

极紫外反射镜氧化物保护层的制备与表征

王 珣^{1,2} 金春水¹ 李 春¹ 匡尚奇¹

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

摘要 极紫外(EUV)反射镜在使用过程中的氧化及表面碳污染沉积,严重影响了极紫外光刻(EUVL)技术的工业应用。为了延长EUV反射镜的稳定性与使用寿命,一般采取在Mo/Si多层膜表面添加保护层。采用直流反应磁控溅射技术,建立氧气流量与溅射电压之间的“迟滞回线”关系,进而准确把握不同氧化物保护层所需氧气量,以此减少过多的活性氧对下层Mo/Si多层膜的影响,提高镜面的反射率。选用RuO₂与TiO₂两种保护层材料进行比较,根据充氧量的不同,分析不同反应阶段的薄膜特性。针对催化性和物理稳定性更好的TiO₂薄膜,在晶相、表面粗糙度、截面均匀性和化学组分等方面给予评价。研制出膜质致密均匀的非晶态TiO₂薄膜,其表面粗糙度优于100 nm;TiO₂纯度(质量分数)达97.2%;保护层厚度为2 nm的Mo/Si多层膜的反射率损失小于5%,满足EUV外多层膜的基本要求。

关键词 薄膜;极紫外保护层;直流反应磁控溅射;迟滞回线

中图分类号 O484.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0331001

Preparation and Characteristic of Oxide Capping-Layer on Extreme Ultraviolet Reflective Mirrors

Wang Xun^{1,2} Jin Chunshui¹ Li Chun¹ Kuang Shangqi¹

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

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

Abstract The development of industrial applications of extreme ultraviolet lithography (EUVL) severely based on surface oxidation and carbon contamination on using extreme ultraviolet (EUV) reflective mirrors. The capping layer coating on the Mo/Si multilayer is a promising method to improve the stability and service life of the reflective mirrors. The capping layer is prepared by direct current reactive magnetron sputtering. The "hysteresis loop" of oxygen flow and sputtering voltage is established, the required oxygen flow for different oxides is accurately grasped. Choosing the RuO₂ and TiO₂ as the capping layer materials; the different film characteristics in each state is analyzed. For TiO₂ films, crystal phase, surface roughness, cross section uniformity and chemical composition are evaluated. 97.2% TiO₂ content (mass fraction) of Ti-oxide is obtained; reflectivity of Mo/Si multilayer with 2 nm TiO₂ as capping layer is controlled in 5%; surface roughness less than 100 nm, dense and uniform amorphous TiO₂ films is fabricated to make this capping layer achieve the basic requirements of EUV.

Key words thin films; extreme ultraviolet capping layer; direct current reactive magnetron sputtering; hysteresis loop

OCIS codes 310.1515; 340.7480; 310.1860

1 引 言

极紫外(EUV)与软X射线技术自20世纪70年代起得到了迅速发展,其中的极紫外光刻(EUVL)技术最

收稿日期: 2014-10-15; 收到修改稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 王 珣(1987—),男,博士研究生,主要从事极紫外多层方面的研究。E-mail: xunwang1211@gmail.com

导师简介: 金春水(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事紫外、极紫外等光学技术等方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

有可能成为未来半导体工业中制作 32 nm 以下线宽集成电路的核心技术^[1]。EUVL 技术以 Mo/Si 多层膜反射镜为关键光学元件,其反射镜长期使用的稳定性也已成为制约 EUVL 发展的关键因素之一^[1-5]。影响 EUV 多层膜光学元件稳定性的主要因素有表面碳污染和氧化^[6]。理论计算显示,当 Mo/Si 多层膜表面的碳污染层或氧化物厚度达到 1.5 nm 时,多层膜反射率将出现骤降。当前商用 EUV 光刻设备采用含有多块 Mo/Si 多层膜反射镜的光学系统。因此,反射率微小的下降都将对光刻系统造成巨大的光通量损失^[4]。目前,国际上采用臭氧清洁,氢离子清洁等方式去除表面碳污染,但仍无法完全避免反射率的下降^[7-10],所以抗氧化和抗碳污染仍是 EUV 多层膜产业化过程中必须进一步研究的关键问题。

