

磁控共溅射制备 Si 掺杂 Al 薄膜的应力研究

朱京涛¹, 周涛¹, 朱杰^{1*}, 赵娇玲^{2,3}, 朱航宇¹

¹ 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800;

³ 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 为研制真空紫外与极紫外波段 Al 基薄膜光学元件, 详细研究了 Al 基薄膜的应力特性及其优化方法。利用应力实时测量装置对共溅射技术制备的 5 种不同 Si 掺杂质量分数 (0、8.97%、16.49%、28.46%、45.73%) 的 Al-Si 复合薄膜进行应力测试, 并采用 X 射线衍射法表征薄膜的结晶状态。结果表明: Al 薄膜中的应力表现为压应力, 随着 Si 在 Al 中掺杂量的增加, Al 中的压应力减小, 并且 Al 的结晶度降低, Al(111) 晶向的晶粒尺寸也减小, Al 的结晶被抑制; 当 Si 的掺杂质量分数从 18.63% 增大到 31.57% 时, Al 中的压应力转变为张应力, 且张应力随 Si 掺杂量的增加而进一步增大。本研究为制备 Al 基滤片、单层膜和多层膜元件提供了技术支撑, 在极紫外光刻、同步辐射和天文观测领域具有重要的应用价值。

关键词 薄膜; 真空紫外; 应力; 结晶; 共溅射

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1431002

Study on Stress in Si-Doped Al Thin Films Prepared by Magnetron Co-Sputtering

Zhu Jingtao¹, Zhou Tao¹, Zhu Jie^{1*}, Zhao Jiaoling^{2,3}, Zhu Hangyu¹

¹ School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To develop Al-based thin-film optical elements for vacuum ultraviolet and extreme violet bands, the stress characteristics of Al-based thin films and their optimization methods were investigated in this study. Five Al-Si composite films with different Si contents (0, 8.97%, 16.49%, 28.46%, and 45.73%) were prepared by co-sputtering, and their stresses were measured using a real-time stress measurement device. The crystallinity of the films was characterized by X-ray diffraction. The obtained results reveal that the stress in Al film is compressive. With the increase of Si-doping content in Al, the compressive stress decreases and the crystallinity of the Al film and the grain size in Al (111) crystal orientation also decrease, indicating that the crystallization of Al is suppressed. Upon increasing the mass fraction of Si from 18.63% to 31.57%, the compressive stress in the Al film changes to tensile stress, and the tensile stress increases with further increase of Si mass fraction. This study provides technical support for the preparation of Al-based filters and monolayer and multilayer film elements, which will have important applications in the fields of extreme ultraviolet lithography, synchrotron radiation, and astronomical observation.

Key words thin films; vacuum ultraviolet; stress; crystallization; co-sputtering

OCIS codes 310.3840; 310.3915; 310.4925

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-04-07; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11875204, 11575127, 11705259, U1932167)

* E-mail: jzhu008@tongji.edu.cn

1 引 言

10~120 nm 的真空紫外与极紫外波段覆盖了大量元素的共振线,材料在该波段具有强烈的吸收特性,从而为材料的成分与结构鉴定提供了一种非常灵敏的工具。另外,该波段还包括了 H、He、Fe、Si 等元素的吸收边,在天体物理、大气物理、天文学等领域具有广泛的应用。近 20 年来,随着高亮度同步辐射光源的迅速发展,材料在该波段的光学性能表征引起了各国科学家的兴趣。遗憾的是,在该波段的高次谐波非常多,常用的方法是采用薄膜滤片或者薄膜反射镜等方法来提高光谱的纯度。薄膜滤片不会改变光路,更为简单方便,是真空紫外与极紫外波段重要的光学元件,已被普遍应用在空间科学^[1]、等离子体诊断^[2]、X 射线标定^[3]和同步辐射光束线^[4]等领域。滤片的材料通常为金属薄膜,可以利用金属在其吸收边前后吸收系数发生突变的特性进行电磁波谱的滤除。滤片一般为自支撑形式,相对于有支撑形式(如利用网格或聚合物膜进行支撑^[5-6]),自支撑滤片在使用过程中无载体支撑,制备难度大。采用可溶性衬底法^[7]制备自支撑滤片时,首先要求衬底无缺陷、均匀平坦且应力低。利用磁控溅射法在可溶性衬底上镀制薄膜过程中,薄膜沉积时会不可避免地会产生应力,应力极易导致自支撑滤片破裂、翘曲和起皱^[8-9],这是造成滤片失效的主要原因。因此,减小滤片镀制过程中的应力,对于提高自支撑滤片的性能具有重要意义。

