

文章编号: 1005-5630(2025)06-0090-11

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202501010001

## 极紫外透射薄膜滤片研究进展

李笑然, 陈俊, 陈逸文

(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)

**摘要:** 透射式薄膜滤片是极紫外波段重要的光学元件, 其在半导体制造、同步辐射光源、材料分析、空间天文观测等诸多科学技术领域具有广泛的应用。本文综述了透射式薄膜滤片的设计、制备工艺、使用性能等方面的研究进展, 重点介绍了滤片的机械强度及其在不同波长下的光学特性, 分析了膜层材料与膜系参数对滤片热稳定性的影响。同时, 讨论了滤片在工程应用中所面临的针孔缺陷和膜层污染等问题与挑战, 旨在推动我国极紫外透射式薄膜滤片的研制进程。

**关键词:** 极紫外; 透射; 薄膜; 滤片; 制备工艺; 性能

**中图分类号:** O 484 **文献标志码:** A

## Research progress of transmissive thin-film filters in the extreme ultraviolet ranges

LI Xiaoran, CHEN Jun, CHEN Yiwen

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

**Abstract:** Transmissive thin-film filters are important optical elements in the extreme ultraviolet (EUV) bands, which have been widely used in many scientific and technological fields such as semiconductor manufacturing, synchrotron radiation, material analysis, space astronomical observation, etc. In this paper, we review the research progress of transmissive thin-film filters on their design, preparation process and performance, focusing on the mechanical strengths of the filters and their optical properties at different wavelengths, and analyze the effects of material choices and layer-stack parameters on their thermal stabilities. Furthermore, we also discuss the problems of pinhole defects and challenges of film contamination in engineering applications, aiming to promote the development of EUV transmissive filters in domestic research.

**Keywords:** extreme ultraviolet; transmissive; thin-film; filter; preparation process; performance

极紫外(extreme ultraviolet, EUV)波段作为“短波光学”研究领域的重要组成部分, 因其短波长的特性得到了广泛的应用。目前, EUV

光源的产生方式主要有: 激光等离子体(laser-produced plasma, LPP)、同步辐射(synchrotron radiation, SR)、自由电子激光(free electron

收稿日期: 2025-01-01

通信作者: 李笑然, 研究员, 研究方向为光学工程。E-mail: [w16a2z@163.com](mailto:w16a2z@163.com)



$D$  的介质时, 透射率  $T$  的表达式为

$$T = \exp(-\mu^* \rho D) \quad (1)$$

由式(1)可计算获得不同材料、不同膜厚滤片的理论透射率值。通常情况下, EUV 滤片的膜厚设计范围仅为百纳米级, 甚至低至几十纳米。

与此同时, 优良的 EUV 滤片设计, 还需综合兼顾滤片的抗氧化性、热稳定性、机械强度等关键性能参数, 以使其能够满足在高温、强辐照、强扰动等复杂环境下的工程应用需求。因此, 常通过在滤片薄膜表面添加保护层、施加额外支撑载体等手段, 达到提升 EUV 滤片使用寿命的目的。

### 1.2 制备工艺

薄膜沉积技术主要包括化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 和物理气相沉积 (physical vapor deposition, PVD)。以 PVD 技术为例, 蒸发和溅射是最常用的两种镀膜方式<sup>[20]</sup>。相对而言, 在溅射镀膜过程中, 沉积粒子抵达基片时的动能高, 形成的膜层结构较为致密, 这对于材料的光学参数具有关键的影响; 同时, 溅射镀膜的沉积速率稳定, 有利于控制纳米级薄膜的膜厚精度。因此, 溅射方法通常更适用于 EUV 波段薄膜的制备。

根据机械结构设计的不同, EUV 滤片又可分为“额外支撑”和“自支撑”两种结构。

(1) “额外支撑”结构: 普遍采用网格支撑的方式, 在其通光孔径内为膜面提供附加承接的载体, 材质多为镍、钼或铍铜复合材料等。例如, 2008 年, Bibishkin 等<sup>[21]</sup>以金属铜作为网格支撑材料, 利用光刻技术在铜表面形成网格图案, 随后结合电镀、刻蚀工艺, 得到了厚度 15~20  $\mu\text{m}$ 、线宽 140  $\mu\text{m}$  的铜网支撑结构, 如图 2(a) 所示。2014 年, Törmä 等<sup>[22]</sup>报道了一种基于“硅细格栅”支撑结构的 SiN 薄膜滤片, 在图 2(b) 中, 该团队通过湿法刻蚀工艺去除 SiN 膜层上方较厚的基底及氧化层, 形成滤光窗口; 针对 SiN 膜层下方较薄的多晶 Si 层, 则采用光刻技术对其进行精细的图形划分, 用以构成支撑滤片膜层的硅细格栅结构。可见, 带有额外

支撑结构的 EUV 滤片, 制备工艺通常涉及光刻、刻蚀等半导体制造技术, 整体工艺流程较为复杂。

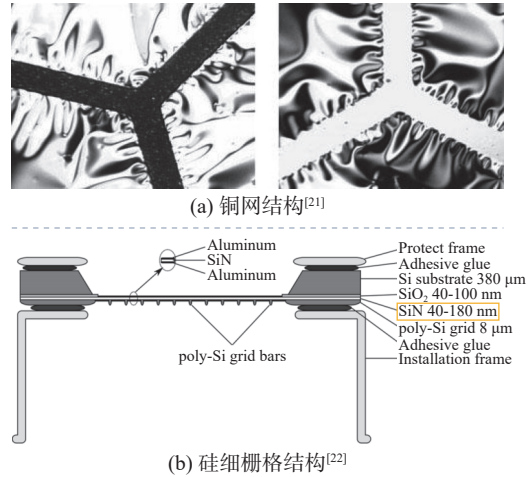


图 2 网格支撑结构滤片

Fig. 2 Grid-supporting filters

(2) “自支撑”结构: 其通光孔径内的膜面无任何额外的支撑载体, 通常仅利用外部刚性框架在薄膜边缘处对其进行黏合固定。目前, 自支撑滤片最常见的制备方式为漂浮法<sup>[23]</sup>。图 3(a) 展示了传统漂浮法中的一种工艺流程。首先, 通过溅射等技术在可溶性基底表面沉积所需的薄膜; 随后, 将其放置于溶剂中, 直至基底溶解并与薄膜分离, 得到漂浮于液面的、无支撑的薄膜; 最后, 采用外部刚性框架捞取无支撑薄膜并黏合固定, 即可得到自支撑结构的滤片样品。相比于前述“额外支撑”结构的滤片, 自支撑滤片的制备工艺流程更加简捷。

