

文章编号 1004-924X(2023)02-0141-09

17.1 nm 极紫外滤光片的制备

牛筱茜^{1,2}, 缪鹏飞³, 王瀚林^{1,2}, 王孝东¹, 陈波^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院大学, 北京 100190;

3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要:为了预警空间天气,需对日地空间物理过程进行监测,极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)滤光片是极紫外成像仪其中的重要组成部分,用来去除太阳辐射光谱中的非工作波段的辐射。为了优化 EUV 滤光片在 17.1 nm 波长处的透过率,本文基于比尔-朗伯定律通过理论计算和软件模拟确定 17.1 nm EUV 滤光片的材料及厚度。首先,采用真空热蒸发的方式在熔石英基底沉积脱膜层和金属薄膜,成功制备了以镍网为支撑的 EUV 滤光片。经测试,滤光片在 17.1 nm 处的透过率约为 43.81%,表面光滑平整且无明显针孔。接下来为了说明氧化层对透过率的影响,使用椭圆偏振光谱仪测量滤光膜样品,得到放置不同时间的氧化层膜厚,并测得粗糙度来优化模拟滤光片透过率。利用 IMD 拟合样品氧化层厚度及粗糙度,调整层厚达到与实际测量值最为接近的曲线。实验结果表明滤光片透过率的模拟值与测量值绝对误差约 1%,符合良好。本文为 17.1 nm EUV 滤光片提供了制备方法以及优化思路,在空间探测领域有重要应用价值。

关键词:金属薄膜;滤光片;栅网支撑;极紫外;氧化层

中图分类号:O484.4 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233102.0141

Preparation of EUV Filter at 17.1 nm

NIU Xiaoqian^{1,2}, MIAO Pengfei³, WANG Hanlin^{1,2}, WANG Xiaodong¹, CHEN Bo^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

3. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)*

* *Corresponding author, E-mail: chenb@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to forecast and warn of space weather, the disturbances of solar-terrestrial need to be monitored. Extreme Ultraviolet (EUV) filters can remove unwanted radiation, and they are an important part of the Extreme Ultraviolet Imager. In order to optimize the transmission of EUV filters at 17.1 nm, we chosen the material and thickness of EUV filters at 17.1 nm based on the Lambert-Beer law by theoretical calculation and software simulation. First, the release layer and metal thin-film were deposited by thermal evaporation, and EUV filters with nickel-mesh supported were successfully manufactured. After testing, the transmission of the filter whose surface is smooth and flat without obvious pinholes is about 43.81% at 17.1 nm. Next, in order to illustrate the effect of the oxide layer on the transmittance, the fil-

收稿日期:2022-05-11;修订日期:2022-06-07.

基金项目:国家自然科学基金天文联合基金资助项目(No. U203110007)

ter sample was measured by spectroscopic ellipsometry to obtain the thickness of the oxide layer at different placement times, and the roughness was measured to optimize and simulate the transmission of the filter. The thickness of the oxide layer and the roughness of the sample were fitted by IMD, and the layer thickness was adjusted to achieve the curve closest to the actual measured value. Experimental results indicate an excellent agreement between the measured and simulated values, and the absolute error of the transmittance of the EUV filter is only 1%. This study provides preparation methods and improvement ideas for EUV filters, and has important practical significance in space exploration.

Key words: metal thin-film; filter; mesh support; Extreme Ultraviolet(EUV); oxide layer

1 引言

紫外光谱段根据波长的不同可以划分成 EUV (Extreme Ultraviolet)、远紫外、日盲和近紫外等区域^[1-2], EUV 区在电磁波谱中波长范围通常为 5~50 nm。地球大气层中的臭氧层、氧原子和氮原子阻挡大部分紫外线到达地面,所以对空间的 EUV 观测必须在地球大气层上。

空间 EUV 成像仪器是 EUV 观测的重要载荷,一般由多层膜反射镜、金属滤光片和微通道板探测器构成^[3]。极紫外真空紫外薄膜反射镜作为重要的光学元件,已广泛应用于大型地面科学装置以及空间天文观测设备^[4]。多层膜反射镜在 EUV 工作波段有很高的反射率,但是在非工作波段如紫外、可见和红外等波段也有较高的反射率。为了抑制带外杂光的干扰,需引入滤光片消除非工作波段的辐射来确保探测光谱的纯度并提高信噪比。

