt, Webster C. Cash, M. Scott *et al.*. Optical constants for thin films of C, diamond, Al, Si, and CVD SiC from 24 Å to 1216 Å[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2): 279~295
- W. R. Hunter. Measurement of optical properties of materials in the vacuum ultraviolet spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(12): 2103~2114
- D. W. Juenker, L. J. Leblanc, C. R. Martin. Optical properties of some transition metals[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**(2): 164~171
- Krnnetch A. Kress, Gkrald J. Lapeyre. Optical properties of molybdenum and ruthenium[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(12): 1681~1684
- H. Hass, G. F. Jacobus, W. R. Hunter. Optical properties of evaporated iridium in the vacuum ultraviolet from 500 Angstroms to 2000 Angstroms[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(6): 758~762
- J. T. Cox, G. Hass, J. B. Ramsey *et al.*. Reflectance of evaporated rhenium and tungsten films in the vacuum ultraviolet from 300 to 2000 Å[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(6): 781~785
- C. J. Powell. Analysis of optical- and inelastic-electron-scattering data. III. reflectance data for beryllium, germanium, antimony, and bismuth[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(2): 214~220
- J. T. Cox, G. Hass, J. B. Ramsey *et al.*. Reflectance and optical constants of evaporated osmium in the vacuum ultraviolet from 300 to 2000 Å[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(4): 435~442
- David L. Windt, Webster C. Cash, M. Scott *et al.*. Optical constants for thin films of Ti, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Hf, Ta, W, Re, Ir, Os, Pt, and Au from 24 Å to 1216 Å[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2): 246~278
- Robert La Villa, H. Mendlowitz. Optical constants of aluminum in vacuum ultraviolet[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **9**(4): 149~150
- R. B. Gillette, B. A. Kenyon. Proton-induced contaminant film effects on uv reflecting mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(3): 545~551
- Ritva A. M. Keski-Kuha, Charles M. Fleetwood, Joseph

- Robichaud. Performance of high-density cast silicon carbide in the extreme ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(19): 4409~4410
- 13 Ritva A. M. Keski-Kuha, Joseph Osantowski, H. Herzig *et al.*. Normal incidence reflectance of ion beam deposited SiC films in the EUV[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 2815~2816
- 14 G. M. Blumenstock, Ritva A. M. Keski-Kuha. Ion-beam-deposited boron carbide coatings for the extreme ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(25): 5962~5963
- 15 Juan I. Larruquert, Ritva A. M. Keski-Kuha. Multilayer coatings with high reflectance in the extreme ultraviolet spectral range of 50 to 121.6 nm[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7): 1231~1236
- 16 J. B. Kortright, David L. Windt. Amorphous silicon carbide coatings for extreme ultraviolet optics[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2841~2846
- 17 Juan I. Larruquert, Ritva A. M. Keski-Kuha. Optical properties of hot-pressed B4C in the extreme ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(10): 1537~1540
- 18 Tang Yuguo, Qi Wenzong, Li Futian. Study of diffuser in UV and VUV range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 267~271 (in Chinese)
唐玉国, 齐文宗, 李福田. 紫外-真空紫外漫反射板的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 267~271
- 19 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 371~375 (in Chinese)
刘颖, 李福田. 若干材料紫外真空紫外漫反射特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 371~375
- 20 Gan Shuyi, Xu Xiangdong, Hong Yilin *et al.*. Review on highly reflecting mirrors for vacuum ultraviolet and X-ray [J]. *J. Vacuum Science and Technology of China*, 2006, **26**(6): 459~461 (in Chinese)
干蜀毅, 徐向东, 洪义麟等. 真空紫外 X 射线反射膜研究现状 [J]. *真空科学与技术*, 2006, **26**(6): 459~461
- 21 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. (7th edition), England: Cambridge university press, 1999. 735~790
- 22 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. *The Principles of Optical Film* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. 56~101 (in Chinese)
林永昌, 卢维强. *光学薄膜原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 56~101
- 23 Zhong Disheng. *Vacuum Coating: Material Selection and Its Applications* [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. 58~160 (in Chinese)
钟迪生. *真空镀膜: 材料的选择与应用* [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 58~160
- 24 Tianjin Material Test Factory for Silicate. *Compilation of Optical Glass* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1977. 4 (in Chinese)
天津硅酸盐材料试验厂. *光学玻璃汇编* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1977. 4
- 25 Alert Thompson, Ingoif Lindau, David Attwood *et al.*. *X-Ray Data Booklet* [M]. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1986. 5-17~24
- 26 Liu Qiang, Lin Libin. Study on improving damage threshold of dielectric film[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7): 637~641 (in Chinese)
刘强, 林理彬. 提高氧化物介质膜层损伤阈值的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 637~641

· 广 告 ·

最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,826,283 美国专利号
88,102,084.2 中国专利号
2023845 日本专利号



FC CASTECH®

我司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件



BBO



BIBO



KTP



Nd:YVO₄



股合晶体



键合晶体



蓝光组件



光股晶体

福建福晶科技股份有限公司

FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.

地址: 福建省福州市杨桥西路155号
TEL: 86-591-83710533
http://www.castech.com

邮编: 350002
FAX: 86-591-83711593
E-mail: sales@castech.com