近年来,在 Mo/Si 多层膜表面——Si 层,添加表面保护层成为延长 EUV 多层膜的使用寿命的主要手段^[9]。其技术关键在于:1)保护层薄膜需致密且均匀;2)保护层与 Si 层材料之间形成光滑、稳定的界面;3)在 EUV 波段具有较低的吸收和散射;4)与 EUV 多层膜表面清洗技术可以很好的兼容^[10-12]。为了实现 Mo/Si 多层膜的大口径,高均匀性与高反射率,制备手段多采用直流磁控溅射,则保护层也应适用于这种制备方法,以达到 Mo/Si 膜与保护层的一体化镀膜。考虑以上诸多特性,可选用的保护层材料可分为金属单质(Ru 和 Rh)以及金属氧化物(RuO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2)^[13]。相关报道指出^[6],具有催化性能的金属氧化物保护层能有效延缓碳污染层的沉积,其机理有两方面:1)催化性能促进表面沉积的碳与真空腔内残余的水蒸汽或氧气反应,产生吸附性极弱的气态分子而离开薄膜;2)材料受 EUV 辐照所产生的二次电子,能够分解吸附在其表面的 CH 化合物,产生更多的碳沉积物,而金属氧化物通常比金属有更低的二次电子产额^[5],因此,具有催化性能的金属氧化物保护层具有更好的应用前景。金属氧化物保护层材料可以通过直流反应磁控溅射方法制备,有利于一体化镀膜。同时,考虑到金属氧化物保护层是 EUV 多层膜的一部分,在其溅射制备时充氧量既要使溅射的金属离子反应完全,又要尽量降低下层 Mo/Si 多层膜被电离后氧化性极强的离子氧氧化,因而解决此类问题的制备工艺的研发具有重要意义。

本文使用直流磁控溅射镀膜设备对 RuO_2 、 TiO_2 两种金属氧化物沉积过程中的“迟滞回线”现象进行对比研究,分析了工艺过程中不同充氧量对薄膜性质的影响以及两种材料“迟滞”现象的差异,以此为采用反应磁控溅射制备其他金属氧化物提供了参考,通过优化工艺参数,研制出反射率损失在 5% 以内的具有 TiO_2 保护层的 Mo/Si 多层膜,且保护层中 TiO_2 的纯度(质量分数,下同)为 97.2%。

2 实 验

磁控溅射设备采用直径为 10 cm 的圆形靶材,靶基距为 70 mm。工艺中,本底真空度高于 2.0×10^{-3} Pa, RuO_2 和 TiO_2 工艺中的 Ar/ O_2 流量比分别为 1.6 和 2.5, Ar 和 O_2 的纯度均为 99.999%。采用超光滑单晶硅作为镀膜基底。利用 X 射线衍射仪测量并拟合氧化物薄膜厚度,标定沉积速率。充入 O_2 前将金属膜预溅射 30 min,随后逐渐通入氧气,流量先由小增大,再由大减小, RuO_2 的工艺中以 0.3 sccm 作为 O_2 流量的一个调节单位; TiO_2 工艺中以 0.1 sccm 为一个调节单位,同时检测对应的溅射电压。

2.1 靶电压与 Ar/ O_2 流量的关系及分析

图 1(a)和(b)分别为 RuO_2 和 TiO_2 的实验曲线。图中各阶段可分为金属模式、过渡模式和氧化模式,不同模式下两种材料的曲线不尽相同。

2.1.1 金属模式(RuO_x : O_2 流量为 0~0.5 sccm; TiO_x : O_2 流量为 0~0.2 sccm)

对于 Ru 靶,当 O_2 流量为 0~0.5 sccm 之间时, Ru 靶电压数值上升先快后慢,从 520 V 上升到 543 V。由于在 0~0.2 sccm 过程中 O_2 含量微小, Ru 本身的惰性,其靶面没有氧化物。此后电压快速上升,其原因是真空腔内的总气压升高,靶基间的气体分子变多,电阻变大,进而在恒功率模式下表现出电压升高。当 O_2 量大于 0.2 sccm 后,溅射出的大量 Ru 粒子开始与 O_2 气体反应,消耗了一定量的 O_2 气体,电压上升趋势放缓,靶面上部分区域形成不稳定氧化物层。图 1(a)与(b)相同 O_2 含量区域表现出来的情况有所区别,其原因是 Ti 较 Ru 活泼,更容易与 O_2 反应,曲线增长缓慢,但两种材料溅射电压的变化趋势基本一致。

2.1.2 过渡模式(RuO_x : O_2 流量为 0.5~1.5 sccm; TiO_x : O_2 流量为 0.2~0.8 sccm)

