

文章编号 1004-924X(2024)09-1293-14

40~90 nm 波段极紫外多层膜研究进展

来 搏, 蒋 励, 齐润泽, 王占山*

(同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所
先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:极紫外多层膜反射镜在许多科学与技术领域,如极紫外光刻、天体物理学、等离子体诊断、阿秒物理和自由电子激光等方面有重要应用。多层膜使极紫外波段反射镜在正入射条件下具有高反射率和窄带宽成为可能。多层膜反射镜是极紫外成像和光谱应用的重要器件,多层膜构成的极紫外成像系统已成功完成多个太阳单一谱线的成像观测。本文综述了 40~90 nm 波段最有前景的多层膜的研究进展。首先简要介绍了多层膜的基本原理,叙述了 40~90 nm 波段材料光学常数的测量,总结了 Mg 基、Sc 基和镧系材料以及其他材料组成多层膜的进展,给出了目前达到的最佳反射率和带宽,阐明了多层膜的时间稳定性,从而为 40~90 nm 波段多层膜制备提供了技术指导。

关键词:光学薄膜;极紫外;多层膜;窄带;高反射

中图分类号:TN405;TN23 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243209.1293

Research developments of extreme ultra-violet multilayers for 40-90 nm

LAI Bo, JIANG Li, Qi Runze, WANG Zhanshan*

(MOE Key Laboratory of Advanced Micro-structured Materials of Ministry of Education,
Institute of Precision Optical Engineering (IPOE), School of Physics Science and Engineering
Tongji University, Shanghai 200092, China)

* Corresponding author, E-mail:wangzs@tongji.edu.cn

Abstract: The multilayer mirrors in the extreme ultraviolet region have significantly advanced various scientific and technological fields, including extreme ultraviolet lithography, astrophysics, plasma diagnosis, attophysics, and free electron lasers. These multilayer coatings are crucial for developing mirrors that achieve high reflectivity and narrow bandwidth at normal incidence within the extreme ultraviolet spectrum. Multilayer mirrors are now key components in both imaging and spectroscopy across various applications. Optical imaging systems equipped with multilayer mirrors have conducted numerous solar observations in different emission lines, achieving unprecedented spatial and spectral resolutions. This paper reviews the progress of the most promising multilayer mirrors, covering the 40 nm to 90 nm range. Following a brief introduction to multilayer theory, it highlights the most promising material pairs and layer stack structures based on Mg, Sc, and lanthanides. The review emphasizes multilayer mirrors that exhibit high

收稿日期:2024-04-17;修订日期:2024-04-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12204353, No. 12003016);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

reflectivity within the 40 nm to 90 nm wavelength range and discusses their temporal stability.

Key words: optical film; extreme ultra-violet(EUV); multilayer; narrow band; peak reflection

1 引言

太阳的色球、过渡区、日冕等不同层次区域会辐射出大量的极紫外线谱,它携带了太阳不同层次等离子体温度和密度以及化学元素丰度等信息^[1],与太阳风起源、日冕加热、日冕物质抛射、太阳耀斑和太阳射流等重大科学问题的认知关联密切^[2-3]。这些辐射与实时太阳风等离子体和星际间磁场测量的紧密结合更是理解空间天气及其对地球影响的动力学过程的重要环节^[4]。因此,极紫外波段高分辨率和高信噪比成像与光谱观测是研究太阳大气诸多动态过程的基础与前提。20 世纪 50 年代,人们成功将探测的空间太阳光谱拓展到极紫外波段^[5],自此太阳极紫外光谱和成像探测成为研究重点。除了太阳辐射极紫外光,宇宙中众多天体也向外辐射极紫外光。最初,人们认为这些极紫外光在空间中传播时会被星际间介质吸收,无法探测。20 世纪 90 年代初,极紫外探测卫星^[6-7]检测到大量的极紫外辐射天体,还在银河系外得到了 10 个极紫外辐射源,说明 10~100 nm 波段的极紫外辐射是可以在含有星际介质空间中传输的,由此开启了空间极紫外辐射研究的序幕。行星科学,特别是系外行星的研究日益受到人们的关注,行星大气的变化与其可居住性密切相关,这是欧洲天体生物学路线图与美国天文学和天体物理学领域 2020~2030 十年规划中的优先发展方向^[8],其与行星大气加热和极紫外辐射引发的大气电离密切相关^[9-10]。

