

文章编号 1004-924X(2026)07-1087-10

基于双离子束溅射沉积工艺优化的 极紫外多层反射薄膜界面质量提升

陈艺勤^{1*}, 冀 鸣², 邵 秋¹, 刘伟基², 李弋舟³, 段辉高^{1*}

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院 国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082;

2. 佛山市博顿光电科技有限公司, 广东 佛山 528200;

3. 长沙韶光芯材科技有限公司, 湖南 长沙 410119)

摘要:在 Mo-Si 多层膜沉积过程中, Mo 与 Si 原子间的自发热力学混合极易生成硅化物过渡层。与此同时, 微观起伏也会
在多周期生长的累积效应中不断放大。这种层间相互扩散与界面粗糙度会急剧削弱光学界面的折射率对比度, 从而显
著降低多层膜的整体反射性能与光刻效率。针对这一问题, 深入剖析了界面扩散与薄膜生长的微观物理机制, 提出一种
斜角沉积与掠角刻蚀相结合的复合优化工艺方法。通过对传统双离子束溅射系统进行深度的定向硬件改造, 实现了对
溅射粒子能量与入射轨迹的精准调控。实验结果表明, 在无需引入额外界面扩散阻挡层(避免了阻挡层带来的光吸收损
耗)的条件下, 该方法成功将 Mo-Si 界面的扩散层厚度大幅压减至 0.6 nm, 层间粗糙度严格控制在 0.2 nm 以下, 为 EUV
高反射 Mo-Si 多层膜系制造提供了潜在可行的工艺指导。

关键词: Mo-Si 多层反射膜; EUV 光刻; 双离子束溅射沉积; 斜角沉积; 掠角刻蚀

中图分类号: O434.2; O484 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263407.1087 CSTR: 32169.14.OPE.20263407.1087

Improving of interfacial quality of extreme ultraviolet multilayer reflective film based on process optimization of dual ion beam sputtering deposition

CHEN Yiqin^{1*}, JI Ming², SHAO Qiu¹, LIU Weiji², LI Yizhou³, DUAN Huigao^{1*}

(1. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, College of Mechanical and
Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Foshan iBD Tech. Co., Ltd., Foshan 528200, China;

3. Shaoguang Global Blankmask Technology Co., Ltd., Changsha 410119, China)

* Corresponding author, Email: cheniyiqin@hnu.edu.cn; duanhg@hnu.edu.cn

Abstract: In the fabrication of Mo-Si multilayers, achieving smooth and sharp interfaces is critical for real-
izing high reflectivity in extreme ultraviolet (EUV) light, as atomic intermixing between adjacent Mo and

收稿日期: 2026-01-20; 修订日期: 2026-03-03.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2024YFB3408803); 国家自然科学基金资助项目(No. 52475449); 湖南省自
然科学基金资助项目(No. 2024JJ5073); 松山湖材料实验室开放课题基金资助项目(No. 2023SLABFN01)

Si layers along with microscopic interfacial fluctuations can significantly degrade EUV reflectivity. To address this challenge, we propose a process portfolio that combines angular deposition with flood ion beam etching to enhance interface quality. By utilizing stage modifications in dual ion beam sputtering, the incident angle of the sputtered atom flux during deposition and the parameters of the auxiliary ion beam for polishing can be precisely controlled to suppress intermixing and interfacial fluctuations. Experimental results show that the thickness of the intermixing layer is reduced to 0.6 nm, and interfacial roughness is suppressed to 0.2 nm using this approach. This method fundamentally improves the interfacial quality of Mo-Si multilayers and offers a practical solution for the fabrication of high-reflectance EUV optics.

Key words: Mo-Si multilayer reflective film; EUV lithography; dual ion beam sputtering deposition; oblique angle deposition; glancing angle etching

1 引 言

光刻技术的发展是推动集成电路前进的核心动力,其光源波长直接决定了芯片的关键尺寸及晶体管密度。在 5 nm 及以下制程节点,基于 193 nm 深紫外光源的分辨率增强技术,如离轴照明、相移掩模与多重曝光等,面临着光刻成本剧增的难题。13.5 nm 极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光源的问世则显著降低了光刻成本^[1]。然而,由于绝大部分材料具有高折射率虚部,对 EUV 光存在极高的吸收损耗^[2-5]。因此,传统的折射式元件无法用于操控 EUV 光。

EUV 反射镜是采用多周期交替堆叠的钼(Mo)和硅(Si)纳米薄膜构建的一维人工晶体结构,通过多层膜界面处的反射光相干叠加,以实现特定波长的反射率最大化。理论上,这种 Mo-Si 多层反射膜系的反射率可达到 75%^[6-8]。然而,即使按照理论反射率构建 EUV 光刻系统,也仅有 2% 的 EUV 光源能量投射到光刻基底上,因此, EUV 光学元件镀膜的核心目标是获得高反射率的 Mo-Si 多层膜系。在实际情况中,界面粗糙度^[9-11]上升及 Mo-Si 合金化引起的相互扩散均会导致 13.5 nm 波长处的反射率下降^[12-13],如何实现超光滑、清晰的 Mo-Si 层界面是提升多层膜反射率的关键。

双离子束溅射是目前工业界镀制低缺陷 EUV 多层反射膜系的常用方案。一方面,该技术具有增减材协同加工的独特优势,通过多次反复增减材加工,以消除基底及靠近底层膜系中的

缺陷(例如凹坑、纳米颗粒等)^[14];另一方面,工位的多自由度为制备工艺提供了更大的参数调控空间^[15-16]。然而,离子束溅射出载能的 Mo 和 Si 原子容易与下层发生合金反应,造成 Mo/Si 间相互扩散,破坏理想的膜系结构,导致界面粗糙度增大。