当充氧量大于 0.5 sccm 后, O_2 流量以 0.1 sccm 作为一个调节单位逐渐增加, Ru 靶电压呈线性增长,达到

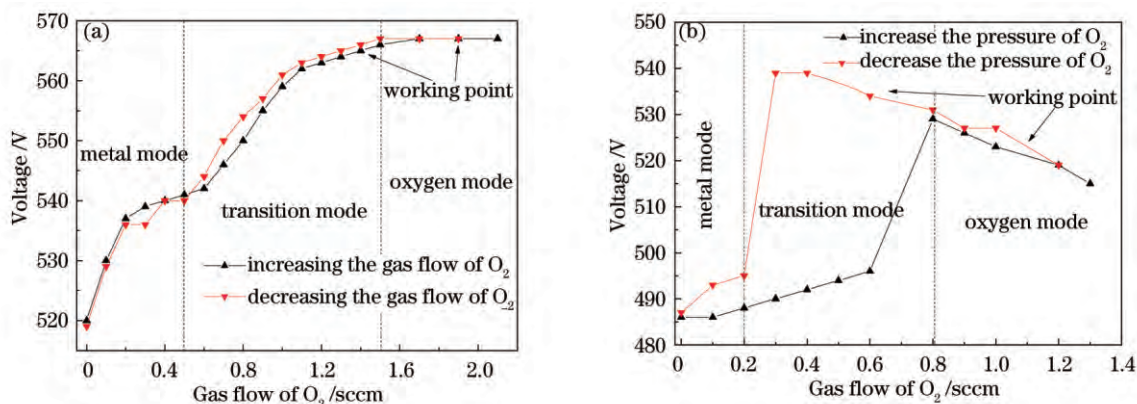


图 1 (a) Ru 靶溅射电压与 O₂ 流量的关系; (b) Ti 靶溅射电压与 O₂ 流量的关系

Fig.1 (a) Relationship between sputtering voltage and the oxygen level for Ru target; (b) relationship between sputtering voltage and the oxygen level for Ti target

1.1 sccm 后趋于平缓, 最终达到 1.5 sccm 后电压将不再变化。对于 Ti 靶, 在 0.2~0.8 sccm 之间时, 电压突然剧烈升高, 随后逐渐下降, 其与 RuO₂ 的现象明显不同。此阶段靶表面处于氧化态, 靶表面形成稳定的氧化物层, 即发生“靶中毒”现象。一般情况下, 金属氧化物的二次电子产额比金属高, 而靶中毒后, 靶表面受 Ar⁺ 离子轰击导致材料表面释放的二次电子数量增加, 这些溢出的二次电子, 在电场的作用下, 与 Ar⁺ 离子的运动方向相反, 从而提高了空间的导通能力, 促使溅射电压仍保持在较低的值。Ru 为惰性金属, 因而 RuO₂ 的溅射速率与靶表面氧化物形成的速率相当, 如图 2(a) 和 (b) 所示, 上述原因也导致了 RuO₂ 工艺中“迟滞”现象较 TiO₂ 工艺明显。RuO₂ 薄膜工艺中, 即使在恒功率 100 W 模式, Ar 气与 O₂ 气流量比甚至达 1:1 的情况下, 最高溅射电压达 650 V 以上, 但其“迟滞”现象仍然不明显。这也表明靶电压延后变化的现象与金属以及氧化物的化学活性、导电能力、二次电子发射效率和溅射速率等因素有关。

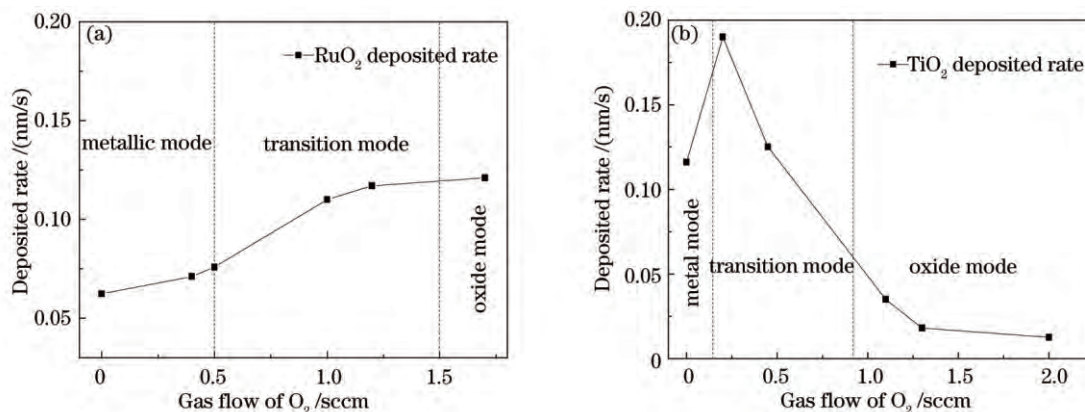


图 2 (a) Ru 靶在不同充氧量基底薄膜的沉积速率; (b) Ti 靶在不同充氧量基底薄膜的沉积速率(图 1 中的黑线)

Fig.2 (a) Deposition rates of Ru target versus different gas flows of O₂; (b) deposition rates of Ti target versus different gas flows of O₂ (the black line of Fig.1)

2.1.3 氧化模式 (RuO₂: O₂ 流量为大于 1.5 sccm; TiO₂: O₂ 流量为大于 0.8 sccm)

随着充氧量的继续增大, 电压出现了不同的趋势, Ru 靶的电压保持不变, Ti 靶的电压则平稳下降。其原因主要是由于溅射速率不同造成的, RuO₂ 的溅射速率较快, 靶表面氧化层始终保持动态平衡, 而 TiO₂ 的溅射速率极低, 使真空腔内反应剩余的 O₂ 气与 Ar 气共同作为溅射气体, 部分 O₂ 被电离, 致使电压线性下降。溅射电压趋于平稳以后, 开始减少充 O₂ 量, 按照之前增加 O₂ 的间隔进行, 图 1 中 TiO₂ 的“回线”的迟滞过程比 RuO₂ 更明显, 说明 TiO₂ 在过渡区的溅射速率大于 RuO₂, 且“靶中毒”后 RuO₂ 需要更长的时间将靶材表面的氧化物溅射掉, 以恢复到最初纯净的金属靶表面。