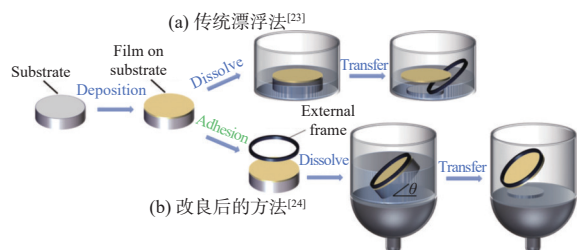


图 3 自支撑滤片的制备方法流程

Fig. 3 Flows of preparation methods for self-supporting filters

然而, 传统漂浮法工艺中仍存在诸多由人为操作而引起的不利因素, 这也为“超薄”自支撑滤片的制备带来了很大的难度与挑战。对此, 2024 年, 李笑然等<sup>[24]</sup>针对传统漂浮法做出了改

良, 其流程如图3(b)所示: 一方面, 预先将外部刚性框架与镀有薄膜的基底黏合<sup>[25]</sup>; 另一方面, 引入了夹装装置(用于在基底溶解过程中对外部框架与基底进行约束固定, 并设有一定的放置角度 $\theta$ ), 同时采用排液漏斗(可控制溶剂的排放速率)取代传统水槽。经上述改良后, 超薄自支撑滤片的制备成功率和操作可重复性均得到了显著提升。

## 2 EUV 透射滤片的使用性能及相应挑战

### 2.1 机械强度

受限于 EUV 波段材料的吸收特性, 膜厚度级仅为几十至几百纳米的 EUV 滤片, 在面向不同的使用环境时, 首要考虑的问题是如何保证其具备良好的使用稳定性, 因此, 开展滤片机械强度的相关研究十分有必要。

带有额外支撑结构的滤片得益于其结构优势, 相较于自支撑滤片具有更为优良的机械强度, 在卫星飞行和火箭发射等任务中能够承受外界环境的强烈振动以及声波的影响<sup>[26]</sup>。因而在空间探测工程领域, 通常将带有额外支撑结构的滤片作为首选。例如, 1989年, Vedder等<sup>[27]</sup>公布的极紫外探测器卫星内部的7套集成滤片中, 所有滤片均采用规格为每英寸(1英寸=2.54 cm)70线对的镍网支撑结构, 用以提升滤片的机械强度。2002年, Hemphill等<sup>[28]</sup>参照Delta II运载火箭的原型飞行测试级别标准, 针对镍网支撑结构的Zr滤片进行了随机振荡实验。测试结果显示, 滤片结构并未发生明显损坏, 稳定性良好。基于美国航空航天局的空间任务需求, 2010年, Luxel公司Grove等<sup>[13]</sup>以聚酰亚胺(PI)支撑网格取代了传统镍网。对比镍网结构, PI网络的制备灵活度更高, 可根据减震、应力消除、载荷分布等特定需求对其几何形状进行调整, 图4中呈现了几种不同形状的PI网络结构。

相较之下, 自支撑滤片更易发生破损, 其机械强度主要取决于薄膜自身的力学性能, 其中薄膜应力是研究人员重点关注的性能参数。不当的薄膜应力, 极易导致薄膜开裂、褶皱等情况

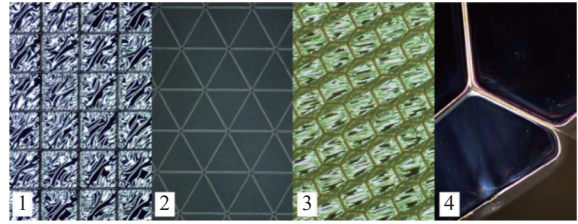


图4 不同形状的PI支撑网格<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Polyimide supporting grids with different shapes<sup>[13]</sup>

的出现<sup>[15]</sup>。为控制薄膜应力, 常见的调节机制包括<sup>[29]</sup>:

1) 添加亚层构建多层膜结构。例如, 王占山等<sup>[30]</sup>通过磁控溅射交替沉积Al层和C层的方式制备了铝夹碳膜系的滤片, 利用不同材料间的应变补偿作用, 缓解薄膜整体的应力水平。

2) 采用热退火处理。伍和云等<sup>[31]</sup>在200℃条件下, 对300~500 nm厚度范围的Zr薄膜进行了退火处理, 以达到减轻应力的目的。

3) 调整薄膜沉积工艺。2020年, 朱京涛等<sup>[32]</sup>通过磁控共溅射技术制备了Al-Si复合薄膜。由图5可知, 随着Si掺杂质量分数的增大, 薄膜平均应力由压应力转变为张应力, 且Al(111)晶向的衍射峰强度逐渐降低, 晶粒尺寸由24.6 nm减小至3.7 nm。实验表明, 基于Al、Si原子之间的扩散现象, 在Al中掺杂Si, 不仅可在一定程度上减小Al中的压应力, 还能抑制Al的结晶。2021年, 该联合团队<sup>[33]</sup>又探讨了溅射工作气压对Zr基薄膜应力的影响, 指出当工作压力降低至0.1 Pa以下时, Zr薄膜受塑性流动机制的作用<sup>[34]</sup>, 薄膜应力状态呈现压应力向张应力的转变。上述的机理研究, 为低应力的自支撑金属基滤片的制备提供了一定的指导意义。