清华大学的王若楠等^[10]通过在 Si(001)基底注入不同剂量的 C⁺ 离子后沉积 Co 薄膜,然后进行快速退火制备了 CoSi₂ 薄膜;测试后发现,薄膜中的应力随 C⁺ 离子注入剂量的增加而减小。美国 Argonne 实验室的 Macrander 等^[11]在氮气反应溅射沉积过程中通入体积分数为 10% 的氮气,有效控制了多层膜的应力,成功制备出总厚度达 102 μm 的 WSi₂/Al 多层膜。同济大学的黄秋实等^[12]研究了 W/Si 和 WSi₂/Si 多层膜的应力,结果发现:Si 易与 W 发生反应,在界面处引入拉伸作用,从而发生应力逆变;而 Si 不易与 WSi₂ 发生反应,WSi₂/Si 多层膜中没有发生应力逆变,应力特性稳定。

W 与 WSi₂ 薄膜中应力的对比实验表明,采用化合物和共溅射方法阻止金属膜层的结晶,是优化薄膜应力的有效方法。本文首先采用直流磁控共溅射技术制备 Si 掺杂量不同的 Al-Si 复合薄膜;然后利用应力实时测量装置测量了 Al-Si 复合薄膜在沉

积过程中的应力变化,并采用 X 射线衍射仪对薄膜的结晶状态进行了测量;最后对应力测量结果进行了对比分析,讨论了在 Al 中掺杂 Si 对 Al 中应力的影响。

2 实 验

2.1 薄膜制备工艺

磁控溅射法制备的薄膜致密,膜层中的杂质含量少,适合用来制备纳米厚度的单层薄膜和多层膜^[13]。本文采用超高真空直流磁控溅射镀膜机制备 Al-Si 复合薄膜。复合薄膜的设计厚度为 30 nm。膜层基底为单面抛光的 Si(100) 基片,其表面粗糙度约为 0.3 nm。

镀膜工艺参数如下:本底真空度小于 2.0×10^{-4} Pa,溅射气体为高纯氩气(纯度为 99.999%),溅射气压为 0.2 Pa。Al-Si 复合薄膜采用共溅射技术制备,共溅射 Al、Si 两靶之间相互倾斜成一定角度,保持溅射气压不变,改变 Al、Si 两靶的溅射功率来获得不同的溅射速率,以实现不同的 Si 掺杂量。

2.2 薄膜应力的实时测量

测量薄膜应力时采用的基底为超光滑圆形玻璃,玻璃的直径为 30 mm,厚度为 0.15 mm,杨氏模量为 80 GPa,泊松比为 0.17^[14]。

薄膜应力实时测量装置是基于 Stoney 公式^[15]并利用激光光杆法测量基底应变从而进行应力计算的,该装置可以实现对薄膜应力的实时测量^[16]。薄膜在基底上沉积时会引起基底发生形变,而基底形变是由薄膜内的应力导致的。对于形变后的基底,其曲率会发生变化。通过测量薄膜沉积前后基底曲率的变化就可以得到薄膜沉积过程中应力的变化。Stoney 公式的表达式为

$$\sigma = \frac{E_s h_s^2}{6r h_f (1 - \nu_s)}, \quad (1)$$

式中: σ 为基底受到的应力; r 为曲率半径; h_f 为薄膜厚度; h_s 为基底厚度; E_s 和 ν_s 分别为基底的杨氏模量和泊松比。

如图 1 所示,由激光器发出间距为 d_0 的两束平行光照射在基底上,基底的曲率在薄膜沉积后发生变化(由 κ_{pre} 变化到 κ_{post}),导致反射光的间距发生变化(由 d_0 变化到 $d_0 - \delta d$)。假设两束平行光的入射角为 α ,反射光程为 L ,根据几何光学可以得到 d 和曲率变化的关系为

$$\kappa_{\text{post}} - \kappa_{\text{pre}} = \left(\frac{\delta d}{d_0} \right) \frac{\cos \alpha}{2L}, \quad (2)$$