2.2 不同充 O₂ 量对膜质的影响

分别选取 O₂ 量减小过程中的“氧化阶段”、“过渡阶段”和“金属阶段”进行薄膜制备, 对应 Ru 靶不同状态

的 O₂ 流量为 0、1.4、1.9 sccm；对应 Ti 靶的 O₂ 气流量为 0、0.6、1.1 sccm。将制备的薄膜分别经过 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 和 X 射线光电电子能谱 (XPS) 的测试, 得出其结晶状态、致密度、表面粗糙度和化学组分, 以此综合分析薄膜的制备工艺。

2.2.1 对薄膜结晶状态的影响

图 3 为不同 O₂ 量 XRD 的广角测试结果, 薄膜中金属晶粒含量随通氧量的增加而减少, 当氧气达到一定量时, 薄膜中金属晶相消失, 薄膜成非晶态。薄膜结晶状态主要取决于基底温度和到达基底的粒子能量。实验过程在室温下进行, 基底不另加热, 到达基底的粒子能量是影响结晶状态的主要因素。在“金属模式”和“过渡模式”下, O₂ 气主要参与靶氧化, 等离子区主要成分为 Ar⁺, 溅射粒子经过等离子区时被加速, 使其动能得到增加^[14], 使到达基底的粒子动能增加而易于结晶成膜。在“氧化模式”中, 靶区附近的 O₂ 气接近饱和, 等离子区内 O²⁺ 离子增多, O₂ 气的密度增加使溅射粒子更多的参与到粒子的碰撞。由于电荷作用力的影响, 被溅射的粒子在经过等离子区时被减速, 导致到达基底的粒子动能减少, 在基底上的位移能力变弱, 结晶变差, 薄膜成非晶态。

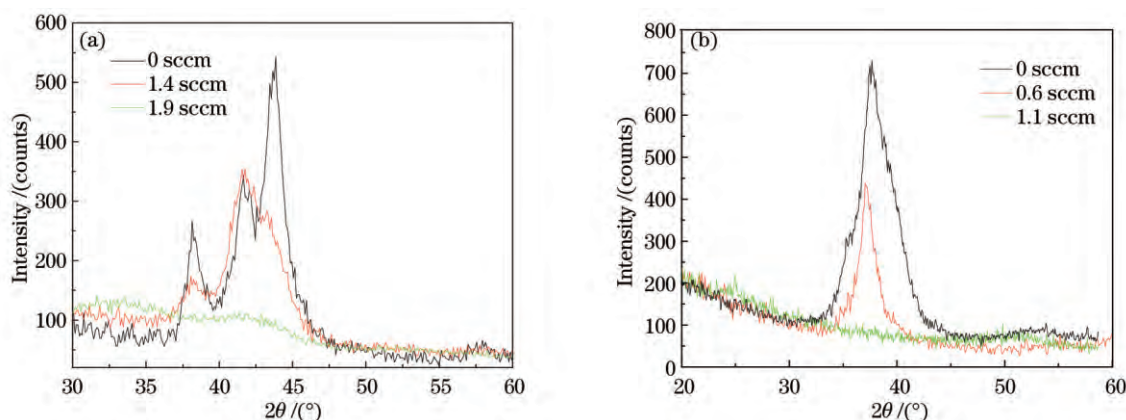


图 3 (a) RuO₂ 薄膜在不同 O₂ 量下的结晶状态; (b) TiO₂ 薄膜在不同 O₂ 量下的结晶状态

Fig.3 (a) Crystalline states of RuO₂ films in different O₂ levels; (b) Crystalline states of TiO₂ films in different O₂ levels

2.2.2 对 RuO₂、TiO₂ 薄膜表面形貌的影响

图 4(a) 和 (b) 分别为 RuO₂ 薄膜在“过渡阶段”和“氧化阶段”下的表面形貌; 图 4(c) 和 (d) 分别为 TiO₂ 薄膜在“过渡阶段”和“氧化阶段”下的表面形貌, 结合图 2 中两种氧化物薄膜沉积速率分析, 表面粗糙度受 RuO₂ 和 TiO₂ 薄膜沉积速率的影响。当沉积速率提高时, 溅射粒子缺乏足够的时间在基底表面扩散, 而被后续粒子迅速覆盖, 使薄膜表面粗糙度变大; 随着 O₂ 气流量的增加, 沉积速率降低, 基底表面的原子有较长的时间进行扩散, 使薄膜表面粗糙度减小。图 2(a) 中充 O₂ 量对 RuO₂ 薄膜沉积速率影响不大, 溅射 RuO₂ 粒子能量没有因为 O₂ 气体密度的增加而减少, 所以表面粗糙度没有明显变化。根据光线表面散射损失 I_{TIS} 与表面均方根粗糙度 δ 之间的关系:

$$I_{TIS} = 4\pi\delta^2/\lambda, \tag{1}$$

式中 λ 为入射光波长。平整的表面形貌可以减小光波在薄膜表面的散射损失, 对反射率的影响随之降低。

在 2 μm × 2 μm 的范围内, RuO₂ 薄膜“过渡模式”和“氧化模式”下的表面粗糙度为 268 μm 和 246 μm ; TiO₂ 薄膜“过渡模式”和“氧化模式”下的粗糙度为 151 μm 和 100 μm 。根据(1)式, 相对粗糙的 RuO₂ 薄膜, 将对 EUV 多层膜的反射率造成更大的损失。因此, 选择 TiO₂ 作为保护层材料进一步测试, 并制备于 Mo/Si 多层膜上, 评估其对反射率的影响。