EUV 滤光片大致分为三种:无衬底自支撑滤光片,具有栅网支撑和有机膜支撑滤光片。自支撑滤光片在运载和火箭发射过程中极易破碎,不利于制作成大面积的滤光片。有机膜因吸收较强,对透过率影响较大。栅网支撑滤光片机械强度高,能够很好地对金属薄膜起到支撑作用,且有良好的导热性。但网格会造成衍射,对成像质量有一定影响。在 EUV 滤光片研究方面,美国的 LUXEL 公司自 1973 年以来开展 EUV 和软 X 射线波段滤光片的研制,并成功应用在众多载荷中。例如美国发射的 Solar Dynamics Observatory Atmospheric Imaging Assembly (SDO-AIA) 等多个 EUV 载荷均使用了 Al 和 Zr 金属薄膜滤光片^[5]。国内同济大学对自支撑和有机膜支撑滤光片进行研究,研制出 30.4 nm Cr/Al/Cr 自支撑

滤光片和聚酰亚胺/Zr 膜滤光片^[6-7]。长春理工大学于 2022 年成功研制出自支撑 Al 滤光片^[8]。长春光学精密机械与物理研究所对 30.4 nm 处正入射成像系统滤光片进行研究,测量了在 30.4 nm 处自支撑 Al 滤光片的透过率^[9],但目前国内对栅网支撑的 EUV 滤光片暂无深入研究。

针对太阳观测的其中一条谱线 Fe IX/X 17.1 nm,本文系统介绍了栅网支撑滤光片材料选取及制备方法,通过真空热蒸发技术沉积脱膜层及滤光膜,测量滤光片在 17.1 nm 处的透过率,分析氧化层对滤光片的影响,利用椭圆偏振光谱仪建模、优化、拟合氧化层的厚度,进一步模拟透过率,以此对测量结果进行验证。分析讨论滤光片目前存在的问题以及提出后续改进想法。本文对空间 EUV 成像仪的研究有重要意义,对其他波段的滤光片研制具有参考价值。

2 基本原理

2.1 滤光片设计理论基础

EUV 波段波长很短,接近于原子尺度,光子能量和原子内电子的束缚能相当。当光子能量不足以使原子电离时,最常发生的过程是光子的相干散射。通过多电子原子散射截面的概念来描述 EUV 辐射与物质的相互作用^[10]:

$$\delta(\omega) = \frac{8\pi}{3} |f^0(\omega)|^2 = \left[\frac{8\pi}{3} r_0^2 \right] \times \left[\sum_{s=1}^Z \frac{-g_s \omega^2}{\omega^2 - \omega_s^2 + i\gamma\omega} \right]^2, \quad (1)$$

其中: $\delta(\omega)$ 是多电子原子散射截面; γ 是阻尼率; ω_s 是束缚电子的各种共振频率; ω 是入射波频率; $r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2.82 \times 10^{-13}$ cm,是经典电子半

径; Z 是被原子束缚的电子的个数; g_s 是振子强度, 表示与给定共振频率 ω_s 有关的电子的个数; $f^0(\omega)$ 是波长相关的原子散射因子, 可以将其表示为:

$$f^0(\omega) = f_1^0(\omega) + if_2^0(\omega), \quad (2)$$

其中, $f_1^0(\omega)$ 和 $f_2^0(\omega)$ 对应于原子散射因子的实部和虚部, 分别与反射和吸收有关。

每种材料与 EUV 辐射有不同的相互作用, 可以用复折射率的概念来表示为:

$$\tilde{n} = n - ik = 1 - \frac{Nr_0\lambda^2}{2\pi} f^0(\omega), \quad (3)$$

其中: n, k 为复折射率的实部和虚部, 实部代表入射光的相位变化称为折射率, 虚部代表吸收称为消光系数, n 和 k 是光学常数, 可用原子散射参数的实部 $f_1^0(\omega)$ 和虚部 $f_2^0(\omega)$ 来表示:

$$n = 1 - \frac{Nr_0\lambda^2}{2\pi} f_1^0(\omega), \quad (4)$$

$$k = \frac{Nr_0\lambda^2}{2\pi} f_2^0(\omega), \quad (5)$$

其中: N 是单位体积中原子个数, $N = \frac{\rho}{A} N_A$; ρ 是物质密度; N_A 是单位体积摩尔数; λ 为入射波长。

透射式滤光片如图 1 所示, 当光通过厚度为 d 的原子密度均匀的吸收介质, 假设反射率可忽略, 由比尔-朗伯定律表示在 EUV 波段不同材料透过率 T 的计算公式为:

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \exp(-\mu d) = \exp(-\mu^* \rho d), \quad (6)$$

其中: μ 为特定波长处的线性吸收系数; μ^* 为特定波长处的质量吸收系数, 单位: cm^2/g ; 质量吸收系数相比于线性吸收系数数值与物质密度无关, 实际中处理更为方便。 d 为材料的厚度。其中:

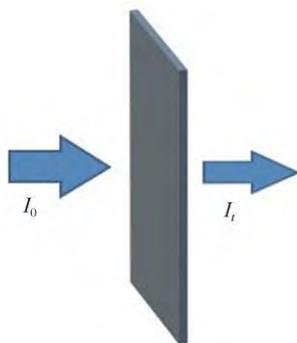


图 1 透射式滤光片示意图

Fig. 1 Schematic of transmission filter

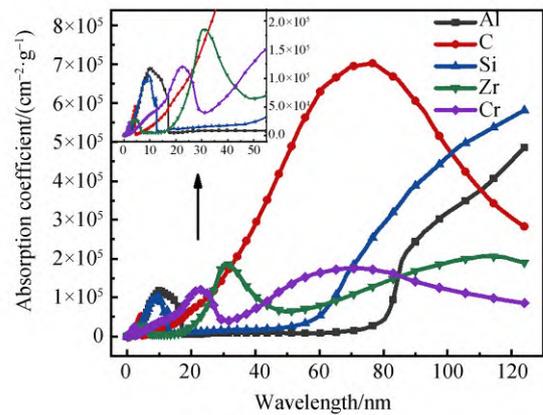
$$\mu = \frac{4\pi k}{\lambda} = 2Nr_0\lambda f_2^0(\omega). \quad (7)$$

通过式(6)即可计算出不同材料不同厚度滤光片的透过率。

2.2 EUV 滤光片的设计

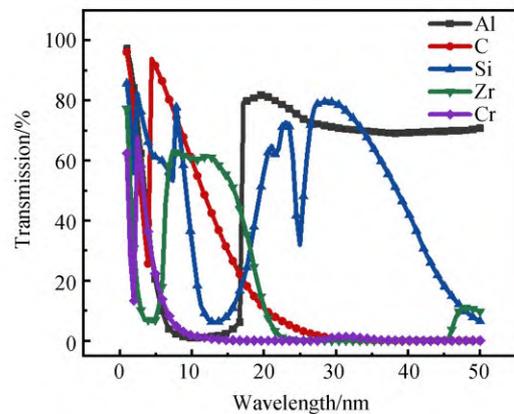
材料决定 EUV 滤光片的性能, 选材主要考虑三个方面: 较好的热稳定性及成膜特性^[11]; 较高的机械强度; 抗氧化性, 或采用在滤光片材料表面添加保护涂层的方法, 防止滤光片氧化^[12]。

根据材料本身性质和不同波长下的质量吸收系数和透过率, EUV 滤光片常选用的材料有 Al, C, Si, Zr, Cr 等, 如图 2 所示。本文软件模拟使用的是 Windt 开发的 IMD 软件, IMD 用于模拟



(a) 不同材料的质量吸收系数

(a) Absorption coefficients of different materials



(b) 厚度为 150 nm 不同材料的透过率

(b) Transmission of different materials with thickness of 150 nm

图 2 不同材料的质量吸收系数及透过率

Fig. 2 Absorption coefficient and transmission of different materials

单层或多层薄膜的光学性质(反射率,透射率,电场强度等)^[13]。将所有材料的厚度均设为 150 nm。根据图 2、图 3 中 Al 在各波段的透过率曲线可知,Al 在 17~67 nm 波段处具有较高的透过率,并且在 17 nm 吸收边以下、近紫外和可见光区域透过率很低^[14]。通过对材料的机械强度、热稳定性、成膜特性、无毒性和在 17.1 nm 处的质量吸收系数及透过率等方面的综合考虑,选择 Al 作为 17.1 nm EUV 滤光片的制作材料。

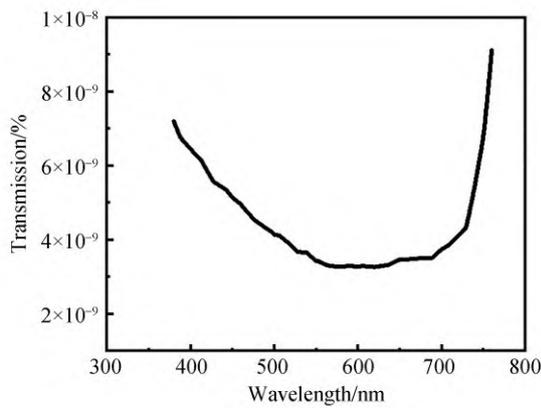


图 3 150 nm Al 在可见光的透过率曲线

Fig. 3 Transmission of 150 nm Al in visible

滤光片的透过率随滤光膜厚度的减小而增大,厚度减小的同时机械强度会降低,因此滤光膜厚度通常大于 100 nm^[15]。对 100~250 nm 厚的 Al 膜利用 IMD 软件进行透过率的模拟,如图 4 所示。模拟结果显示:150 nm 的 Al 膜在 17.1 nm