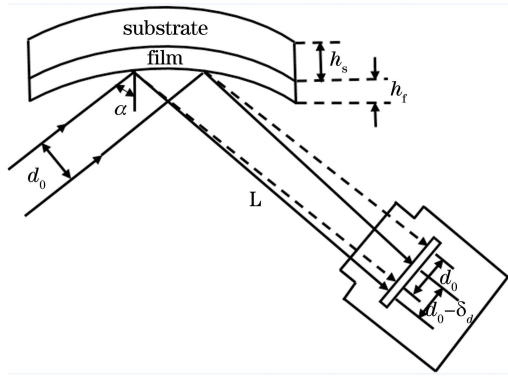


图 1 应力测量示意图

Fig. 1 Schematic of stress measurement

结合(1)、(2)式可得到应力和光束间距之间的关系为

$$\sigma = \left(\frac{\delta d}{d_0} \right) \frac{E_s h_s^2 \cos \alpha}{12(1 - \nu_s) h_t L} \quad (3)$$

根据(3)式就可以通过实时测量光斑间距值来实现薄膜在沉积过程中应力的实时测量。实验时,测量薄膜基底曲率的装置已集成到真空镀膜装置中,可以实现对薄膜应力的在线测量。

2.3 薄膜的 X 射线反射与 X 射线衍射测量

薄膜的 X 射线反射与 X 射线衍射测量都是利用荷兰 PANalytical 公司生产的 X 射线衍射仪进行的。衍射仪发出的 X 射线光源是经单色器准直的 Cu 靶 K α 线,波长 $\lambda = 0.154 \text{ nm}$ 。以 ω - 2θ 扫描模式进行掠入射 X 射线反射测量,以 2θ 扫描模式进行掠入射 X 射线衍射测量。图 2 显示了薄膜和入射 X 射线的 ω 和 2θ 示意图。

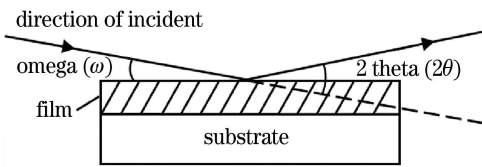


图 2 ω 和 2θ 的示意图

Fig. 2 Schematic of ω and 2θ

当 X 射线入射到薄膜上时,膜层界面产生相干散射并干涉叠加,当光程差为入射波长整数倍时相邻界面产生的散射波会干涉加强,得到 Bragg 峰。由于 X 射线在薄膜中的折射率为 $n = 1 - \delta$ (δ 为折射率小量),故需要对 Bragg 公式进行修正。Bragg 公式的表达式为

$$2d \sin \theta_n = n\lambda, \quad (4)$$

式中: n 为衍射级次; θ_n 为 n 级次 Bragg 峰对应的入射角; d 为膜层厚度; λ 为 X 射线波长。当入射 X 射线发生干涉加强时,光程差为波长的整数倍,则有

$$\frac{2nd}{\sin \theta_n} - \frac{2d \cos(\theta_n + \Delta\theta)}{\tan \theta_n} = n\lambda. \quad (5)$$

因为 $\Delta\theta \approx 0$, 所以 $\cos \Delta\theta \approx 1, \sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$, (5) 式变为

$$2d \left(\frac{1 - \delta}{\sin \theta_n} - \frac{\cos \theta_n - \sin \theta_n \Delta\theta}{\tan \theta_n} \right) = n\lambda, \quad (6)$$

进一步化简可得

$$2d \sin \theta_n \left(1 - \frac{\delta}{\sin^2 \theta_n} \right) = n\lambda. \quad (7)$$

(7)式两边平方后忽略含 δ^2 的项,就可得到修正的 Bragg 公式,即

$$\sin^2 \theta_n = \left(\frac{n\lambda}{2d} \right)^2 + 2\delta. \quad (8)$$

(8)式中各级次掠入射正弦值的平方与对应级次的平方呈线性关系,其斜率为 $\left(\frac{\lambda}{2d} \right)^2$ 。将 X 射线波长、测量出的多个出峰角度与相应级次以及通过最小二乘法拟合得到的斜率代入(8)式,即可求得膜层厚度^[17]。