图 5 为 SEM 对 TiO₂ 薄膜横截面的观测结果, 图 5(a) 为“过渡状态”下的 TiO₂ 薄膜。膜层中有白色斑块, SEM 本身对导电性能强的物质敏感, 结合图 3(b) 的结果, 斑块为没有反应完全的 Ti 结晶颗粒。而氧化状态下的 TiO₂ 薄膜呈非晶状态, 膜质均匀、致密。

2.2.3 对 TiO₂ 薄膜组分的影响

利用 XPS 对“过渡状态”和“氧化状态”的 TiO₂ 薄膜进行组分分析。图 6(b) 为 Ti2p 位置的高分辨图谱。

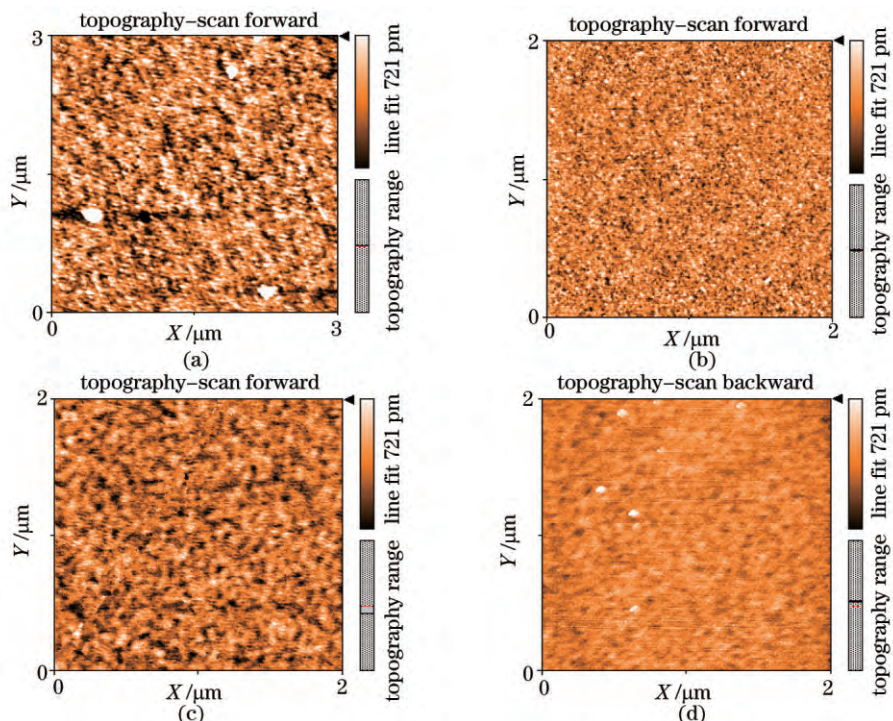


图 4 (a)“过渡模式”下的 RuO_x 薄膜的表面粗糙度 268 pm; (b)“氧化模式”下的 RuO₂ 薄膜的表面粗糙度 246 pm; (c)“过渡模式”下的 TiO_x 薄膜的表面粗糙度 151 pm; (d)“氧化模式”下的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度 100 pm

Fig.4 (a) RuO_x films surface roughness of “transition mode” is 268 pm; (b) RuO₂ films surface roughness of “oxide mode” is 246 pm; (c) TiO_x films roughness of “transition mode” is 151 pm; (d) TiO₂ films surface roughness of “oxygen mode” is 100 pm

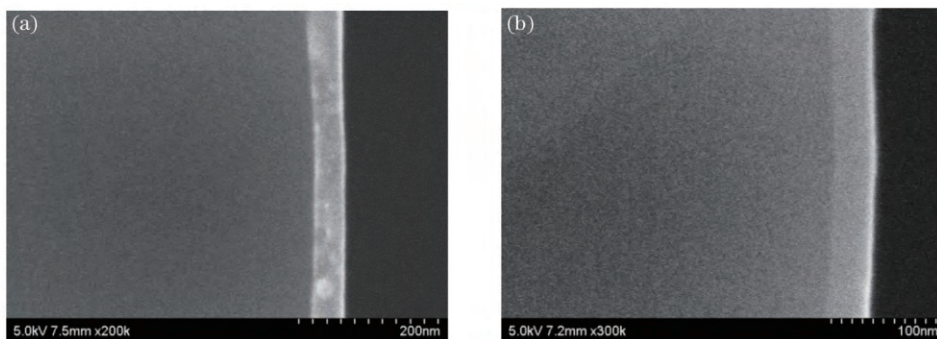


图 5 (a)“过渡状态”TiO_x 薄膜截面的 SEM 扫描结果; (b)“氧化状态”TiO₂ 薄膜截面的扫描结果

Fig.5 (a) Cross section of “transition mode” TiO_x films with SEM; (b) cross section of “oxygen mode” TiO₂ films with SEM