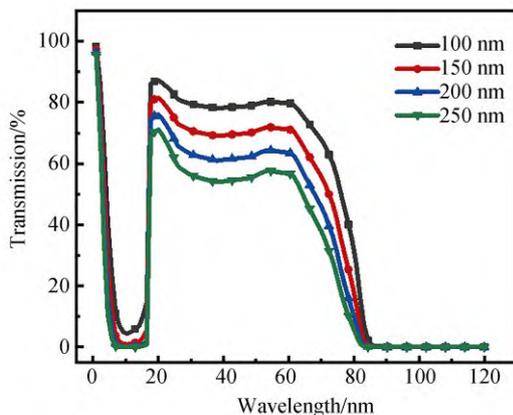


图 4 不同厚度 Al 的透过率曲线

Fig. 4 Transmission of Al with different thicknesses

处的透过率较高且在吸收边以下的波段透过率较低,因此选择 150 nm 厚的 Al 膜制备滤光片,保证有效抑制带外辐射的同时提高机械强度。

2.3 EUV 滤光片的制备

通常情况下,当膜厚为亚微米量级并且直径达到 1 cm 时,就需要网衬加以支撑^[16]。本文采用金属镍网支撑,以提高滤光片的机械性能和面积。滤光片的制备分为真空热蒸发沉积薄膜和脱膜打捞两个过程,滤光膜制备过程如图 5 所示。

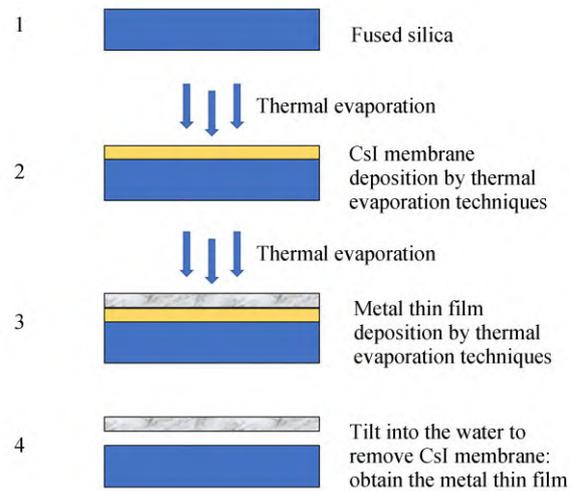


图 5 滤光膜的制备流程

Fig. 5 Preparation of filter

将脱膜层和金属薄膜依次通过热蒸发沉积在基底上。选用直径 25 mm 的超光滑洁净熔石英作为基底,基底在制作过程中为金属薄膜提供额外的机械支撑。脱膜层选用纯度为 99.999% 的 CsI,金属材料选用纯度为 99.99% 的 Al 丝,镀膜初始真空度为 9×10^{-4} Pa,温度为室温。

蒸镀完成后将其倾斜放入水中进行脱膜,CsI 极易溶于水,水作为脱膜剂简单方便并且环保无毒^[17]。静置 5~10 min 待脱膜层完全溶解,用透过率为 80% 的镍网将漂浮的 Al 膜打捞起,制备成具有栅网支撑的 EUV 滤光片。

制备好的滤光片样品如图 6 所示。在显微镜

下观察滤光片的正反两面可见,Al膜平整均匀无明显针孔,如图7所示。如果膜厚不均匀,则对薄膜特性有严重的影响^[18]。

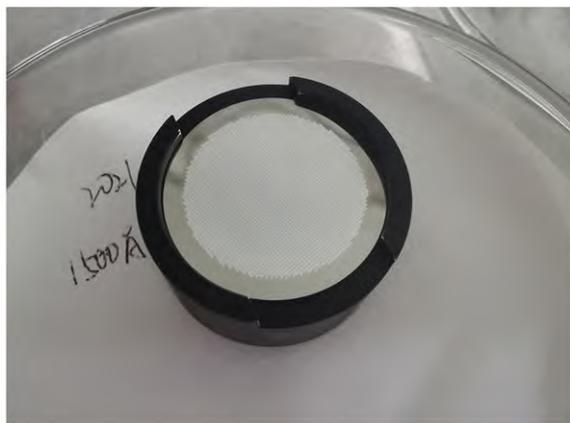
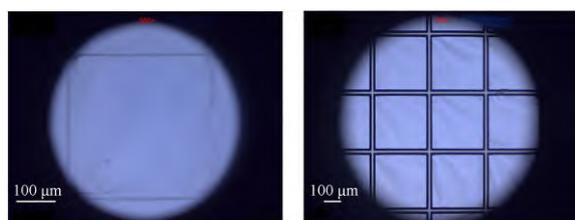