综上所述,基于双离子束溅射沉积技术,优化超光滑、低扩散 Mo-Si 界面的制备工艺是目前多层反射膜的制造目标。本文将常规的平面行星运动卡具改装成双自由度的大摆角公转卡具,增加了工件在真空腔室的运动自由度,扩增出主源斜角溅射沉积及辅源掠角刻蚀的工艺能力,拓展了 Mo-Si 多层膜系沉积的工艺参数维度。运用改造后的运动控制系统研究了不同沉积角、刻蚀角对界面扩散厚度及粗糙度的影响,并通过工艺优化获得了低扩散、低粗糙的高质量 Mo-Si 界面。

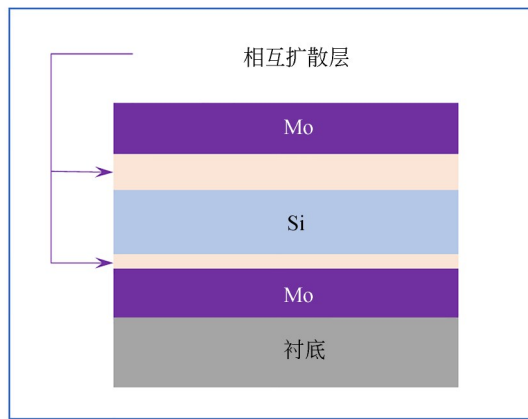
2 Mo-Si 界面质量对 EUV 反射光谱的影响

为了量化评估界面质量对 EUV 反射率的影响,采用 IMD 软件进行仿真评估^[17]。如图 1 所示,通过量化仿真变量评估了界面扩散厚度及粗糙度两个参量对 Mo-Si 多层膜反射率的衰减程度。设定多层膜系周期为 7 nm,其中, Mo 和 Si 层分别为 4.2 nm 及 2.8 nm,周期数为 40。在离子束溅射沉积相邻的 Mo 与 Si 层时,界面存在相互扩散,如图 1(a)所示。为了逼近实际情况,在

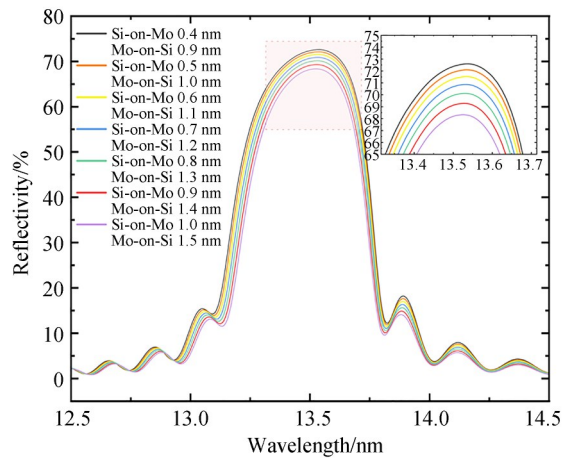
Mo与Si两界面处设置了不对称厚度的扩散层,因为相比Si沉积在Mo上,Mo沉积在Si上更容易发生相互扩散^[18]。如图1(b)所示,随着界面扩散层厚度的增加,反射峰值从72.5%降至68%,主要源于扩散层降低了Mo与Si的折射率对比度 Δn ,但并未引起反射峰的变化。为了研究界面粗糙度对反射率的影响,构建模型未考虑界面粗糙度,这里采用更为简单的无扩散模型进行仿真评估。图1(c)展示了Mo-Si界面的粗糙度,即空间高频起伏。如图1(d)所示,随着粗糙度增大,反射率峰值呈现出快速下降的趋势。当 σ 从0增至0.8 nm时,反射率峰值从72.5%降至66%。然而,当 σ 从0.8 nm增至1.5 nm时,反射率峰值却

从66%骤降至35%。由于大起伏界面的高频结构对短波长电磁波的散射截面更高,当界面粗糙度 $\sigma > 0.8$ nm时(超过13.5 nm波长的1/20),散射损耗尤为显著。除反射率峰值的骤降外,反射峰位从13.6 nm蓝移至13.45 nm,因为粗糙界面相当于在Mo-Si镶嵌的界面附近形成一个折射率渐变层,不仅意味着界面折射率的对比度降低,且反射率降低。另外,这种高粗糙度也会导致膜层的有效光学厚度变化。

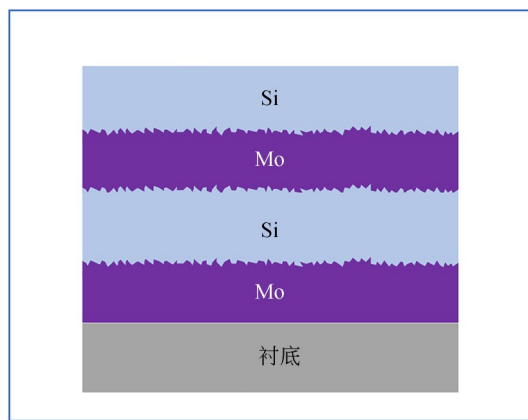
为了使沉积膜层结构特征更加符合实际情况,在仿真评估时同时引入非对称的界面相互扩散及粗糙度。如图2所示,在图1膜层结构的基础上,仅将界面粗糙度增大至 $\sigma = 0.3$ nm,在扩散