此外, 可采用“压强差法”对自支撑结构薄膜的机械强度进行表征<sup>[21]</sup>。该方法的基本原理是通过在自支撑薄膜的膜面两侧, 以一定速率施加压强差 $\Delta P$ , 直至薄膜破裂, 记录此刻破裂临界点的压强差(简称“临界压强差”) $\Delta P$ 的数值, 作为其机械强度的一种量化表征。例如, Bibishkin等<sup>[21]</sup>根据上述方法表征了自支撑Zr单层膜、Zr/Si周期多层膜等不同膜系样品的机械强度特性, 部分膜系的测试结果如表1所示。不难发现, Zr/Si周期多层膜结构自支撑滤片的临界压强差 $\Delta P$ 普遍高于Zr单层膜结构, 且滤片

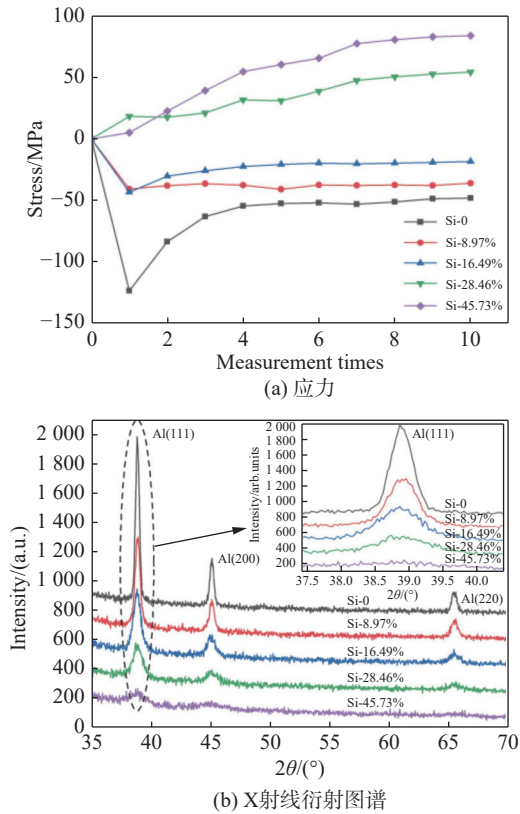


图 5 Al-Si 复合薄膜的应力和微结构随 Si 掺杂质量分数的变化<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Variations of the stress and microstructure of Al-Si composite films with different Si contents<sup>[32]</sup>

表 1 多层膜结构自支撑滤片的强度特性测试结果<sup>[21]</sup>  
Tab. 1 Testing results of strength properties of multilayer self-supporting filters<sup>[21]</sup>

Layer stack	Periodic thickness/nm	$\Gamma$	Total thickness/nm	Diameter/mm	$\Delta P/\text{bar}$
Zr	-	-	200	6	0.12
Zr/Si	3.9	0.75	260	6	0.42
Zr/Si	2.0	0.75	260	6	0.56
Zr/Si	1.6	0.6	59	2.5	0.23
Zr/Si	2.2	0.7	52	2.5	0.34

强度受薄膜周期厚度、比值 $\Gamma$ (Zr 层厚度/周期厚度)等膜系参数的影响。

## 2.2 光学特性

### 2.2.1 13.5 nm 波段

EUV 先进光刻领域的应用需求, 促进了 13.5 nm 波段相关滤片研究的不断发展。在该波段下, 可供选择的薄膜材料主要包括 Zr、Mo、

Nb、Y、Be、Si 和一些金属化合物等。其中, Y、Be 材料虽具有良好的 13.5 nm 透射率, 但由于其暴露于空气中的易燃性(Y)以及毒性(Be), 使得这两种材料难以用于滤片薄膜的制备<sup>[9]</sup>。

2001 年, Powell 等<sup>[9]</sup>为了减少 Zr 膜层氧化带来的影响, 提出了膜系为“50 nm-Si/50 nm-Zr/50 nm-Si”的镍网支撑结构滤片(镍网透过率为 82%); 根据图 6 所示的 EUV 透射率计算结果, 该滤片在 13.4 nm 的理论透射率大于 60% (实际测量值小于 60%), 且其对可见光辐射的抑制率可达  $1.7 \times 10^{-3}$  的水平。2008 年, Bibishkin 等<sup>[21]</sup>制备了胶黏在钢制网格支撑结构之上的、厚度为 220 nm 的 Zr/Si 周期多层膜滤片, 测得该滤片于 13 nm 波长处的实际透射率为 32%。

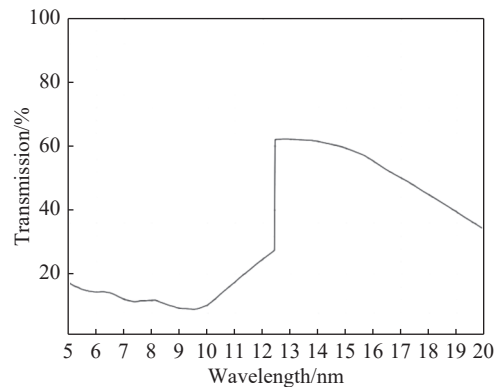


图 6 “50 nm-Si/50 nm-Zr/50 nm-Si” 网格支撑结构滤片的 EUV 理论透射率<sup>[9]</sup>

Fig. 6 Theoretical transmission values of a “50 nm-Si/50 nm-Zr/50 nm-Si” grid-supporting filter in the EUV band<sup>[9]</sup>

自支撑结构相较于带有额外支撑结构的滤片更具光学透射率的优势。2008 年, Bibishkin 等<sup>[21]</sup>报道了 50 nm 膜厚的 Zr/Si 周期多层膜自支撑滤片, 其在 13 nm 波长的透射率测量值达到 76%。2011 年, Chkhalo 等<sup>[35]</sup>实现了直径 160 mm、13 nm 波长处透射率为 70% 的 Mo/ZrSi<sub>2</sub> 周期多层膜自支撑滤片样品, 该结果为自支撑薄膜滤片在工业用 EUV 光刻领域的应用提供了参考。回顾国内针对自支撑薄膜滤片的研究, 2010 至 2011 年期间, 伍和云等<sup>[31]</sup>使用磁控溅射方法制得了 3 种不同厚度的自支撑 Zr 滤片, 其中, 300 nm 膜厚的 Zr 滤片于 12~14 nm 波长范围的透射率测量值范围约为 20%~23%。基于 PI 膜良好的热稳定性和机械性能, Wu 等<sup>[36]</sup>制