随着科技的发展,极紫外光学技术得到了前所未有的进步。目前,极紫外波段尚没有统一定义,尽管不同研究机构有不同的定义,但其范围还是基本一致的。本文定义的极紫外波段是 5~115 nm。根据辐射与物质相互作用机制,在极紫外波段材料的折射率与消光系数和其他波段有较大区别,主要表现为折射率基本上小于且接近于 1,消光系数不为 0,因此,极紫外波段能用的光学元件和系统有其独特性。任何单层膜的反射

率随着掠入射角的增加而逐渐减小,正入射反射率一般不到 1%,在掠入射角较小的范围内才有较大的反射率。消光系数不为 0 的透射元件无法使用。若想使用反射系统,则需要尽可能提升非掠入射条件下的镜面反射率。在 X 射线被发现后的相当长时间内,人们一直探索人工晶体结构来填补天然晶体晶格常数的不足。直到 1972 年,Spiller^[11]提出了具有不同吸收率的两种材料交替组成的单层膜结构,大幅度提升了非掠入射条件下的反射率,促进了光学多层膜的发展。组成多层膜的两种膜层分别是吸收层(也叫散射层,通常是高原子序数材料)和间隔层(通常是低原子序数材料)。历经多年的发展,极紫外多层膜已成为极紫外波段一类重要的光学元件。第一个基于多层膜的天文观测实验是 1985 年完成的^[12],获得了太阳 4.4 nm(Si-XII 谱线)波长处的图像。现有的空间太阳极紫外望远镜^[13-20]都是在 40 nm 以下波段实现太阳观测。2022 年,我国发射了 46.5 nm 的极紫外望远镜^[21]。总体来说,与 40 nm 以下波段极紫外多层膜研究相比,40~90 nm 波段多层膜的研究远远不够。

40 nm 以上极紫外波段多层膜之所以进展缓慢,是因为首先 40 nm 以上波段任何材料的吸收率都很大,且仅有有限种材料的光学常数得到了准确的实验测量,并用于多层膜设计和制作过程的分析;其次,多层膜的光谱分辨率与参加相干相长干涉的膜层数成正比,由于膜层材料的吸收大,参与相长干涉的多层膜膜对数变少,多层膜的光谱带宽过大,无法达到选出所需波长进行观测的需求;再次,膜层内微小杂质会引起膜层吸收系数的变化,因此,实际制备的多层膜内部和表面引入的杂质会严重降低多层膜性能;最后,对于目前其他波段通常使用的 3 种材料的膜层结构,材料顺序对反射率的影响较大,而在 40~90 nm 波段缺乏准确可靠光学常数的情况下,在多种材料组成的薄膜架构中很难确定膜层的顺序和厚度。

本文综述了 40~90 nm 波段极紫外多层膜的

研究进展,涵盖多层膜原理、光学常数测量、多层膜材料选择与不同材料组合性能等内容。

2 工作原理

光学常数是材料的折射率和消光系数,用复折射率表示^[22]:

$$\tilde{n} = 1 - \delta + i\beta, \quad (1)$$

式中: δ 是折射率小量(即折射率 n 与1的差值), β 是消光系数。复折射率是极紫外多层膜设计的基础。缺少准确的材料复折射率,难以设计出多层膜结构,这也是40~90 nm多层膜研究较少的原因之一。

最基本的多层膜(结构类型I)是由材料A(厚度 d_A)和材料B(厚度 d_B)两种膜层交替沉积组成的周期结构,吸收小的材料B为间隔层,吸收大的材料A为散射层。由于多层膜工作在极紫外波段,膜层厚度在纳米量级。膜层间的相长干涉极大地增强了多层膜的反射率。通过优化膜层厚度,可以在确定的入射角下改变多层膜反射率的中心波长。膜层的沉积厚度是可以任意改变的,多层膜峰值反射率对应的波长也可以任意改变。周期多层膜类似于天然晶体的反射,其峰值反射率所在波长位置满足修改后的布拉格公式^[23],即:

$$m\lambda = 2d \sin \theta \sqrt{1 - \frac{2\delta_{\text{eff}}}{\sin^2 \theta}}, \quad (2)$$