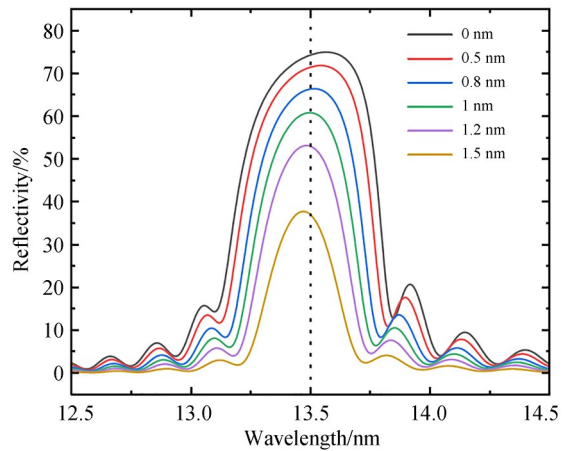
(a) Mo-Si扩散层
(a) Mo-Si diffusion layer



(b) 界面扩散厚度对反射率的影响
(b) Effect of interface diffusion thickness on reflectivity



(c) Mo-Si界面粗糙度
(c) Mo-Si interface roughness



(d) 粗糙度对反射率的影响
(d) Effect of roughness on reflectivity

图1 Mo-Si多层膜的界面质量对EUV反射率的影响

Fig. 1 Effect of interfacial quality of Mo-Si multilayers on EUV reflectivity

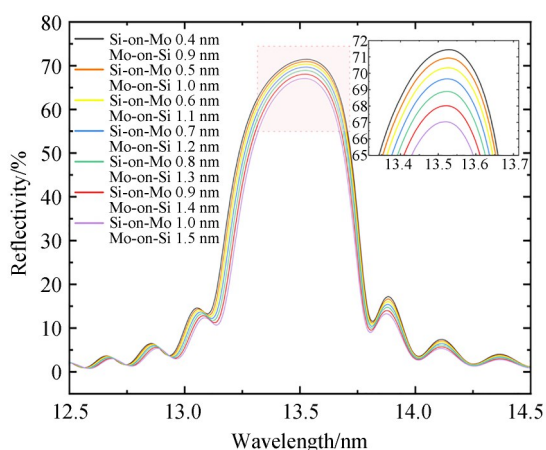


图2 粗糙度 $\sigma=0.3$ nm时不同非对称界面扩散厚度的 EUV 反射光谱的变化

Fig. 2 Variation of EUV reflectance spectra with thicknesses of interface diffusion layer at $\sigma=0.3$ nm

层厚度分别为 0.4 nm 和 0.9 nm 情况下,相比于理想界面,反射率峰值从理论极限的 72.5% 降至 71%。当界面扩散厚度逐渐增至 1 nm 及 1.5 nm,反射率峰值从 71% 降低至 66.5%。这种单个膜系的反射率轻微下降是可以忽略的,但 EUV 光经过 11 个这类膜系后,投影至晶圆表面

的 EUV 光子数将损失 50%,这导致白噪声升高,产率下降。由此可见,超光滑、低扩散界面是提升 Mo-Si 多层膜反射率的关键。

3 装备改进

本文中改造的设备是佛山市博顿光电科技有限公司的“天玑”双离子束溅射沉积系统,主要用于激光膜系镀制。该系统是采用偏置溅射的设备基础构型,离子束轰击呈 45° 角的靶材面,卡具系统是可沿着竖直轴做 $\pm 15^\circ$ 小角度摆动的四行星运动机构。为获得超光滑、低扩散的离子束溅射沉积 Mo-Si 界面,将传统的离子束溅射沉积系统中小角度摆动的行星卡具改造成可做 360° 回转的公转卡具,如图 3 所示。改造后的卡具摆动转轴与辅助离子源相对位置更居中,以保证在不同刻蚀角时离子束辐照可覆盖不同转角姿态下的卡具表面。该卡具运动控制系统不仅能够实现 $0\sim 90^\circ$ 沉积角可调(见图 3(a)),而且能够满足 $0\sim 90^\circ$ 斜角离子束抛光的工艺需求(见图 3(b)),大幅提升了工艺维度及调控能力。