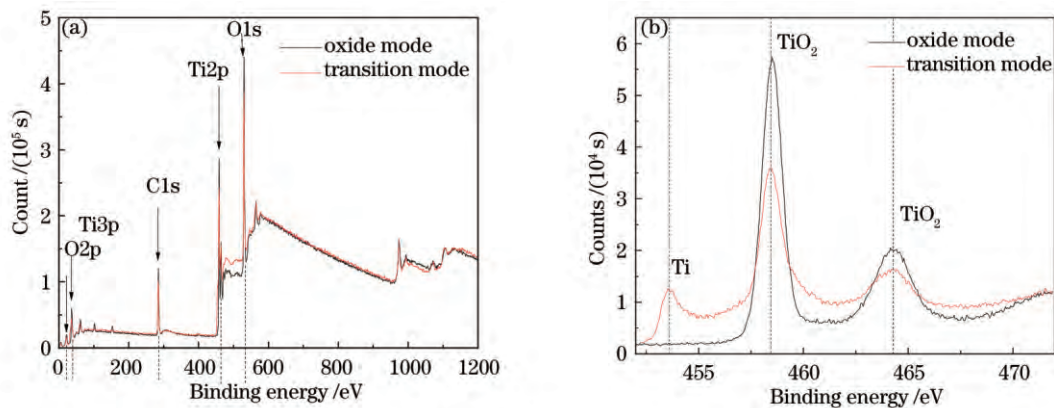


图 6 XPS 对不同充氧量的 TiO₂ 薄膜的测量结果。(a) 两种状态下薄膜的 XPS 结果; (b) Ti_{2p} 结合能位置的高分辨

Fig.6 XPS analysis results of TiO₂ films in different oxygen flows; (a) XPS energy spectra of two modes; (b) high resolution of Ti_{2p} binding energy position

根据 Ti 氧化程度的不同, Ti 出现不同的价态, 即 Ti^0 、 Ti^{2+} 、 Ti^{3+} 、 Ti^{4+} , 其中结合能的微小偏差是由于 TiO_2 晶格结构不同造成的。

对“氧化模式”下的 TiO_2 薄膜在 $Ti2p$ 和 $O1s$ 位置进行分峰拟合处理(如图 7 所示)。经测试, 在含 Ti 化合物中 TiO_2 的含量为 97.2%, 其余为 TiO 、 Ti_2O_3 和 Ti 组成的混合物。 O/Ti 的化学计量比为 2.34, 相比理想比例的 TiO_2 薄膜, 较多氧原子来自制备过程中混入的含氧化合物, 而 95% 以上 TiO_2 能够保证薄膜的化学性能^[16-19]。图 7(a)中, 拟合曲线(simu line)与实验曲线(raw line)的拟合精度高于 99%。其中 $Ti2p_{3/2}$ 位置的结合能分别为 458、458.3、458.5、458.75 eV, 对应 TiO_2 中 Ti^{4+} ; $Ti2p_{1/2}$ 位置的结合能为 464.2、460.65 eV, 对应 TiO_2 中 Ti^{2+} 。采用原子灵敏度因子法对各种化学态的 Ti 和 O 元素进行定量分析, 其中 $Ti2p_{3/2}$ 和 $O1s$ 的灵敏度因子分别为 5.22 和 2.93。结果表明, 薄膜中 TiO_2 的含量占全部含 Ti 化合物的 97.2%。但 $O1s$ 位置的分析极易受到其他含氧化合物的干扰, 因此 $O1s$ 位置不适宜定量分析 TiO_2 薄膜化学组成。