图6 具有栅网支撑的Al滤光片样品
Fig. 6 Al filter sample with mesh supported



(a) 正面
(a) Front side
(b) 背面
(b) Back side

图7 显微镜下滤光片表面形态

Fig. 7 Surface topography of mesh-support filter under microscope

3 测量实验与结果

3.1 滤光片的透过率测量

滤光片样品 EUV 波段的透过率测量在合肥国家同步辐射实验室进行,在 17.1 nm 的透射率达到 43.81%。美国 NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) 搭载的 The Extreme ultraviolet Spectro Photometer(ESP)^[19] 采用的是 150 nm 自支撑 Al 滤光片,考虑镍网所造成的遮挡,本文制备的滤光片透过率与国外设备滤光片透过率基本一致,如图8所示。样品测量曲线中的“毛刺”可能是测试时通过滤光片的光强不稳定造成的,多次测量可消除。

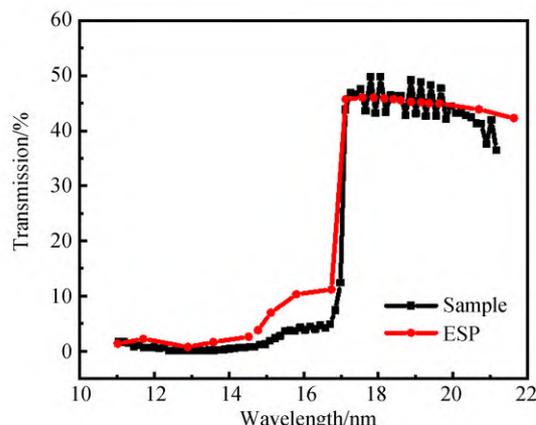


图8 ESP与样品滤光片透过率对比图

Fig. 8 Comparison between the transmission of ESP and sample

3.2 氧化层对滤光片影响研究

在实际应用过程中Al在空气中容易被氧化形成 Al_2O_3 ,氧化层的透过率比金属薄膜小很多,对滤光片的总体透过率影响较大^[20]。将Al膜在室温状态下放置,利用椭圆偏振光谱仪测量、建模、优化拟合得到氧化层在不同时间(1 d, 3 d, 7 d)的厚度随时间变化规律,模拟得到氧化后滤光膜的透过率。

Al作为基底建立模型,假定Al在空气中形成的 Al_2O_3 大约为5 nm^[21]。对于已知确定材料选择数据库中的光学常数参考值,波长范围为300~700 nm,测试入射角为 70° 。通过 χ^2 值检验拟合质量(量化实验数据与模型计算之间的差,值越小拟合越好)。由于氧化层的表面粗糙度很高,引入粗糙层可以优化 χ^2 ,从而得到更准确的模拟结果。

图9为样品放置24 h,引入粗糙度优化前后的拟合结果。初次拟合, χ^2 为0.796。利用原子力显微镜(AFM)测得氧化层的粗糙度,加入粗糙度影响对优化后模型再次拟合得到 χ^2 为0.789。表1为利用原子力显微镜和椭偏仪测得同一样品随时间变化的表面粗糙度与氧化层厚度,结果表明放置一周时氧化基本完成,氧化层厚度与模拟透过率基本不变。

样品放置7 d,在合肥同步辐射实验室进行透过率测量。将实际测量数据导入IMD,以进行建模和曲线拟合,调整层厚度以达到指定的目标轮廓。利用IMD拟合得到与测量值最为接近的