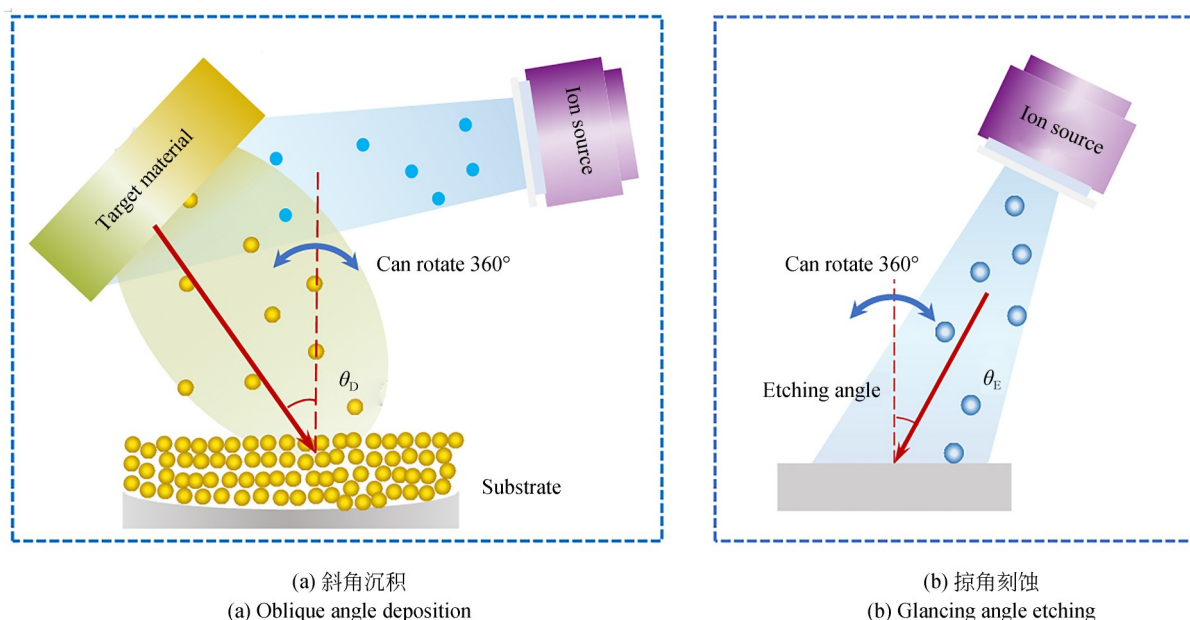


图3 面向高品质 Mo-Si 多层膜界面优化的双离子束溅射沉积系统中斜角沉积和掠角刻蚀的加工示意图

Fig. 3 Processing schematics of angular deposition and etching in dual ion-beam sputtering system for Mo-Si multilayer fabrication with high-quality interface

4 斜角沉积

基于上述装备改造拓展出的工艺调控能力,主要研究溅射沉积角度及刻蚀角度对Mo-Si多层膜界面质量的影响^[19-20]。由于Mo-Si界面扩散主要源于溅射出的载能原子在下层中的注入效应而非热作用^[21],故采用低能量溅射斜角沉积的工艺优化途径降低Mo-Si的界面扩散及粗糙度^[22-23]。低能量离子束(能量为200 eV)溅射出的Mo与Si原子能量分别为28 eV和8 eV,并以5°沉积角沉积在下层的Si与Mo层表面。这种具有能量的溅射原子依然会注入到膜层中,形成的扩散层厚度分别为1.2 nm和0.23 nm,而溅射出的Si原子能量更低,故Si在Mo上的扩散层厚度薄于Mo在Si上的扩散层厚度^[24]。

为解决溅射沉积原子能量高导致的界面扩

散增厚,利用工件盘的可大角度回转优势改变溅射原子蒸气与衬底的夹角,降低入射原子在下层材料中的扩散厚度,研究了沉积角对界面扩散层厚度的影响。为了避免过度界面扩散导致多层膜结构坍塌,设置5对周期为20 nm的Mo-Si多层膜(Mo 10 nm;Si 10 nm)为基础膜系结构。采用X射线反射谱(X-ray Reflectivity, XRR)对不同沉积角的Mo-Si多层膜样品进行界面分析^[25-26]。如图4(a)所示,不同样品的XRR角谱测试曲线中不同阶谐振峰位一致,说明样品间的各膜层厚度一致,证明了离子束溅射的沉积速率稳定^[27]。在沉积角为30°和45°时,高阶谐振峰信号强度较高,其中沉积角为30°时振荡峰衰减最慢,且在高角度的振荡峰信号强度最为清晰。相较于30°和45°,沉积角为20°时,高角度的振荡峰强信号衰减较快,说明样品中Mo-Si界面粗糙度