备了膜系为“400 nm-Zr/200 nm-PI”、“300 nm-Zr/200 nm-PI”的自支撑滤片,与单层 Zr 自支撑滤片相比,前者的机械强度得到了明显改善且延长了使用寿命。但由于 PI 膜层会增大对 EUV 辐射的吸收,因此上述两种膜系滤片在 13.9 nm 波段的实际透射率分别仅为 7.5% 和 14.9%。采用 Si 材料制备的薄膜通常易损<sup>[37]</sup>,在现有文献中, Si 多是与金属材料(如 Zr 等)构成复合膜系<sup>[35]</sup>,而基于磁控溅射制备的 Si 单层膜的自支撑滤片结构鲜有报道。2023 年,李笑然等<sup>[38]</sup>为推进国内高透射率滤片的发展与应用,设计并通过磁控溅射制备了厚度为 50 nm 的单层 Si 薄膜自支撑滤片样品,结果表明,该样品于 13.5 nm 波长的透射率测量值达到 86.02%。由于 Si 滤片表面氧化及“体氧化”的存在,其透射率的测量值与初步理论计算结果存在一定差异,如图 7 所示,进一步,该团队利用 IMD 软件构建了滤片“三明治”结构的理论模型,又结合 X 射线光电电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)

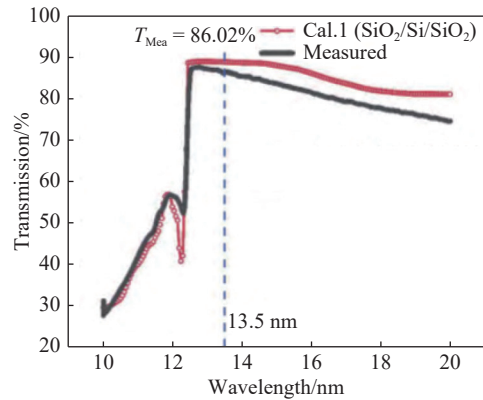


图 7 厚度仅为 50 nm 的自支撑 Si 滤片的透射率测量值及理论计算值<sup>[38]</sup>

Fig. 7 Measured transmission and theoretically calculated values for a 50 nm-thin self-supporting Si filter<sup>[38]</sup>

测试结果,分析阐明了滤片表面及深层氧化对透射率的影响。

本文简要收集汇总了 2001 年以来文献中报道的 13.5 nm 附近波段的 EUV 滤片,对其支撑结构类型、膜系堆叠组成、实测透射率结果进行了归纳,如表 2 所示。

表 2 13.5 nm 附近波段的 EUV 滤片关键参数汇总

Tab. 2 Summary of key parameters for EUV filters near the wavelength of 13.5 nm

Year	Structure	Layer stack	Transmission/%	Reference
2001	Grid-supporting	50 nm-Si/50 nm-Zr/50 nm-Si	$T_{13.4 \text{ nm}} < 60$	[9]
2008	Grid-supporting	220 nm-[Zr/Si] <sup>n</sup>	$T_{13 \text{ nm}} = 32$	[21]
2008	Self-supporting	50 nm-[Zr/Si] <sup>n</sup>	$T_{13 \text{ nm}} = 76$	[21]
2010	Self-supporting	300 nm-Zr/200 nm-PI	$T_{13.9 \text{ nm}} = 14.9$	[36]
2011	Self-supporting	300 nm-Zr	$T_{12 \sim 14 \text{ nm}} = 20 \sim 23$	[31]
2011	Self-supporting	[Mo/ZrSi <sub>2</sub> ] <sup>n</sup>	$T_{13 \text{ nm}} = 70$	[35]
2023	Self-supporting	50 nm-Si	$T_{13.5 \text{ nm}} = 86$	[38]

### 2.2.2 17~60 nm 波段

针对空间 X 射线/EUV 波段进行观测是监测太阳活动的必要手段。其中, 17~60 nm 波长范围是一段极为重要的 EUV 辐射区间, 该波段包含了 17.1 nm(FeIX, FeX 线)、30.4 nm(HeII, SiXI 线)和 58.4 nm(HeI 线)等诸多重要谱线<sup>[39]</sup>。金属 Al 的  $L_{2,3}$  吸收边位于 17 nm, 其在 17~60 nm 波段具有较高的透射率且对可见光、近紫外波段有良好的抑制效果, 因此常被用作空天探测领域的滤片材料<sup>[19]</sup>。

为应对观测过程中飞行装置所面临的巨大外部扰动, 用于太空望远镜的滤片通常采用网格支撑结构<sup>[40-42]</sup>。例如, 2014 年, Kobayashi 等<sup>[41]</sup>采用规格为 0.5 mm 厚、5 mm 间距的支撑网格制备了 Al/Si 多层膜滤片, 其对 17.1 nm 波长的实际透射率为 43%。然而, 细小的网格结构会导致衍射效应, 进而对滤片的光学特性产生负面影响。针对这一问题, 2023 年, Kuzin 等<sup>[42]</sup>使用了间距更大(6 mm)的六边形网格作为滤片的支撑结构, 制备得到的“三明治”膜系的 Al 滤片

在 17.14 nm 波段的实际 EUV 透射率为 63%，且对可见光波段的抑制比超过  $10^6$ 。

2009 年，付联效等<sup>[43]</sup>开展了有关 30.4 nm EUV 滤片的研究工作，该团队制备了 500 nm 膜厚、30.4 nm 波段实际透射率为 7.6% 的 Cr/Al/Cr 自支撑滤片样品，膜系中的表面 Cr 层可起到降低滤片氧化的效果。同年，Hatayama 等<sup>[44]</sup>选用 SiC 材料作为 100 nm Al 自支撑滤片的表面抗氧化层，在氮气干燥环境中存放 3 个月后，SiC/Al/SiC 滤片的 EUV 透射率远高于无 SiC 保护层的 Al 滤片样品，如图 8 所示。2022 年，唐吉龙等<sup>[45]</sup>实现了膜厚仅为 80 nm 的 Al 自支撑滤片的制备，测得其在 5~25 nm 波长范围的实际透射率峰值为 53%，且对紫外、可见光和红外波段抑制水平达到  $10^{-4}$  量级。