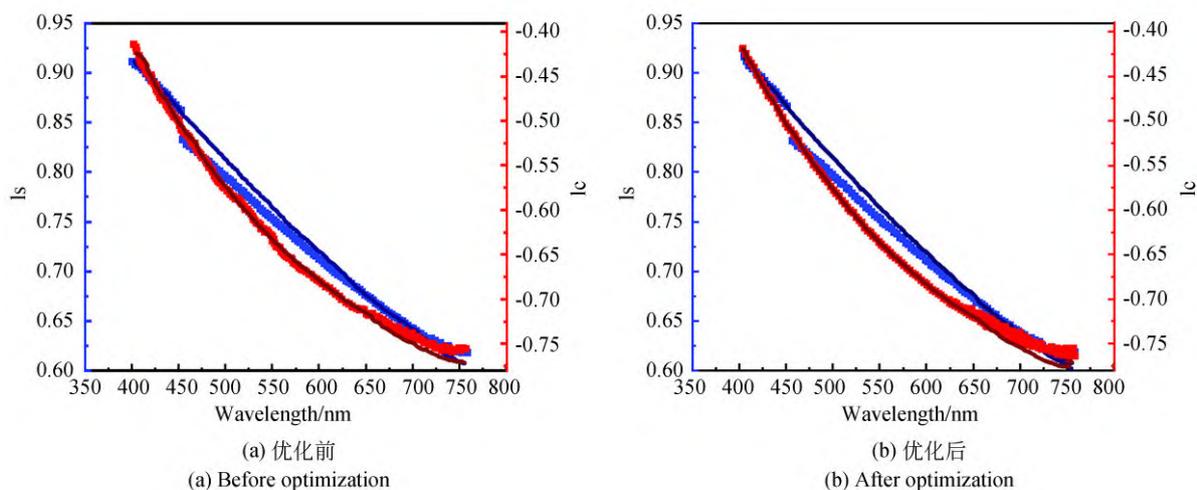


图9 椭偏仪拟合结果

Fig. 9 Results of fitting by spectroscopic ellipsometry

表1 粗糙度和氧化层厚度变化

Tab. 1 Variations in roughness and thickness of oxide layer

Time	Roughness/ nm	Thickness of ox- ide layer/nm	Transmission at 17.1 nm/%
Day1	2.56	5.52	45.35
Day2	2.77	6.46	42.75
Day3	2.72	6.61	42.34

曲线, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 拟合的厚度为 6.25 nm/139.88 nm/6.25 nm, 粗糙度为 1.87 nm, 在 17.1 nm 处透过率为 42.15%。将 IMD 拟合结果, 椭偏仪模拟结果与滤光片样品实际测试结果进行对比, 如图 10 所示。

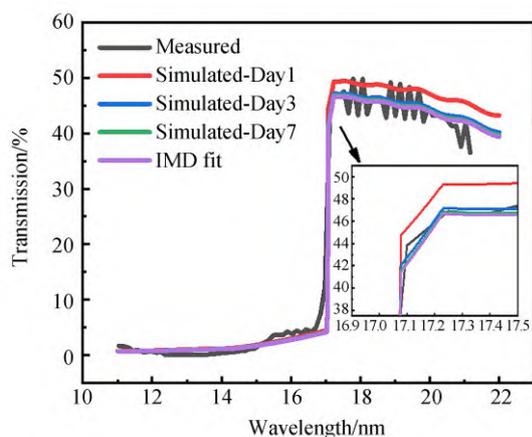


图10 滤光片模拟透过率与测量透过率对比图

Fig. 10 Comparison between simulated transmission and measured transmission of filter

结果显示模拟值与实验值绝对误差在 1% 左右, 符合良好。造成误差的可能原因: 一是 Al_2O_3 与 Al 分界不明显, 模拟厚度不准确造成模拟值的偏差; 二是可能由于光学常数不同, 表面污染, 仪器精度等问题引起, 在误差允许范围内。滤光片氧化后透过率显著降低, 如何防止滤光片氧化来提高在中心波长的透过率是 EUV 滤光片的重点研究问题。

3.3 滤光片表面 XPS 测试

利用 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分析滤光片表面的元素组成, XPS 探测的信号在样品表层的 5~10 nm 左右。所用 X 射线源为 Al $K\alpha$ 微聚集单色器, X 光束斑直径为 400 μm , 真空度为 8×10^{-8} , 入射角 90° , 功率 72 W, 分辨率为 0.4 eV。测试样品为采用真空热蒸发镀膜在 Si 基底上沉积 Al 薄膜, 厚度为 150 nm。测试中, 样品峰位用 C1s 峰进行数据校准 (284.8 eV)。

通过采集 Al 膜表层的 XPS 图谱, 如图 11 所示。可以确认滤光膜表层的主要成分是 Al 和 O, O 由于样品氧化来自于空气吸附, 表层还存在少量的 C, N。通过谱图积分面积计算出表层元素含量, 计算结果如表 2 所示。分析认为 C 由于样品表面吸附或污染引起的^[22], 而 N 可能为薄膜沉积时真空室内引入的微量杂质, 没有检测到基底 Si 元素说明样品致密性良好。