3 分析与讨论

3.1 Al-Si 复合薄膜的厚度

在相同的溅射时间和不同的溅射功率下沉积 Al、Si 薄膜,然后利用 X 射线衍射仪对 Al、Si 薄膜进行掠入射 X 射线反射测试,对测试曲线进行拟合得到 Al、Si 薄膜的厚度,从而获得 Al、Si 的溅射速率;按 5 种不同 Si 掺杂质量分数(0%、10%、20%、30%、50%)的 Al-Si 复合薄膜的要求设计 Al、Si 薄膜的厚度。

图 3 是针对 Si 掺杂质量分数为 50% 的 Al-Si 复合薄膜的 Al 膜和 Si 膜进行掠入射 X 射线反射(XRR)测量得到的测试曲线和拟合曲线,Al、Si 的拟合值分别为 15.27 nm 和 14.91 nm。设 $v_{\text{Al}}, v_{\text{Si}}$ 分别为 Al、Si 的溅射速率, $\rho_{\text{Al}}, \rho_{\text{Si}}$ 分别为 Al、Si 的密度,通过公式

$$v_{\text{Si}} \cdot \rho_{\text{Si}} / (v_{\text{Si}} \cdot \rho_{\text{Si}} + v_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}}) \quad (9)$$

可以计算得到 Si 的掺杂量为 45.73% (质量分数)。本文将拟合得到的 Si 掺杂质量分数为 0%、10%、20%、30% 的 Al-Si 复合膜的 Al 膜和 Si 膜的 XRR 值列于表 1,可见,实际测得的各个膜系的 Si 掺杂量基本符合设计要求。

3.2 Al-Si 复合薄膜的应力

利用应力实时测量装置分别测量了 Si 掺杂质量分数分别为 0%、8.97%、16.49%、28.46%、45.73% 的 Al-Si 复合薄膜在沉积过程中的应力变化。在测量过程中,不同 Si 掺杂量 Al-Si 复合薄膜每次均镀

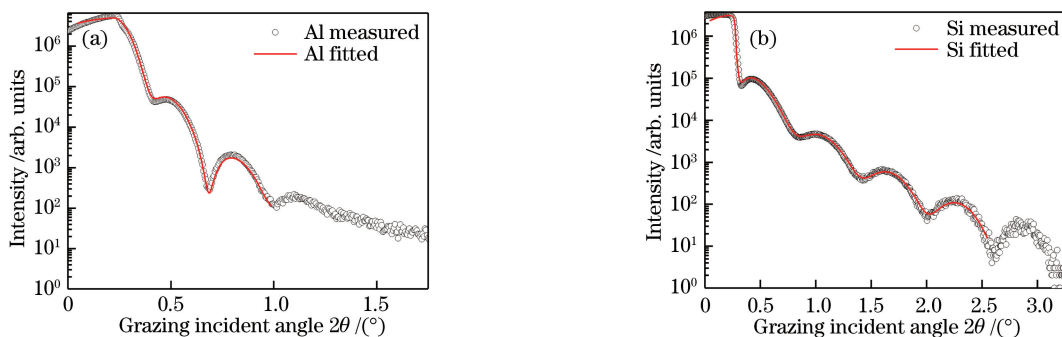


图 3 Si 掺杂质量分数为 50% 的 Al-Si 复合薄膜的 Al 膜、Si 膜的 XRR 测试和拟合曲线。(a) Al 膜；(b) Si 膜
Fig. 3 XRR test and fitting curves of Al and Si for Si-doped 50% (mass fraction) Al-Si composite film.

(a) Al film; (b) Si film

表 1 Al-Si 复合薄膜的 Al 膜、Si 膜的 XRR 拟合结果

Table 1 XRR fitting results of Al and Si films in Al-Si composite film

Designed Si-doped mass fraction /%	Al thickness /nm	Si thickness /nm	Measured Si-doped mass fraction /%
0	28.31	-	0
10	27.34	3.12	8.97
20	25.43	5.82	16.49
30	20.35	9.38	28.46
50	15.27	14.91	45.73