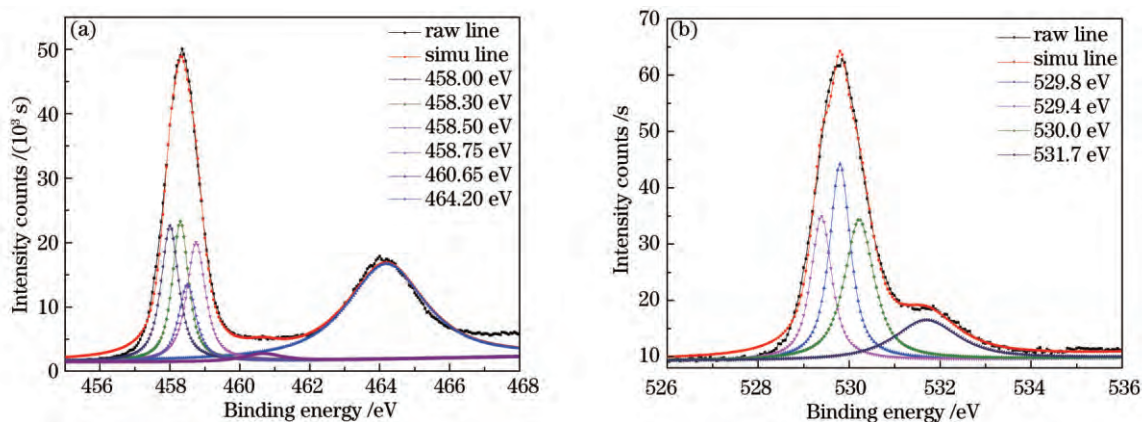


图 7 (a) $Ti2p$ 位置的分峰结果; (b) $O1s$ 位置的分峰结果

Fig.7 (a) $Ti2p$ energy region of XPS data spectra; (b) $O1s$ energy region of XPS data spectra region

2.2.4 2 nm TiO_2 薄膜对 Mo/Si 反射率的影响

取三个周期数均为 60, 反射率相同的 Mo/Si 多层膜, 将 2 nm 和 5 nm 厚度的 TiO_2 分别镀制在其中两个多层膜的表面, 另一个作为对照样品。通过 X 射线-紫外(XUV)光谱仪同时测量三个样品的反射率(入射角 10°)。利用 IMD 软件, 模拟不同厚度的 TiO_2 层对 Mo/Si 多层膜反射率的影响, 并与实验值进行对比。

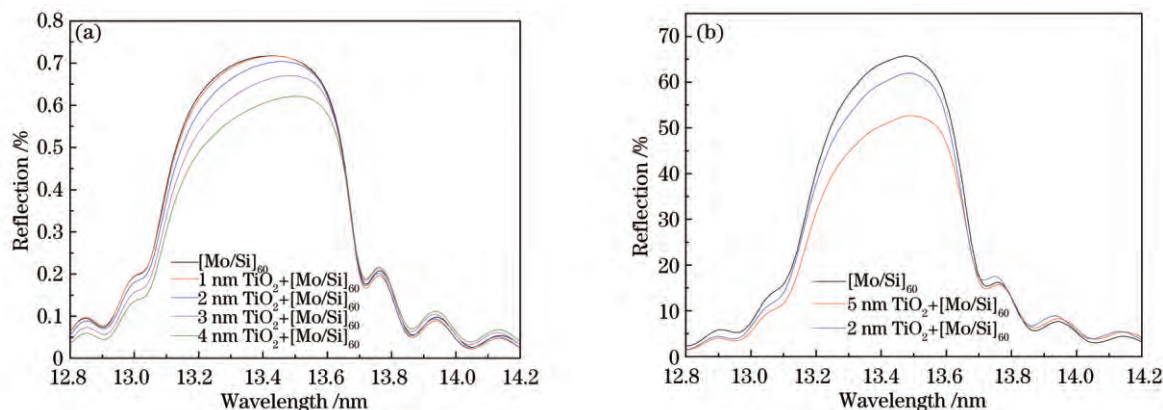


图 8 (a) 模拟不同 TiO_2 厚度保护层的多层膜反射率比较结果(入射角 10°); (b) 镀有 2 nm, 5 nm TiO_2 保护层的多层膜样品以及参照样品的反射率测量结果(入射角 10°)

Fig.8 (a) Simulation values of reflectivities (angle of incidence is 10°) of different TiO_2 thicknesses; (b) measuring values of reflectivities (angle of incidence is 10°) of 2 nm and 5 nm TiO_2 thicknesses

理论计算模拟结果显示, 保护层厚度达 2 nm 以上时, 反射率出现较大幅度降低。由于制备过程中膜厚的误差以及不同膜层间的材料融合现象, 实验结果与理论值有所偏差, 但下降幅度与理论计算结果的趋势保持一致。当 TiO_2 膜厚度达 2 nm 时, 多层膜在 13.5 nm 的峰值反射率下降 4.5%, 介于实际利用的范围。

3 结 论

采用反应磁控溅射工艺,制备带有金属氧化物保护层的 Mo/Si 多层膜。控制充入的 O₂量是决定多层膜整体性能的关键因素,在保证金属靶材与 O₂气充分反应的基础上,尽可能降低 O₂量,以减少下层多层膜的氧化,进而降低多层膜在 EUV 波段的反射率损失。根据溅射电压与 O₂气流量组成的“迟滞回线”关系,制备 TiO₂的 O₂工作点选取在 O₂流量减少阶段且电压平稳的氧化模式下进行。结合相关优化工艺,得到的 TiO₂纯度为 97.2%, 2 μm×2 μm 表面粗糙度优于 100 pm,膜质致密、均匀的非晶态 TiO₂薄膜。同时结合实验现象,分析了 TiO₂和 RuO₂的“迟滞过程”差异“明显”的主要原因是这两种金属及其氧化物的二次电子发射系数不同造成的。并且制备了带有 2 nm TiO₂保护层的 Mo/Si 多层膜,而在 13.5 nm 处的峰值反射率下降 4.5%,介于实际可利用的范围。