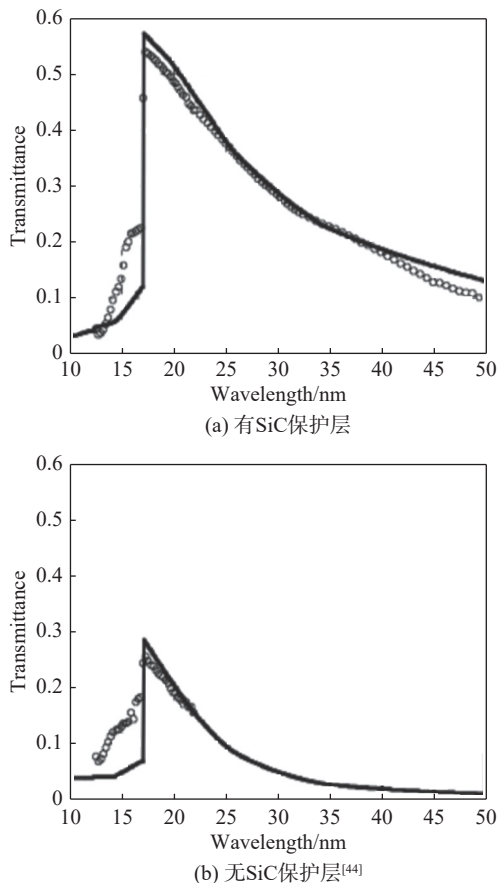


图 8 Al 滤片的光学透射率

Fig. 8 Optical transmission of Al filters<sup>[44]</sup>

46.5 nm (Ne VII) 谱线可以填补目前太阳探测关键温度的缺口，有助于太阳耀斑和日冕物质抛射的观测。2023 年，Bai 等<sup>[46]</sup>在 SUTRI 项目

中，为抑制由 Sc/Si 多层膜反射镜带来的波长为 21 nm 的二级光谱辐射，以 Mg (吸收边位于 26 nm)、Al 为薄膜材料，设计了膜系结构为“77 nm-Al/102 nm-Mg/77 nm-Al”的镍网支撑滤片，作为其光路系统的常规观测滤片。该滤片在 46.5 nm 的理论透射率约为 15%~22%；但由于国内缺少地面校准设备，无法准确测量滤片样品的实际透射率值。

针对 58.4 nm 波段，1999 年，Nakamura 等<sup>[47]</sup>报道了膜厚为 142.9 nm 的 Al 薄膜滤片，其在该波段下的 EUV 透射率测量值为 20%。2016 年，Chkhalo 等<sup>[39]</sup>采用了一种 [(Al/Sc),(Al/Si)] 复合膜系，作为 58.4 nm EUV 自支撑滤片的结构；该复合膜滤片样品的制备，是将膜系为 [(3 nm-Al/1 nm-Sc)<sup>40</sup>, 3 nm-Al] 的 Al/Sc 周期多层膜沉积于 [2.4 nm-Si, (3 nm-Al/2.4 nm-Si)<sup>9</sup>] 的 Al/Si 周期多层膜之上，其在 58.4 nm 的实际透射率为 7.1%。

至此，本文简要收集汇总了 2009 年以来文献中报道的 17~60 nm 波段的 EUV 滤片，对其支撑结构类型、膜系堆叠组成、实测透射率结果进行了归纳，如表 3 所示。

### 2.3 热稳定性

工作过程中的热负载对滤片的使用性能有着重要影响。例如在 EUV 光刻过程中，高功率光源所产生的大量热负载<sup>[21]</sup>，会使滤片温度升高，造成滤片氧化和组分结构的改变，进而降低滤片工作波段的透射率及其对带外辐射的滤除效果。因此，工业界对服役于高强度辐射源环境下的滤片，有着较高热稳定性的要求。

滤片热稳定性测试需要在高真空环境下进行，可利用电流脉冲、激光辐照或真空烘箱加热等方式模拟滤片的高温负载工作环境，以研究 EUV 光源对其造成的热负载影响<sup>[21,48]</sup>。Zr/Si 周期多层膜系是 EUV 波段常用的滤片结构，国内外已有众多团队围绕该膜系滤片开展了热稳定性研究。

2010 年，Volodin 等<sup>[49]</sup>采用电流加热的形式，以  $2.4 \text{ W/cm}^2$  的功率密度对 Zr/Si 周期多层膜滤片施加 7 h 的热负荷，测得该滤片于 13 nm 波长的透射率从加热前的 65% 降低至 56%。同

表 3 17~60 nm 波段 EUV 滤片关键参数汇总  
Tab. 3 Summary of key parameters for EUV filters in the 17-60 nm bands

Year	Structure	Layer stack	Transmission/%	Reference
2009	Self-supporting	5 nm-Cr/500 nm-Al/5 nm-Cr	$T_{30.4 \text{ nm}}=7.6$	[43]
2009	Self-supporting	5 nm-SiC/100 nm-Al/5 nm-SiC	$T_{30 \text{ nm}}=29$	[44]
2014	Grid-supporting	$[2.85 \text{ nm-Al}/2.05 \text{ nm-Si}]^n$	$T_{17.1 \text{ nm}}=43$	[41]
2016	Self-supporting	$[(3 \text{ nm-Al}/1 \text{ nm-Sc})^{40}, 3 \text{ nm-Al}]$ on $[2.4 \text{ nm-Si}, (3 \text{ nm-Al}/2.4 \text{ nm-Si})^9]$	$T_{58.4 \text{ nm}}=7.1$	[39]
2022	Self-supporting	80 nm-Al	$T_{5-25 \text{ nm max}}=53$	[45]
2023	Grid-supporting	2.5 nm-MoSi <sub>2</sub> /150 nm-Al/2.5 nm-MoSi <sub>2</sub>	$T_{17.14 \text{ nm}}=63$	[42]