制相同的厚度(约 30 nm)后回到应力测试点进行应力测试,整个过程共进行 10 次应力测试。各膜系的曲率变化如图 4 所示。

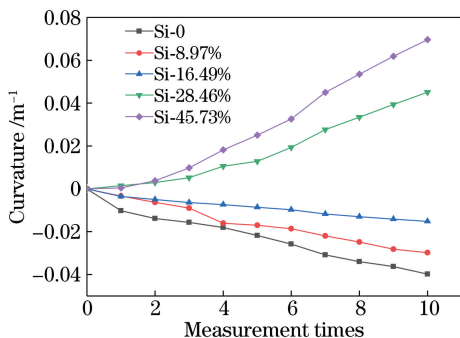


图 4 Al-Si 复合薄膜的曲率

Fig. 4 Curvature for Al-Si composite films

由图 4 可知,随着薄膜厚度增加,曲率逐渐增大,其中:Si 掺杂质量分数为 0、8.97%、16.49% 的 Al-Si 复合薄膜的曲率向负方向增大,表现为压应力趋势;Si 掺杂质量分数为 28.46% 和 45.73% 的 Al-Si 复合薄膜的曲率向正方向增大,表现为张应力趋势。

图 5 是由(3)式计算得到的 Al-Si 复合薄膜的应力变化图,可见:随着 Si 在 Al 中掺杂质量分数的增大,Al 的平均应力趋于减小。这表明,采用共溅射掺 Si 法制备 Al 膜可在一定程度上减小 Al 中的压应力;当 Si 掺杂质量分数达到 28.46% 后,Al 中的压应力会转变为张应力;随着 Si 掺杂质量分数继

续增大至 45.73%,张应力继续增大。各膜系的平均应力值列于表 2。

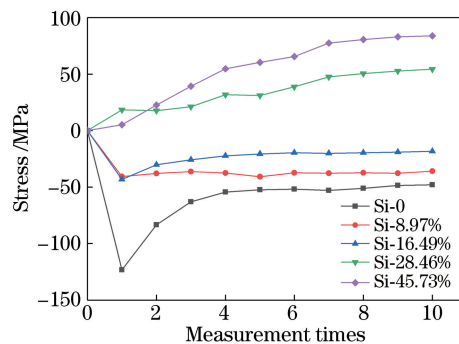


图 5 Al-Si 复合薄膜的应力

Fig. 5 Stress for Al-Si composite films

表 2 Al-Si 复合薄膜的应力值

Table 2 Stress of Al-Si composite films

Si-doped mass fraction /%	Stress /MPa
0	-47.98
8.97	-35.91
16.49	-19.34
28.46	54.29
45.73	83.84

3.3 Al-Si 复合薄膜的微结构分析

在超光滑单晶 Si 基底上分别镀制了约 300 nm 厚的 Si 掺杂质量分数分别为 0、8.97%、16.49%、28.46%、45.73% 的 Al-Si 复合薄膜,并对其进行了 X 射线衍射测试,测试结果如图 6 所示。

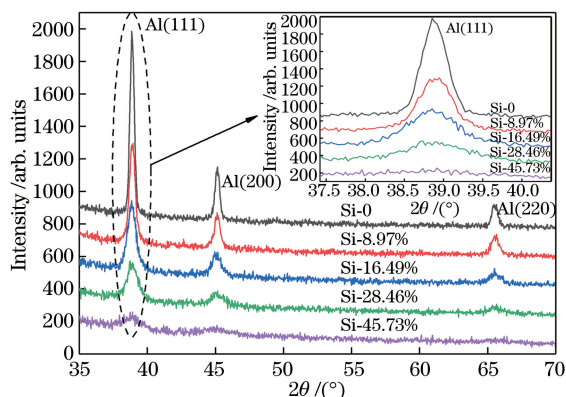


图 6 Al-Si 复合薄膜的 X 射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of Al-Si composite films

由图 6 可见:38.8°附近的衍射峰为 Al 的面心立方晶体的(111)晶向,Al 在(111)晶向上具有较强的择优取向;随着 Si 在 Al 中掺杂质量分数的增加,Al(111)晶向的衍射峰不仅变得更弱,而且变得

表 3 Al-Si 复合薄膜的晶向、衍射峰位和晶粒大小

Table 3 Crystal orientation, diffraction peak position and grain size of Al-Si composite films