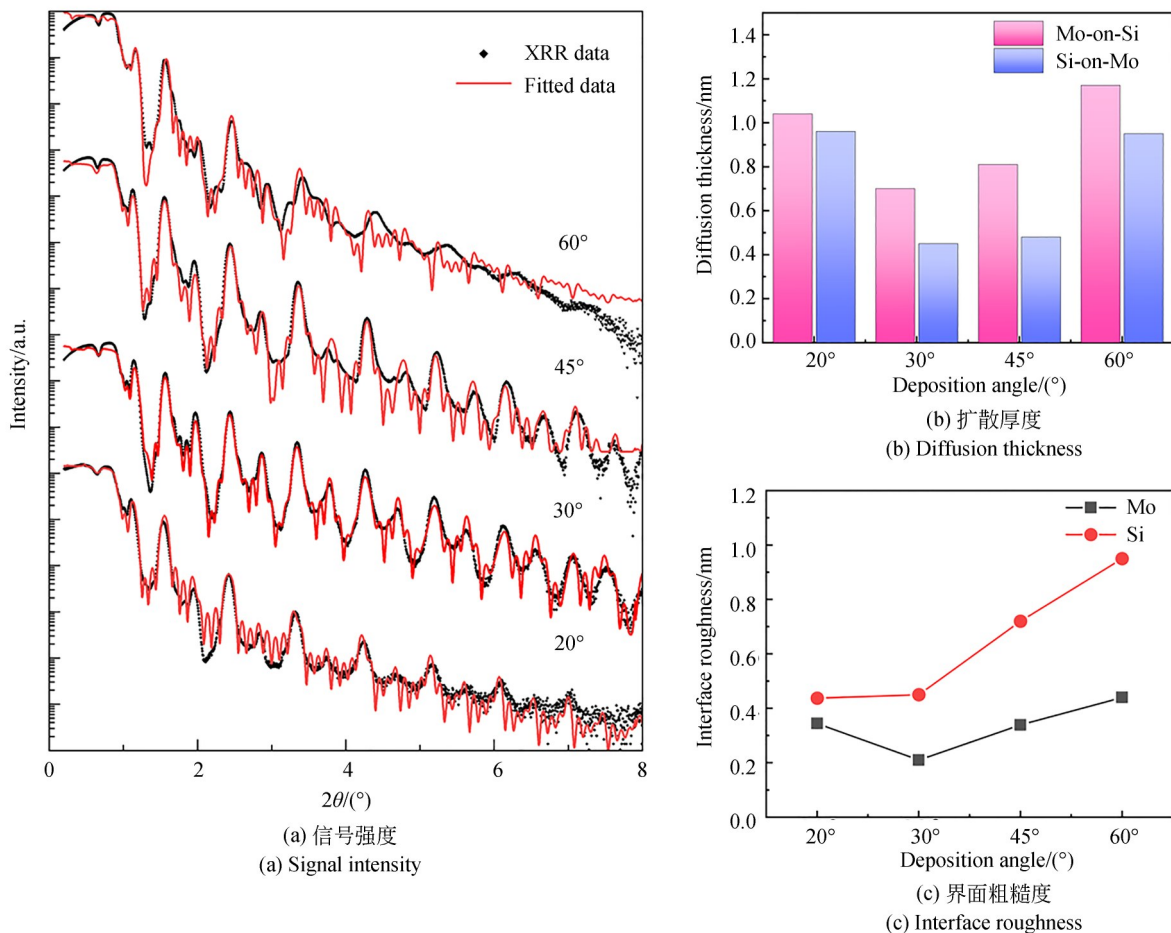


图4 采用斜角沉积优化工艺后Mo-Si多层膜的界面质量

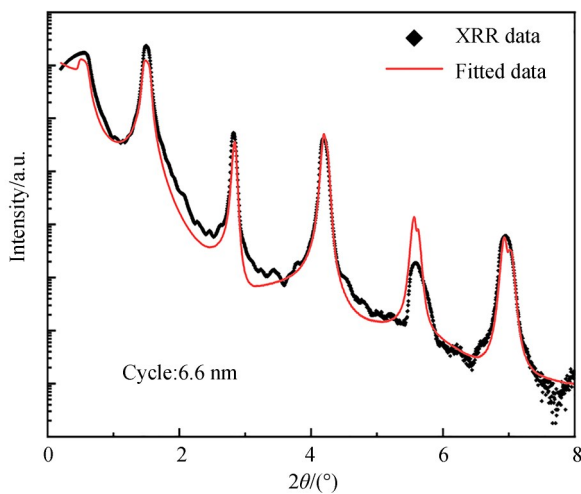
Fig. 4 Interface quality of Mo-Si multilayer film after adopting oblique deposition optimization process varies with deposition angle

增加,界面的扩散层厚度增厚,这主要归结于在较小沉积角时的注入效应。沉积角为 60° 时,振荡峰信号衰减最快,且高角振荡峰(反射角 $>3^\circ$)几乎消失,说明界面粗糙度相较于 20° 时更大。如前文所述,沉积沿着薄膜表面的切向运动有利于横向生长成膜,但是沉积角度过大时,薄膜沉积速率过低,原子在下层膜层表面的浸润性更差,导致沉积原子在表面团聚行为占主导,界面扩散加剧。因此,IBS溅射斜角沉积需要在一个较为合适的角度范围内,才可平衡注入及浸润两个过程。若这个平衡被打破,都会造成Mo-Si界面扩散加剧。

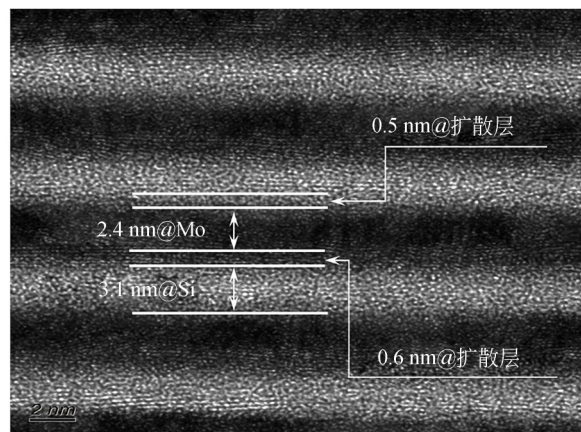
为了进一步分析沉积角对Mo-Si界面质量的影响,对不同沉积角制备多层膜的XRR实验测试结果进行数据拟合。如图4(b)所示,当沉积角为 30° 时,无论Mo在Si上还是Si在Mo上,扩散厚度均达到极小值。相较于 20° 沉积角,界面扩散厚度降低了30%(Mo在Si上)和50%(Si在Mo上)。与此同时,斜角沉积不仅降低了界面扩散,同时也降低了界面粗糙度。如图4(c)所示,XRR数据拟合得到的界面粗糙度展示了不同沉积角对界面粗糙度的影响。由于Si的表面能较低,在 $20^\circ\sim 30^\circ$ 沉积角内,界面粗糙度未随沉积角的变化而变化,这主要是因为在该沉积角区间内,溅射的Si原子沉积在Mo层表面的浸润性及成膜行为受沉积角的影响不大。当沉积角 $>30^\circ$

时,一方面,更低的沉积速率导致吸附的Si原子浸润性遭到破坏;另一方面,大沉积角时,溅射出的原子垂直于膜层方面的动能分量减小,Si原子在Mo表面的浸润性降低。Mo的表面能较大,在小沉积角($20^\circ\sim 30^\circ$)时,斜角沉积提供了沿膜层面内的动能,改善了Mo原子在Si层表面迁移能力,同时,垂直方向的动能仅小幅度下降,对Mo的浸润性影响显著,从而降低了Mo层沉积的成膜阈值,改善了界面粗糙度。沉积角度过大时,浸润性和成膜性都有所降低,导致界面粗糙度上升。因此,沉积角度为 30° 时能够获得最低界面扩散及界面粗糙度的溅射沉积工艺参数。

为展现斜角沉积对实际Mo-Si多层反射膜界面扩散及粗糙度的改善效果,在周期为7 nm的50对Mo-Si多层膜的结构中进行实验验证。如图5(a)所示,在溅射离子束能量为200 eV及沉积角为 30° 的工艺参数下进行沉积,膜系的XRR拟合振荡峰尖锐,说明界面扩散较低,XRR拟合数据分析得知Mo在Si上的扩散层厚度约为0.66 nm,其界面粗糙度为0.38 nm;Si在Mo上的扩散层厚度约为0.43 nm,其界面粗糙度为0.18 nm。为进一步验证XRR分析的准确性,对50对周期的样品进行了TEM截面表征。图5(b)展示了高分辨明场下的TEM截面照片,其单个周期内:Mo层厚度为2.4 nm,Si层厚度为3.1 nm,Si上的扩散层厚度为0.6 nm,Mo上的扩散