时, 使用二次离子质谱仪 (secondary ion mass spectrometry, SIMS) 对滤片退火前后的氧含量进行了表征, 如图 9 所示: 加热后 Zr/Si 周期多层膜滤片的氧含量明显增加; 此外, 该团队指出, 此膜系的自支撑滤片长时间稳定工作情况下所能承受的极限热负荷为  $1 \text{ W/cm}^2$ 。

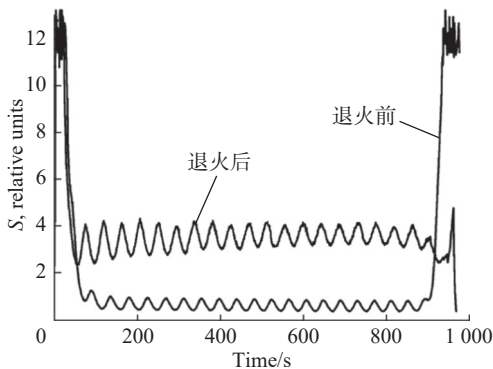


图 9 基于 SIMS 表征得到的退火前后滤片氧含量分布<sup>[49]</sup>  
Fig. 9 Distribution of oxygen contents for filters measured by SIMS<sup>[49]</sup>

2024 年的一项由国内三家机构联合开展的深入研究<sup>[50]</sup>中, 详细讨论了由高温退火和同步辐射的辐照所引起的滤片组分和结构的演变。该研究表明, Zr/Si 周期多层膜自支撑滤片经高温退火后, Zr 和 Si 界面处形成了足够稳定的锆硅化合物 (ZrSi), 因此对比单层 Zr 膜系以及 Zr/B<sub>4</sub>C 周期多层膜系, Zr/Si 周期多层膜的自支撑滤片体现出了更为优良的热稳定性。

此外, Chkhalo 等通过一系列研究<sup>[51-53]</sup>证实: 选用热稳定性更好的材料构建膜系, 以及通过调整膜系参数等优化手段, 皆有可能改善 EUV 滤片在高温下的氧化情况, 进而提高滤片的热稳定性。

## 2.4 问题和挑战

### 2.4.1 针孔缺陷

针孔缺陷是薄膜滤片表面形成的微小孔洞。产生针孔的原因可能包括: 1) 镀膜基底的粗糙度及洁净程度; 2) 薄膜沉积过程中的溅射粒子的影响; 3) 存储环境的温度及湿度; 4) 滤片的尺寸规格<sup>[54-56]</sup>。该缺陷的存在会严重影响滤片的光学性能, 例如在空间探测中, 针孔会削弱滤片对可见光、近紫外波段等带外辐射的抑制能力, 造成观测相机的胶片起雾, 从而影响观测效果<sup>[57]</sup>。为减少滤片针孔, 可在薄膜制备过程中选用尽可能无缺陷的抛光基底, 并采用适宜的湿度、温度对滤片样品进行储存。

针孔缺陷的常用检测方式是将滤片置于暗室中, 通过光源照射滤片表面, 根据 CMOS 传感器采集得到的漏光点信息, 判断针孔的尺寸大小和分布密度。例如, 图 10 为 Al 自支撑滤片的针孔检测图<sup>[58]</sup>。

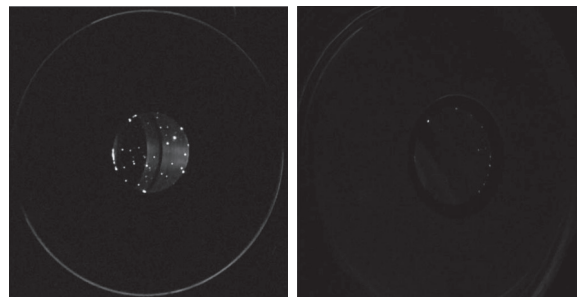


图 10 自支撑 Al 滤片的针孔检测图<sup>[58]</sup>  
Fig. 10 Pinhole detection diagram of a self-supporting Al filter<sup>[58]</sup>

### 2.4.2 薄膜污染

复杂的工作环境中, 杂质对光学薄膜造成的

污染现象通常难以避免。在 EUV 光刻领域, 锡滴碎屑、光刻胶等因素的影响, 会使 EUV 光学元件的表面形成多种沉积物<sup>[9]</sup>; 进行太空观测时, 单甲基肼-四氧化二氮(MMH-NTO)推进器点火会产生羽流污染。这些污染物分子被薄膜吸附后, 在各类辐射的作用下, 可能会聚合形成永久性的碳氢化合物层<sup>[59]</sup>。值得一提的是, 薄膜滤片中混杂的高吸收材料, 可能也会导致其通带波段内的透射率大幅下降<sup>[60]</sup>。

针对上述问题, 当前普遍采用的可改善薄膜污染的措施主要包括: 1) 添加保护层以降低滤片对污染物的敏感性<sup>[59]</sup>; 2) 利用氢气或惰性气体对滤片进行清洁。例如, Lairson 等<sup>[61]</sup>开发了一种基于氩/氢等离子体的轰击方法, 可有效去除滤片表层污染物, 不仅能显著提升滤片的 EUV 透过率, 同时不会在薄膜上留下明显的针孔缺陷。

### 3 总 结

随着科技发展的日新月异, 高端半导体芯片的市场地位愈加重要, 基于 13.5 nm 曝光波长的 EUV 光刻作为当下趋于成熟的先进集成电路制造工艺, 已成为制造更小特征尺寸芯片的核心手段; 与此同时, 对于空间观测、同步辐射装置等热点研究领域, EUV 波段的光学元件也不可或缺。透射薄膜滤片作为 EUV 波段的核心光学元件之一, 在上述使用场景中, 均具有难以替代的应用价值。本文较为详细地介绍了极紫外透射薄膜滤片的设计、制备工艺、使用性能等方面的研究进展。滤片主要分为有网格支撑及自支撑两种结构, 其中有网格支撑结构的滤片通常具有较好的机械强度, 而自支撑滤片则普遍具备更高的光学透过率和成像质量, 但其制备工艺难度较大。目前, Zr、Si 以及一些金属化合物等材料多用于 13.5 nm 波段 EUV 滤片的研制; 而适用于 17~60 nm 空间观测波段的 EUV 滤片, 则主要采用 Al 作为主要的薄膜材料。为避免滤片在工作过程中由热负载造成的膜层氧化及组分变化, 可采用金属化合物构建多层膜系, 以改善薄膜滤片的热稳定性。