参 考 文 献

- 1 E M Theodore, S F Nadir, V Y Boris, *et al.*. Surface phenomena related to mirror degradation in extreme ultraviolet (EUV) lithography [J]. Appl Surface Sci, 2006, 253(4): 1691-1708.
- 2 Yang Xiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao. Multilayers on extreme ultraviolet lithography masks and illumination error [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 667-670.
杨 雄, 金春水, 张立超. 极紫外投影光刻掩膜的多层膜与照明误差[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 667-670.
- 3 Chen Bo, Ni Qiang, Wang Junlin. Soft X-ray and extreme ultraviolet optics in CIOMP [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(12): 1862-1868.
陈 波, 尼启良, 王君林. 长春光机所软 X 射线-极紫外波段光学研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(12): 1862-1868.
- 4 Jin Chunshui. The Key Investigation on Extreme Ultraviolet Lithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
金春水. 极紫外投影光刻中若干关键技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- 5 J Hollenshead, L Klebanoff. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics [J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2006, 24(1): 64-82.
- 6 E K Leonard, M E Malinowski, W M Clift, *et al.*. Radiation-induced protective carbon coating for extreme ultraviolet optics [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, B, 2002, 20(2): 696-703.
- 7 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Li Fo, *et al.*. Analysis of the reflective performance of EUV multilayer under the influence of capping layer [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2368-2372.
王洪昌, 王占山, 李 佛, 等. 帽层对极紫外多层膜反射特性影响分析[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2368-2372.
- 8 S Bajt, H N Chapman, N Nguyen, *et al.*. Design and performance of capping layers for EUV multilayer mirrors [C]. SPIE, 2003, 5037: 236-248.
- 9 O Hiroaki, L Akira, M Kumi, *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of surface Ru oxide formed by extreme ultraviolet irradiation of Ru-capped multilayer mirrors in H₂O ambience [J]. J Appl Phys, 2007, 46(7L): L633-L635.
- 10 M Kumi, O Hiroaki, M Shinji, *et al.*. Cleaning technology for EUV multilayer mirror using atomic hydrogen generated with hot wire [J]. Thin Solid Film, 2008, 516(5): 839-843.
- 11 Zhou Hongjun, Zhong Pengfei, Huo Tonglin, *et al.*. Cleaning of carbon contamination on Si wafer with activated oxygen by synchrotron radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 90(3): 907-910.
周洪军, 钟鹏飞, 霍同林, 等. 同步辐射活化氧清洗碳污染的研究[J]. 光学学报, 2010, 90(3): 907-910.
- 12 S Matsunari, Y Kakutani, T Aoki, *et al.*. Durability of capped multi-layer mirrors for high volume manufacturing extreme ultraviolet lithography tool [C]. SPIE, 2009: 7271.
- 13 Zhao Qingnan. Preparation and Characterization of TiO₂ Films, TiO₂/TiN/TiO₂ Multi-Films Coated on Glass Substrates by Reactive Sputtering [D]. Wuhan: Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, 2004.
赵青南. 溅射法玻璃基 TiO₂ 膜、TiO₂/TiN/TiO₂ 复合膜制备及其结构和性能表征[D]. 武汉: 武汉理工大学硅酸盐工程教育部重点实验, 2004.
- 14 H Toku, R S Pessoa, H S Maciel, *et al.*. The effect of oxygen concentration on the low temperature deposition of TiO₂ thin films [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(10): 2126-2131.

- 15 Zhou Jicheng, Rong Linyan, Zhao Baoxing, *et al.*. Influence of oxygen flow on structure and optical properties of TiO_x films [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(1): 138-143.
周继承, 荣林艳, 赵保星, 等. 氧气流量对TiO_x薄膜结构和光学特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版)2010, 41(1): 138-143.
- 16 H L Cui, Z H Wei, C Y Yang, *et al.*. Black TiO₂ nanotube arrays for high-efficiency photo electro chemical water-splitting [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(23): 8612-8616.
- 17 Zhu Lei, Chui Xiaoli, Shen Jie, *et al.*. Visible light photoelectrochemical response of carbon-doped TiO₂ thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering [J], Acta Physico-Chimica Sinica, 2007, 23(11): 1662-1666.
朱 蕾, 崔晓莉, 沈 杰, 等. 直流反应磁控溅射方法制备碳掺杂TiO₂薄膜及其可见光活性[J]. 物理化学学报, 2007, 23(11): 1662-1666.
- 18 Zhu Wenxiu, Jin Chunshui, Kuang Shangqi, *et al.*. Design and fabrication of the multilayer film of enhancing spectral-purity in extreme ultraviolet [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1031002.
祝文秀, 金春水, 匡尚奇, 等. 提高极紫外光谱纯度的多层膜设计及制备[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1031002.
- 19 Y L Sergiy, B nicolas, F Torsten, *et al.*. Mo/Si multilayers with enhanced TiO₂ and RuO₂ capping layers [C]. SPIE, 2008, 6921: 692118.

栏目编辑: 张浩佳