(a) 信号强度
(a) Signal intensity



(b) 截面表征
(b) Section representation

图5 斜角沉积制备的40对周期的Mo-Si多层膜

Fig. 5 Forty-pair Mo-Si multilayer film fabricated by angular deposition process

层厚度为 0.5 nm,与 XRR 拟合得到的表征结果吻合。对比实验表明,斜角沉积可作为一种改善 Mo-Si 多层膜界面质量的工艺方法。

5 掠角刻蚀

通过调控离子束溅射沉积角能够改善 Mo-Si 多层膜界面质量,但 DIBS 系统的独特优势就在于可以通过双离子束对沉积的薄膜进行增减材原位复合加工,实现更低粗糙度膜层的镀制。为获得更光滑的界面,运用辅助离子源对溅射沉积后的 Mo 和 Si 膜层表面进行抛光^[28-30],进一步提升界面质量。在选择抛光用的离子束能量时,为了避免微晶生长和薄膜溅射造成的膜层厚度变化,采用低离子能量^[31-32]。因此,使用能量为 200

eV 离子束抛光 Mo 与 Si 膜层表面。如图 6(a)所示,随着刻蚀角(离子与基底法线的夹角)增加,刻蚀效率下降,两种材料抛光速率依次降低。无论 Mo 还是 Si,其表面粗糙度均随着刻蚀角度的增加有所改善(见图 6(b))。为了兼顾抛光效率及粗糙度,选用 30°抛光角。更低离子束刻蚀速率在单膜层厚度仅为几纳米的表面进行抛光有利于膜层粗糙度的控制和抛光加工余量的预留。同时,较大刻蚀角度有助于获得更光滑的抛光表面。刻蚀角度与沉积角保持一致,尽可能实现同工位离子束增减材工艺。溅射沉积中界面扩散现象可以通过离子束抛光工艺得到缓解。为了获得更高的界面质量,选用具有 5 个周期,周期为 20 nm 的 Mo-Si 多层膜样品(其中,Mo 与 Si 层厚度相同),分别对沉积的 Mo 和 Si 层进行抛光处