Si-doped mass fraction /%	Crystal orientation	Diffraction peak position / (°)	Grain size /nm
0	Al(111)	38.88	24.6
8.97	Al(111)	38.89	18.1
16.49	Al(111)	38.85	11.5
28.46	Al(111)	38.76	9.0
45.73	Al(111)	38.63	3.7

上述实验结果表明:在 Al 中掺 Si 可在一定程度上可减小 Al 中的压应力。Al 中的压应力来源于薄膜体积的增大^[21],而薄膜体积增大是由高能粒子(反射的 Ar 中性粒子和溅射原子)轰击薄膜使薄膜产生空位或间隙原子等缺陷造成的。共溅射制备薄膜的方式使 Al 和 Si 之间存在相互扩散,Si 可以穿透 Al 的晶格,抑制 Al 的结晶,并且原子半径较小的 Si 占据 Al 中的空位产生拉伸作用,从而产生张应力,这种拉伸作用随着 Si 掺杂质量分数的增大而逐渐增强,使张应力成为薄膜中的主导应力,最后使 Al 中的压应力转变为张应力^[22]。

4 结 论

本文采用磁控共溅射技术制备了 Si 掺杂量不同的 Al-Si 复合薄膜,通过薄膜应力实时测量装置研究了 Si 掺杂质量分数分别为 0、8.97%、16.49%、28.46%、45.73%的 Al-Si 复合薄膜在沉积过程中的应力变化。结果发现,在 Al 中掺 Si 可以减小 Al 中的压应力,随着 Si 掺杂质量分数从 16.49%增大到 28.46%,Al 中的压应力转变为张应力。对复合薄膜进行 X 射线衍射测试后发现:Si 的掺入会抑制 Al

更宽。这表明,薄膜中的结晶 Al 相减少,Al 的结晶被抑制,Al 的结晶度降低。利用 MDI Jade 软件计算了 Al-Si 复合薄膜的结晶度,基于 Scherrer 公式^[18]计算了 Al(111)晶向的晶粒大小。未掺 Si 的 Al 薄膜几乎完全结晶^[19],结晶度近似为 100%,而 Si 掺杂质量分数为 8.97%、16.49%、28.46%、45.73%的复合薄膜的结晶度分别为 75%、66%、56%、40%。可以看出,Si 掺杂量越大,结晶度越差,Al 晶粒变得越细小。表 3 列出了晶粒大小的计算结果,可以看出:随着 Si 掺杂质量分数从 0 增大到 45.73%,Al(111)晶向的晶粒大小从 24.6 nm 减小到 3.7 nm;Si 掺杂质量分数越大,对 Al 结晶的抑制作用越强;Al(111)晶向衍射峰位也因 Si 的存在而略微减小。结合图 6 和表 3 可知,在 Al 中掺 Si 不仅会影响 Al(111)晶向的衍射峰位,而且能抑制 Al 的结晶^[20]。

的结晶,并且会在 Al 中引入拉伸作用而使 Al 中产生张应力;随着 Si 掺杂质量分数增加,拉伸作用增强使张应力成为薄膜的主导应力。实验结果表明,在 Al 中掺杂质量分数为 16.49%~28.46%的 Si 可使 Al 中的压应力维持在较低的水平上。今后需要进一步研究 Si 掺杂量不同的 Al 滤片的透射特性。

参 考 文 献

- [1] Mitrofanov A V. Thin-film X-ray filters based on microstructured substrates and their thermophysical properties[J]. Quantum Electronics, 2018, 48(2): 105-114.
- [2] Yuan Z, Cao Z R, Zhu X L, et al. A technology of X-ray imaging flat-response low-pass filter [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0534001.
袁铮,曹柱荣,朱效立,等.一种 X 射线成像型平响应低通滤波技术[J].光学学报,2016,36(5): 0534001.
- [3] Yi R Q, Zhao Y D, Wang Q P, et al. Characteristic study and application of the soft X-ray beam line 4B7B on BSRF [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1034002.
易荣清,赵屹东,王秋平,等.北京同步辐射装置