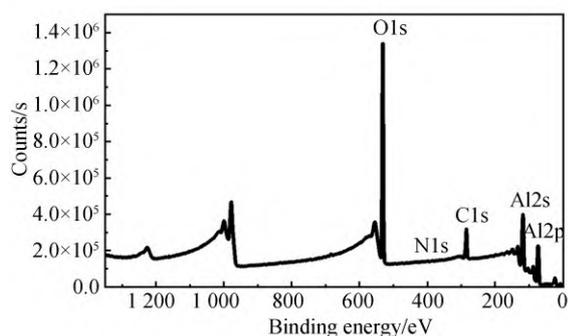


图 11 Al膜表面 XPS 全谱图

Fig. 11 XPS survey of the Al film on the surfaces

3.4 表面缺陷对滤光片影响研究

滤光片边缘可能存在一定数量的针孔,将样品放在强光灯下照射,如图 12 所示。针孔可能是蒸镀金属材料时引起的颗粒喷溅或脱膜剂潮解造成的,可能导致滤光片在可见光波段整体透过率增大^[6]。用 PerkinElmer Lambda 950 紫外可见分光光度计测量滤光片在可见光波段的透过率,与 IMD 模拟得到的可见光透过率相比增大,如图 13 所示。因 Lambda 950 的测试精度为 0.03%,测量极限大约在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级,测量数值达到了仪器的测量极限而使结果产生误差。

表 2 薄膜表面各元素的原子百分比

Tab. 2 Atomic ratio on the surface of the thin films

Name	Peak BE	Height CPS	FWHM/eV	Area(P) CPS/eV	Atomic/%
O1s	531.4	1 193 516	4.03	5 098 385	32.98
N1s	400.05	3 642	4.89	30 055.32	0.31
C1s	284.95	155 897.3	4.18	746 587.3	12.12
Al2s	118.22	289 219.5	4.87	1 480 892	27.8
Al2p	73.36	204 248.5	4.86	1 016 998	26.79

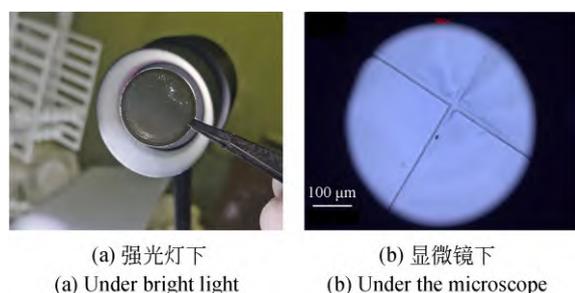


图 12 滤光片表面针孔

Fig. 12 Pinholes on the surface of a filter

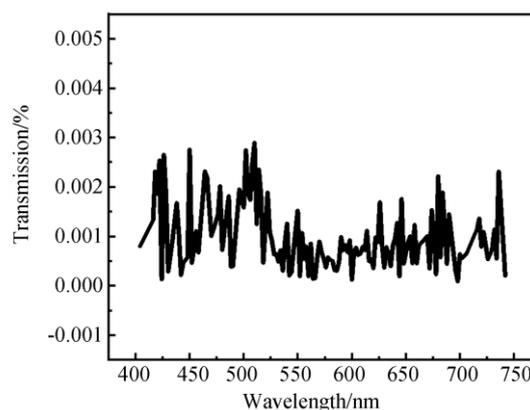


图 13 可见光波段滤光片的透过率

Fig. 13 Transmission of the filter in visible region

4 结 论

本文经过理论计算和软件模拟,选择 150 nm 的 Al 作为制备滤光片的材料。采用真空热蒸发技术在熔石英基底上依次沉积 CsI 和 Al,成功制备了镍网支撑的 EUV 滤光片。结果表明,滤光片样品在 17.1 nm 处的透过率测量值为 43.81%,表面光滑平整无明显针孔,符合应用要求。

由于 Al 在空气中极易氧化,对透过率影响较大。为了探究氧化层对透过率的影响,使用椭圆

仪测量、建模、拟合得到随时间变化的氧化层的厚度,利用原子力显微镜测量其表面粗糙度,模拟放置不同天数的滤光片透过率。并用 IMD 与实际测量值拟合得到滤光片在 17.1 nm 处的模拟透过率。最终实际测量值与模拟值绝对误差在 1% 左右,达到理论设计的预期效果。但目前依旧存在针孔及氧化问题,是下一步研究的重点方向。

参考文献:

- [1] 阮宁娟, 苏云. 国外紫外空间探测器发展综述[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 71-78.
RUAN N J, SU Y. Summarization of overseas space ultraviolet instrument development[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 71-78. (in Chinese)
- [2] 毛建邦, 王鹏晖, 汪井源, 等. 基于荧光波长下转换的日盲紫外光通信探测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10): 2296-2305.
MAO J B, WANG P H, WANG J Y, *et al.* Detection of solar blind ultraviolet communication based on fluorescent wavelength conversion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2296-2305. (in Chinese)
- [3] 杨爽. 空间紫外太阳望远镜主镜及探测器热控技术研究[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), 2021.
YANG SH. *Study on the Thermal Control Technique of Primary Mirror and Detector of Space Ultraviolet Solar Telescope*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [4] 齐润泽, 张锦龙, 吴佳莉, 等. 极紫外-真空紫外薄膜光学元件研究[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 48-58.
QI R Z, ZHANG J L, WU J L, *et al.* Thin film optical elements in extreme ultraviolet and vacuum ultraviolet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 48-58. (in Chinese)
- [5] LEMEN J R, AKIN D J, BOERNER P F, *et al.* *The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*[M]. Switzerland: Springer Nature Press, 2011.
- [6] 付联效, 吴永刚, 伍和云, 等. 30.4nm 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.
FU L X, WU Y G, WU H Y, *et al.* Fabrication and characterization of 30.4 nm Cr/Al/Cr self-supporting filters[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 235-239. (in Chinese)
- [7] 伍和云, 吴永刚, 吕刚, 等. 自支撑聚酰亚胺/锆膜的制备及性能改善[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 981-984.
WU H Y, WU Y G, LÜ G, *et al.* Preparation and characterization of free-standing polyimide/Zr film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 981-984. (in Chinese)
- [8] 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): 274-282.
TANG J L, XU X W, CHEN T X, *et al.* Preparation of self-supporting Al filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 274-282. (in Chinese)
- [9] 王丽辉, 何玲平, 王孝坤, 等. 30.4 nm 正入射成像系统滤光片[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 42-47.
WANG L H, HE L P, WANG X K, *et al.* 30.4 nm filter in normal incidence imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 42-47. (in Chinese)
- [10] ATTWOOD D T. *Soft x-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [11] TARRIO C, BERG R F, LUCATORTO T B, *et al.* Note: Thermally stable thin-film filters for high-power extreme-ultraviolet applications [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(11): 116103.
- [12] HILL S B, FARADZHEV N S, RICHTER L J, *et al.* Optics contamination studies in support of high-throughput EUV lithography tools[C]. *SPIE Advanced Lithography. Proc SPIE 7969, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography II, San Jose, California, USA*. 2011, 7969: 202-213.
- [13] WINDT D L. IMD-Software for modeling the optical properties of multilayer films[J]. *Computers in Physics*, 1998, 12(4): 360-370.
- [14] SCHMIDT J, KOLACEK K, FROLOV A, *et al.* Long-term changes in Al thin-film extreme ultraviolet filters [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(28): 8766-8773.
- [15] 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.
WANG ZH SH, MA Y Y, ZHANG J P, *et al.* The filters for a 18.2 nm normal-incidence microscopic imaging system[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1997, 17(1): 12-18. (in Chinese)
- [16] 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.

- ZHANG L, WU Y G, CAO H, *et al.* Preparation and research of free-standing Zr filter for soft X-ray laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 953-956. (in Chinese)
- [17] 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.
- 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. (in Chinese)
- [18] PAN Y G, LIN Z W, WANG B, *et al.* Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 740-746.
- [19] DIDKOVSKY L, JUDGE D, WIEMAN S, *et al.* EUV SpectroPhotometer (ESP) in Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE): Algorithms and Calibrations[M]. New York: Springer US, 2009.
- [20] KOLACEK K, FROLOV A, SCHMIDT J, *et al.* Aging of Al thin film extreme ultraviolet filters [C]. *SPIE Optics + Optoelectronics. Proc SPIE 11035, Optics Damage and Materials Processing by EUV/X-Ray Radiation VII, Prague, Czech Republic*. 2019, 11035: 67-72.
- [21] LARRUQUERT J I, KESKI-KUHA R A M. Far ultraviolet optical properties of MgF₂ films deposited by ion-beam sputtering and their application as protective coatings for Al[J]. *Optics Communications*, 2003, 215(1/2/3): 93-99.
- [22] PIAO H, MCINTYRE N S. Adventitious carbon growth on aluminium and gold-aluminium alloy surfaces[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2002, 33(7): 591-594.

作者简介:



牛筱茜(1997—),女,河北衡水人,硕士研究生,2019年于河北大学获得学士学位,主要从事短波光学薄膜设计制备方面的研究。E-mail: niuxiaoqian20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



陈波(1961—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,1990年于春光机所获得硕士学位,2003年于春光机所获得博士学位,主要从事软X射线-真空紫外波段光源、探测器、辐射计量及空间光学仪器等方面的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

导师简介:



王孝东(1978—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2001年于南京工业大学获得学士学位,2007年于汕头大学获得硕士学位,2010年于同济大学获得博士学位,主要从事短波光学薄膜设计制备及检测等方面的研究。E-mail: wangxiaodong@ciomp.ac.cn