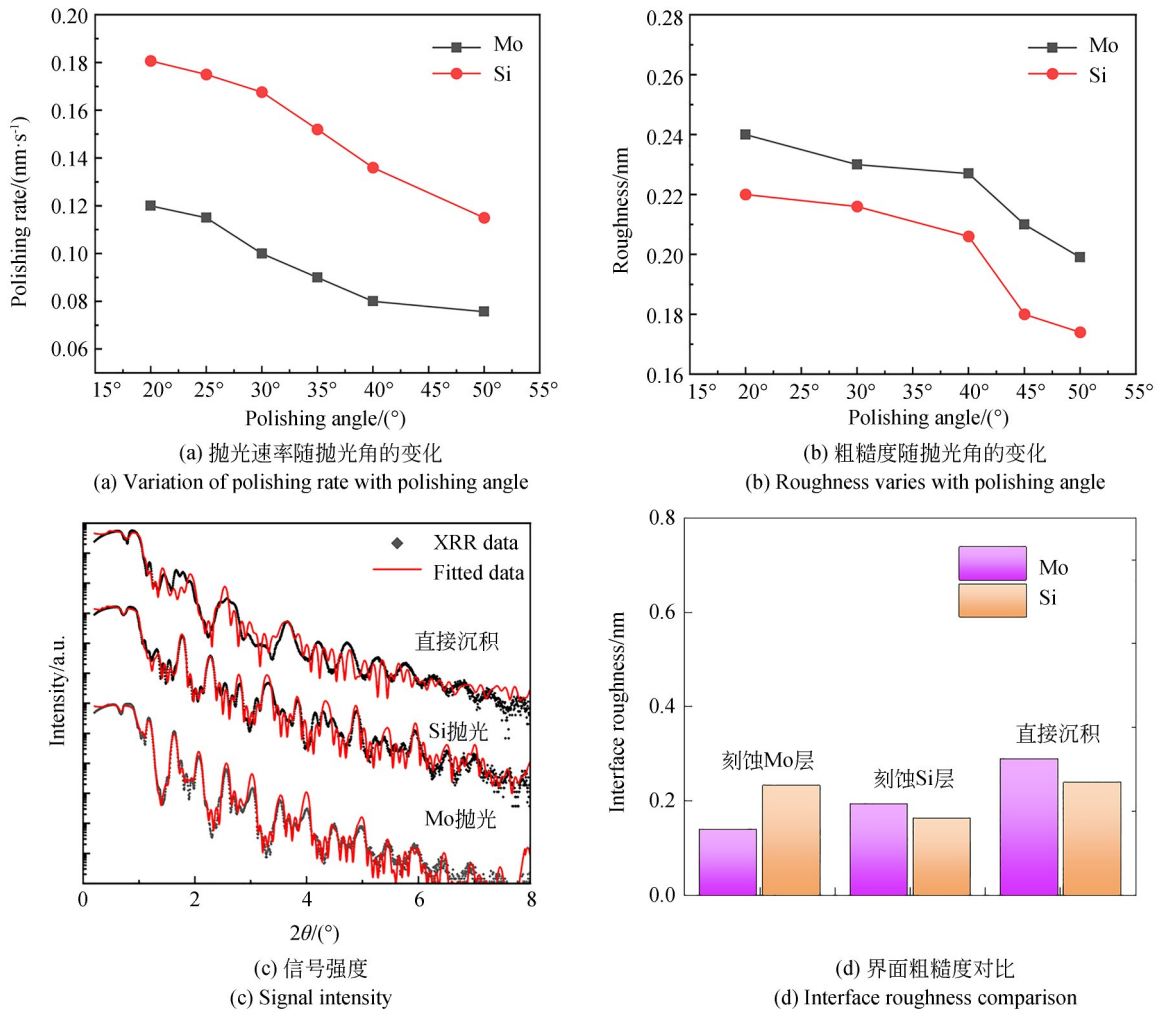


图 6 辅助离子源对沉积的 Mo 与 Si 表面进行掠角刻蚀后界面质量的改善
 Fig. 6 Optimization of interface quality in Mo-Si multilayer using glancing ion beam etching

理。图 6(c)展示了直接沉积和分别掠角刻蚀 Si, Mo 表面的多层膜样品 XRR 数据。掠角刻蚀工艺的样品 XRR 高阶谐振峰信号强度明显比直接沉积的样品高,说明对 Mo 与 Si 界面的掠角刻蚀能有效降低 Mo-Si 界面粗糙度。通过对图 6(d)中 XRR 数据拟合分析发现,对 Si 层抛光后,Mo-on-Si 和 Si-on-Mo 的界面扩散层厚度分别是 0.58 nm, 0.34 nm, 界面粗糙度分别为 0.18 nm 与 0.15 nm;然而,对 Mo 层进行抛光,相较于对 Si 层,样品的界面质量大幅度降低,Mo-on-Si 与 Si-on-Mo 的界面扩散层厚度为 0.76 nm 及 0.64 nm, 界面粗糙度为 0.14 nm 与 0.24 nm。

对照实验表明,对 Si 层抛光后,界面扩散的不对称性减弱,并可获得更光滑的界面。使用低能离子束的抛光工艺有效提升界面质量的关键在于离子束掠角刻蚀不仅具有“削峰填谷”的平滑效应,降低界面粗糙度,而且能夯实表面原子,减缓 Mo-Si 的界面扩散。离子束掠角刻蚀对 Si 层表面的扩散控制更为显著,主要是离子束溅射的 Si 为非晶态,且离子束刻蚀为各向同性。而对于 10 nm 厚的 Mo 层,多晶态的晶体结构在离子束刻蚀作用下呈现明显的各向异性,导致粗糙度低于 Si 表面,扩散厚度也会增加。离子束掠角刻蚀产生的平滑效应对离子能量的依赖性较大,使用更高的能量可以部分补偿不完全的平滑,界面扩散的不对称性则更明显。

参考文献:

- [1] KAZAZIS D, SANTA CLARA J G, VAN SCHOOT J, *et al.* Extreme ultraviolet lithography [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2024, 4: 84.
- [2] SAEDI M, SFILIGOJ C, VERHOEVEN J, *et al.* Effect of rubidium incorporation on the optical properties and intermixing in Mo/Si multilayer mirrors for EUV lithography applications [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 507: 144951.
- [3] KONDRATENKO V V, PERSHIN Y P, POLTSEVA O V, *et al.* Thermal stability of soft X-ray Mo-Si and MoSi₂-Si multilayer mirrors [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(10): 1811.
- [4] BOSGRA J, ZOETHOUT E, VAN DER EERDEN A M J, *et al.* Structural properties of sub-

6 结 论

本文通过对传统的双离子束溅射系统卡具运动控制组件的改造,提出了一种大角度离子束溅射斜角沉积及辅助离子源掠角刻蚀的工艺方案,降低了 Mo-Si 界面的相互扩散及粗糙度,提升了多层膜的界面质量。尽管插入抗扩散层的方法有助于提升界面的锐度及质量,但扩散阻挡层材料会造成 EUV 吸收增高,反射率降低。运用增大沉积角度与掠角刻蚀的工艺策略,在低能(200 eV)斜角(30°)溅射沉积与掠角(30°)辅助离子束刻蚀的协同工艺下,界面扩散层厚度降低至 0.6 nm,粗糙度降低至 0.2 nm 以下。本工艺为 EUV 高反射 Mo-Si 多层膜系制造提供了可行指导,并揭示了相关装备的原理雏形。

作者贡献声明:

陈艺勤:论文框架构思,初稿写作,项目资助获取;

冀鸣:实验设计及指导;

邵秋:实验数据分析及绘图;

刘伟基:设备改造及实验指导;

李弋舟:论文审核与编辑;

段辉高:实验工艺设计与指导,项目资助获取。

nanometer thick Y layers in extreme ultraviolet multilayer mirrors [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(36): 8541.

- [5] SRINIVASAN N, IP V, LEVOSO M S, *et al.* Ion beam processing for critical EUV photomask process steps: mask blank deposition and photomask absorber etch [C]. *International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2018. September 17-20, 2018. Monterey, USA.* SPIE, 2018: 14.

- [6] LOUIS E, YAKSHIN A E, TSARFATI T, *et al.* Nanometer interface and materials control for multilayer EUV-optical applications [J]. *Progress in Surface Science*, 2011, 86(11/12): 255-294.

- [7] CHKHALO N I, GUSEV S A, NECHAY A N, *et al.* High-reflection Mo/be/Si multilayers for EUV lithography [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5070-5073.