滤片在存储、应用过程中依然面临着众多问题与挑战, 例如针孔和薄膜污染。此外, 随着 EUV 领域内容的不断拓展, 对 EUV 滤片性能指标的要求也会逐步提升。因此, 为满足更为复杂的研究和使用需求, 如何进一步提高薄膜滤片的力学性能、通带波段内的透过率、非工作波段的光学阻断特性, 以及在光源辐照条件下的长期使用寿命(包括损伤阈值、热稳定性、氧化抑制等方面), 均亟需科研人员进一步的探索与深入的研究。

### 参考文献:

- [1] CHEN Y Y, ZHAO C X, PAN Q K, et al. Experimental study on the temporal evolution parameters of laser-produced tin plasma under different laser pulse energies for LPP-EUV source[J]. *Photonics*, 2023, 10(12): 1339.
- [2] ARP U, FRIEDMAN R, FURST M L, et al. SURF III - an improved storage ring for radiometry[J]. *Metrologia*, 2000, 37(5): 357 - 360.
- [3] HILBERT V, BLINNE A, FUCHS S, et al. An extreme ultraviolet michelson interferometer for experiments at free-electron lasers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9): 095111.
- [4] 唐传祥, 邓秀杰. 稳态微聚束加速器光源 [J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 152901.
- [5] BOCHKOV G N, GAVRILIN A T, GOROKHOV K V. Generalized rayleigh criterion of two-point resolution[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2005, 48(5): 394 - 397.
- [6] 姚达, 刘欣, 岳世忠. 半导体光刻技术及设备的发展趋势 [J]. *半导体技术*, 2008, 33(3): 193 - 196.
- [7] 喻波. 极紫外多层膜膜厚梯度控制及抗热损伤研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [8] WAGNER C, HARNED N. Lithography gets extreme[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 24 - 26.
- [9] POWELL F R, JOHNSON T A. Filter windows for EUV lithography[C]//Proceedings of the 26th Annual International Symposium on Microlithography. Santa Clara: SPIE, 2001: 4343.
- [10] 段紫雯, 邢阳光, 彭吉龙, 等. 太阳短波极紫外双波段成像光谱仪设计 [J]. *光学学报*, 2024, 44(12): 1223001.
- [11] 章敏. 太阳过渡区爆发事件的紫外谱线学研究 [D].

- 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [12] BARBERA M, COLLURA A, GATTI F, et al. Baseline design of the thermal blocking filters for the X-IFU detector on board ATHENA[C]//Proceedings of Space Telescopes and Instrumentation 2014. Montréal: SPIE, 2014: 91445U.
- [13] GROVE D A, BETCHER J C, LAIRSON B, et al. Blocking filters with enhanced throughput for X-ray microcalorimetry[C]//Proceedings of Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation. San Diego: SPIE, 2010: 773940.
- [14] 周洪军, 夏玄志, 霍同林, 等. 计量线 5~140 nm 波段高次谐波分布及其抑制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1550 – 1556.
- [15] JIMENEZ K, NICOLOSI P, JUSCHKIN L, et al. Extreme ultraviolet free-standing transmittance filters for high brilliance sources, based on Nb/Zr and Zr/Nb thin films on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> membranes: design, fabrication, optical and structural characterization[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 695: 137739.
- [16] LARRUQUERT J I. Optical properties of thin film materials at short wavelengths[M]//PIEGARI A, FLORY F. Optical Thin Films and Coatings. Chantilly: Elsevier, 2018: 291 – 356.
- [17] RODRÍGUEZ-DE MARCOS L, LARRUQUERT J I, VIDAL-DASILVA M, et al. Transmittance and optical constants of Ca films in the 4-1000 eV spectral range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(8): 1910 – 1917.
- [18] SPILLER E A. Soft X-ray optics[M]. Bellingham: SPIE, 1994.
- [19] HUNTER W R, ANGEL D W, TOUSEY R. Thin films and their uses for the extreme ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(8): 891 – 898.
- [20] 孙诗壮. 激光等离子体极紫外光源收集镜多层膜若干问题研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [21] BIBISHKIN M S, CHKHALO N I, GUSEV S A, et al. Multilayer Zr/Si filters for EUV lithography and for radiation source metrology[C]//Proceedings Volume 7025, Micro- and Nanoelectronics 2007. Zvenigorod: SPIE, 2008: 702502.
- [22] TÖRMÄ P T, KOSTAMO J, SIPILÄ H, et al. Performance and properties of ultra-thin silicon nitride X-ray windows[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(1): 695 – 699.
- [23] 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.
- [24] 李笑然, 谢模杰, 陈逸文, 等. 自支撑极紫外滤片制备工艺有限元仿真及优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 2322001.
- [25] 张莉, 吴永刚, 曹鸿, 等. 软 X 射线激光用自支撑 Zr 滤光膜的制备及测量 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 953 – 956.
- [26] SPILLER E A, GREBE K, GOLUB L. Filters for soft x-ray solar telescopes[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(6): 625 – 631.
- [27] VEDDER P W, VALLERGA J V, SIEGMUND O H W, et al. The filters for the extreme ultraviolet explorer: calibration and lifetesting results[C]//Proceedings of 33rd Annual Technical Symposium. San Diego: SPIE, 1989: 1159.
- [28] HEMPHILL R, PELIZZO M G, HURWITZ M. Extreme-ultraviolet calibration of thin-film Zr filters for the Cosmic Hot Interstellar Plasma Spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4680 – 4685.
- [29] 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.
- [30] 王占山, 马月英, 张俊平, 等. 18.2nm 正入射显微成像系统滤光片的研究 [J]. 真空科学与技术, 1997, 17(1): 12 – 18.
- [31] 伍和云, 吴永刚, 王振华, 等. 自支撑 Zr 膜制备及软 X 射线透过性能研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(1): 1 – 4.
- [32] 朱京涛, 周涛, 朱杰, 等. 磁控共溅射制备 Si 掺杂 Al 薄膜的应力研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1431002.
- [33] 朱京涛, 郭胜, 赵娇玲, 等. 脉冲直流溅射 Zr 薄膜的微结构和应力研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1831001.
- [34] WU C T. Intrinsic stress of magnetron-sputtered niobium films[J]. *Thin Solid Films*, 1979, 64(1): 103 – 110.
- [35] CHKHALO N I, DROZDOV M N, GUSEV S A, et al. Freestanding multilayer films for application as phase retarders and spectral purity filters in the soft X-ray and EUV ranges[C]//Proceedings of EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space II. Prague: SPIE, 2011: 80760O.
- [36] WU H Y, WU Y G, LV G, et al. Preparation and characterization of free-standing Zr, PI and Zr/PI filter[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Thin Film Physics and Applications. Shanghai: SPIE, 2011: 79951F.
- [37] LABOV S, BOWYER S, STEELE G. Boron and silicon: filters for the extreme ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(4): 576 – 578.
- [38] 李笑然, 陈逸文, 谢模杰, 等. 极紫外高透射率自支撑硅薄膜滤片 [J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1936001.