- 4B7B 软 X 射线标定束线的性能研究及应用[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1034002.
- [4] Zhou H J, Wang G J, Zheng J J, et al. Suppression of higher-order harmonics by different filter in 5-40 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2753-2756.
周洪军, 王冠军, 郑津津, 等. 5~40 nm 波段高次谐波的定量研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2753-2756.
- [5] Powell F R, Johnson T A. Filter windows for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4343: 585-589.
- [6] Wu H Y, Wu Y G, Lv G, et al. Preparation and characterization of free-standing Zr, PI and Zr/PI filter[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7995: 79951F.
- [7] Gao F J, Zheng R T, Cheng G A. Research progress in preparation of self-supporting thin film [J]. Materials Review, 2007, 21(6): 1-3,8.
高凤菊, 郑瑞廷, 程国安. 自支撑薄膜制备的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 1-3,8.
- [8] Yuan W J, Shen W D, Zheng X W, et al. Optical and mechanical properties and microstructures of Nb₂O₅, Ta₂O₅ and SiO₂ thin films prepared by ion beam sputtering [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1231001.
袁文佳, 沈伟东, 郑晓雯, 等. 离子束溅射制备 Nb₂O₅、Ta₂O₅ 和 SiO₂ 薄膜的光学、力学特性和微结构[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1231001.
- [9] Li C A, Yang M D, Quan B Q, et al. Stress simulation analysis of multilayer film deposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 043101.
李长安, 杨明冬, 全本庆, 等. 多层薄膜沉积的应力仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 043101.
- [10] Wang R N, Liu J F, Feng J X. Study on C⁺ ion implantation and CoSi₂ film stress [J]. Progress in Natural Sciences, 2002, 12(12): 1296-1300.
王若楠, 刘继峰, 冯嘉猷. C⁺ 离子注入与 CoSi₂ 薄膜应力的研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(12): 1296-1300.
- [11] Macrander A T, Kubec A, Conley R, et al. Efficiency of a multilayer-Laue-lens with a 102 μm aperture[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(8): 081904.
- [12] Huang Q S, Li H C, Zhu J T, et al. Stress analysis of W, WSi₂, Si single layers and W/Si, WSi₂/Si multilayers fabricated by magnetron sputtering [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1659-1662.
黄秋实, 李浩川, 朱京涛, 等. 磁控溅射制备的 W, WSi₂, Si 单层膜和 W/Si, WSi₂/Si 多层膜应力[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1659-1662.
- [13] Liu D M, Yue P F, Fu X H, et al. Development of iris recognition filter with low-angle effect[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1131002.
刘冬梅, 岳鹏飞, 付秀华, 等. 低角度效应虹膜识别滤光片的研制[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1131002.
- [14] Shackelford J F, Alexander W. CRC materials science and engineering handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [15] Wang H J, Deng H, Chiang S Y, et al. Development of a process modeling for residual stress assessment of multilayer thin film structure [J]. Thin Solid Films, 2015, 584: 146-153.
- [16] Zhu G C, Fang M, Yi K, et al. An instrument for *in situ* stress measurement in thin optical films by using two light beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2150-2153.
朱冠超, 方明, 易葵, 等. 双光束在线实时测量光学薄膜应力的装置[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2150-2153.
- [17] Zhang J D, Mo Z S. Characterization of polymer films using grazing incidence X-ray technology [J]. College Chemistry, 2009, 24(2): 1-6.
张吉东, 莫志深. 利用掠入射 X 射线技术表征高分子薄膜[J]. 大学化学, 2009, 24(2): 1-6.
- [18] Jiao H F, Yu C Y, Zhang Z, et al. Effect of carbon on microstructure and interfaces of NiC/Ti multilayers for neutron applications [J]. Vacuum, 2018, 155: 49-54.
- [19] Zhong Q, Zhang Z, Ma S, et al. The transition from amorphous to crystalline in Al/Zr multilayers [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(13): 133508.
- [20] Zhong Q, Li W B, Zhang Z, et al. Optical and structural performance of the Al (1% wtSi)/Zr reflection multilayers in the 17-19 nm region [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10692-10700.
- [21] Shao S Y, Fan Z X, Fan R Y, et al. A review of study of stress in thin films[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(1): 22-27.
邵淑英, 范正修, 范瑞瑛, 等. 薄膜应力研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(1): 22-27.
- [22] Liu C A, Conley R, Macrander A T. Film stress studies and the multilayer Laue lens project [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6317: 63170J.