- [8] WANG C C, LEE C T, CHEN H P, *et al.* High-reflective cylindrical-nanostructure multilayer mirrors for extreme ultraviolet radiation [J]. *Physica Scripta*, 2025, 100(3): 035521.
- [9] 孙诗壮, 金春水, 喻波, 等. Mo/Si多层膜表面粗糙度相关镀膜工艺的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(10):190-196.
SUN SH ZH, JIN CH SH, YU B, *et al.* Research on surface roughness related coating processes of Mo/Si multilayers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 190-196. (in Chinese)
- [10] 秦俊岭, 邵建达, 易葵, 等. Mo/Si软X射线多层膜的界面粗糙度研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(5):763-766.
QIN J L, SHAO J D, YI K, *et al.* Interface roughness of Mo/Si soft X-ray multilayers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(5): 763-766. (in Chinese)
- [11] BAKSHI V. *EUV Lithography, Second Edition* [M]. Washington: SPIE, 2018: 36-59.
- [12] ROOK K, TURNER P, SRINIVASAN N, *et al.* Optimization of ion-beam-deposited Mo/Si multilayers for extreme ultraviolet masks [J]. *Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 2021, 20(2): 021008.
- [13] ROOK K, CHECCO A, TURNER P, *et al.* Comparison of deposition techniques for Mo/Si reflective multilayers for EUV mask blanks [C]. *International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2021. September 27-October 8, 2021. Online Only, USA.* SPIE, 2021: 34.
- [14] ROOK K, YAMAMOTO K, ROQUE M, *et al.* Ion beam deposition for larger form-factor EUV mask blanks [C]. *Photomask Technology 2023. October 1-6, 2023. Monterey, USA.* SPIE, 2023: 21.
- [15] JINDAL V, KEARNEY P, HARRIS-JONES J, *et al.* Modeling the EUV multilayer deposition process on EUV blanks [J]. *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography II*, 2011, 7969: 79691A.
- [16] LARGERON C, QUESNEL E, THIBAUT J. Interface growth mechanism in ion beam sputtering-deposited Mo/Si multilayers [J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(19): 2865-2879.
- [17] WINDT D L. IMD: software for modeling the optical properties of multilayer films [J]. *Computers in Physics*, 1998, 12(4): 360-370.
- [18] ROSEN R S, STEARNS D G, VILIARDOS M A, *et al.* Silicide layer growth rates in Mo/Si multilayers [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(34): 6975.
- [19] SRINIVASAN N, ROOK K, TURNER P, *et al.* Interfacial quality of high-reflectivity Mo-Si multilayers for EUV mask blanks [C]. *International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2019. September 15-19, 2019. Monterey, USA.* SPIE, 2019: 21.
- [20] SUN S Z, YU B, GUO T, *et al.* Mo/Si multilayers sputtered onto inclined substrates: experiments and simulations [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13516-13531.
- [21] GROVES T R. Theory of beam-induced substrate heating [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1996, 14(6): 3839-3844.
- [22] ROOK K, TURNER P, SRINIVASAN N, *et al.* Process optimization for performance improvement in Mo/Si multilayers for EUV mask blanks [C]. *Extreme Ultraviolet Lithography 2020. September 21-25, 2020. Online Only, USA.* SPIE, 2020: 5.
- [23] HAASE A, SOLTWISCH V, BRAUN S, *et al.* Interface morphology of Mo/Si multilayer systems with varying Mo layer thickness studied by EUV diffuse scattering [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15441-15455.
- [24] HIRUMA K, MIYAGAKI S, YAMANASHI H, *et al.* Performance and quality analysis of Mo - Si multilayers formed by ion-beam and magnetron sputtering for extreme ultraviolet lithography [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(8): 2050-2057.
- [25] PENKOV O V, KOPYLETS I A, KHADEM M, *et al.* X-Ray Calc: a software for the simulation of X-ray reflectivity [J]. *SoftwareX*, 2020, 12: 100528.
- [26] ABHARANA N, BISWAS A, SARKAR P, *et al.* Interface studies of Mo/Si multilayers with carbon diffusion barrier by grazing incidence extended X-ray absorption fine structure [J]. *Thin Solid Films*, 2019, 673: 126-135.
- [27] 喻波, 李春, 金春水. 基于掠入射X射线反射谱的Mo/Si多层膜扩散系数测量[J]. *中国激光*, 2011, 38(11):214-219.

- YU B, LI CH, JIN CH SH. Diffusion coefficient measurement by grazing incidence X-ray reflection in a Mo/Si multilayer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 214-219. (in Chinese)
- [28] SCHLATMANN R, LU C, VERHOEVEN J, *et al.* Modification by Ar and Kr ion bombardment of Mo/Si X-ray multilayers[J]. *Applied Surface Science*, 1994, 78(2): 147-157.
- [29] KLOIDT A, STOCK H J, KLEINEBERG U, *et al.* Smoothing of interfaces in ultrathin Mo/Si multilayers by ion bombardment [J]. *Thin Solid Films*, 1993, 228(1/2): 154-157.
- [30] VOORMA H J, LOUIS E, BIJKERK F, *et al.* Angular and energy dependence of ion bombardment of Mo/Si multilayers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(4): 1876-1881.
- [31] IJPES D, YAKSHIN A E, STURM J M, *et al.* Interface smoothing in short-period W/B₄C multilayers using neon ion beam polishing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134(24): 245303.
- [32] NEDELICU I, VAN DE KRUIJS R W E, YAKSHIN A E, *et al.* Interface roughness in Mo/Si multilayers[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515(2): 434-438.

作者简介:

陈艺勤(1988—),男,副教授,2017年于湖南大学获得博士学位,主要从事离子束超精密制造方面的研究。E-mail:chenyiqin@hnu.edu.cn

通讯作者:

段辉高(1982—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,2004年、2010年于兰州大学分别获得学士和博士学位,主要从事微纳制造、微纳光学器件的精密和超精密加工等方面的研究。E-mail:duanhg@hnu.edu.cn