- [39] CHKHALO N I, DROZDOV M N, KLUENKOV E B, et al. Thin film multilayer filters for solar EUV telescopes[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(17): 4683 – 4690.
- [40] EPARVIER F G, CHAMBERLIN P C, WOODS T N, et al. The solar extreme ultraviolet monitor for MAVEN[J]. *Space Science Reviews*, 2015, 195(1/4): 293 – 301.
- [41] KOBAYASHI K, CIRTAİN J, WINEBARGER A R, et al. The *High-Resolution Coronal Imager* (Hi-C)[J]. *Solar Physics*, 2014, 289(11): 4393 – 4412.
- [42] KUZIN S, BOGACHEV S, PERTSOV A, et al. EUV telescope for a cubesat nanosatellite[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(31): 8462 – 8471.
- [43] 付联效, 吴永刚, 伍和云, 等. 30.4 nm Cr/Al/Cr 自支撑滤光片的研制 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 235 – 239.
- [44] HATAYAMA M, TAKENAKA H, GULLIKSON E M, et al. High-transmittance free-standing aluminum extreme ultraviolet filter[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(12R): 122202.
- [45] 唐吉龙, 徐雄伟, 陈田祥, 等. 自支撑 Al 滤光片的制备 [J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 0631001.
- [46] BAI X Y, TIAN H, DENG Y Y, et al. The solar upper transition region imager (SUTRI) onboard the SATech-01 satellite[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(6): 065014.
- [47] NAKAMURA M, YAMASHITA K, YOSHIKAWA I, et al. Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner on Mars orbiter NOZOMI [J]. *Earth, Planets and Space*, 1999, 51(1): 61 – 70.
- [48] SOER W A, JAK M J J, YAKUNIN A M, et al. Grid spectral purity filters for suppression of infrared radiation in laser-produced plasma EUV sources[C]// *Proceedings of Alternative Lithographic Technologies*. San Jose: SPIE, 2009: 72712Y.
- [49] VOLODIN B A, GUSEV S A, DROZDOV M N, et al. Multilayer thin-film filters of extreme ultraviolet and soft X-ray spectral regions[J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2010, 74(1): 46 – 49.
- [50] ZHU J T, GUO S, ZHAO J L, et al. Component and performance evolution of Zr filters induced by annealing and synchrotron radiation in EUV range[J]. *Chinese Optics Letters*, 2025, 23(3): 033401.
- [51] CHKHALO N I, DROZDOV M N, KLUENKOV E B, et al. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(2): 021115.
- [52] CHKHALO N I, GUSEV S A, DROZDOV M N, et al. Influence of annealing on the structural and optical properties of thin multilayer EUV filters containing Zr, Mo, and silicides of these metals[C]// *Proceedings of International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009*. Zvenigorod: SPIE, 2009: 752105.
- [53] CHKHALO N I, DROZDOV M N, GUSEV S A, et al. Investigation of the thermo stability of aluminum thin-film filters with protective MoSi<sub>2</sub> cap layers[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 21 – 28.
- [54] 牛筱茜. Al 和 Zr 极紫外滤光片研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.
- [55] SCHUMACHER R J, HUNTER W R. Thin aluminum filters for use on the Apollo Telescope Mount XUV spectrographs[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(4): 904 – 908.
- [56] STARIN S R, ROUSSEL-DUPRE D C, BLOCH J J. Flight performance of UV filters on the ALEXIS satellite[C]// *Proceedings of International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. Denver: SPIE, 1999: 3765.
- [57] HUNTER W R, PURCELL J D, STEELE G N. Evaluation of pinholes in unbacked metal film filters to be used in rocket- and satellite-borne XUV Spectroheliographs[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(8): 1874 – 1879.
- [58] 徐雄伟. 极紫外滤光片的制备及表征 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [59] GUPTA V, WIEMAN S, DIDKOVSKY L, et al. Investigation of contamination of thin-film aluminum filters by MMH-NTO plumes exposed to UV radiation[C]// *Proceedings of Solar Physics and Space Weather Instrumentation VI*. San Diego: SPIE, 2015: 960408.
- [60] HENNECK R, BJOERKNAES K, JELINSKY S R. Transmission of thin indium filters in the EUV and lifetime tests[C]// *Proceedings of Optical Science, Engineering and Instrumentation*. San Diego: SPIE, 1997: 3314.
- [61] LAIRSON B M, GROVE D, SMITH R, et al. Improved EUV filter transmission with plasma cleaning[C]// *Proceedings of Space Telescopes and Instrumentation 2010*. San Diego: SPIE, 2010: 77322G.

(编辑: 张 磊)