式中: $\delta_{\text{eff}} = \gamma\delta_A + (1 - \gamma)\delta_B$ 为多层膜两种材料组合的有效折射率小量, m 是反射级次, $d = d_A + d_B$ 为多层膜周期, $\gamma = d_A/d$ 是散射层厚度与多层膜周期的比值。一般情况下, γ 小于0.5。周期多层膜主要的性能参数有峰值反射率和反射带宽。多层膜反射率可采用迭代法计算,多层膜带宽与参与反射的多层膜膜对数 N 成反比,可表示为^[24]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{mN}. \quad (3)$$

由式(3)可知,若要减小多层膜的带宽,需要增加多层膜参与相干相长干涉的膜对数。由于膜层吸收,极紫外辐射穿透到一定深度后被吸收殆尽,因此,特定材料组合的极紫外多层膜的带宽是确定的,很难持续提升。由于40 nm以上波

段材料吸收增大,很难获得窄带宽的多层膜。在空间观测He I(58.4 nm)太阳图像时,需要抑制58.4 nm附近的Ne VI(56.28 nm),O III(59.96 nm),O IV(60.84 nm)和Mg X(60.98 nm)辐射谱线,此时多层膜带宽要小于4 nm。

极紫外多层膜性能除了与材料组合有关,还与两种膜层交界面处的状态关系密切。在两种膜层交界面处会形成界面粗糙度、界面扩散和界面化合状态,这些状态会严重影响多层膜的反射性能。界面粗糙度会使极紫外光散射到非反射方向,降低镜面反射,界面粗糙度的形成与多层膜基底和制作的实验参数密切相关。界面扩散会降低材料间的光学衬度,从而减小反射,增加透入膜层的极紫外辐射,导致极紫外辐射更多被吸收,界面化合状态与扩散类似,也降低多层膜的反射。界面扩散与化合与组成多层膜两种材料的性质密切相关。极紫外多层膜不同膜层界面形成的影响因素主要有材料组合、制备参数和最高工作温度等。首先,多层膜材料的选择依据是获得高反射率,然而两种材料间的扩散与化合明显,特别是在40~90 nm波段可选择材料较少。为了阻止两种材料的扩散与化合,目前较为常用的方法是在两种膜层间插入另外一种材料,称之为阻隔层,形成密度变化比较陡峭的界面,进而获得高的反射率^[25-29]。除此之外,增加阻隔层还能增加极紫外多层膜的温度和时间稳定性^[30-32]。阻隔层添加方式有三种:第一是在材料A和材料B的界面添加,第二是在材料B和材料A界面添加,第三是在材料A和材料B界面与在材料B和材料A界面添加。上述方式统称为结构模型II。除了两种材料组成多层膜外,还可以采用3种甚至更多种材料组成多层膜。多层膜通常由3种材料组成^[33-34],这样可以获得更高的反射率,但往往会增加极紫外多层膜的反射带宽。这种多层膜称为结构模型III。在40~90 nm波段,采用3种材料确实可以增加多层膜的反射率。

在极紫外波段,表面氧化和污染会降低多层膜的反射率,因此,需要采用表面保护膜层来防止多层膜表面的氧化和污染^[35-36]。在40~90 nm,氧化和污染的影响更加强烈,如何抑制这种影响成为亟待解决的问题。

3 光学常数

40~90 nm 波段多层膜的设计与制备需要基于材料的光学常数。美国伯克利国家实验室给出的光学常数为 30~10 keV^[37],然而,没有光子能量低于 30 eV 的材料。因此,人们进行了大量的测量和计算,以补充部分空缺的光学常数。目前,主要有两种光学常数测量方法,一种是在超高真空中,将待测材料沉积在栅网支撑的 5 nm 或 10 nm 的 C 膜上,再直接将待测样品在真空中传递到测试位置进行测试^[38-39];另一种方法是将待测薄膜沉积在极紫外敏感的二极管上,再在待测薄膜上沉积一定厚度的保护膜,然后进行测试^[40-41]。不管是哪一种测试方法,都首先要测得薄膜的透过率,由此获得薄膜的消光系数,再由 Kramers-Krönig 关系获得薄膜的折射率^[42-43]。由于 40~90 nm 波段材料吸收大,材料的不纯和污染会导致光学常数很难测准。人们一直在尝试新的测试方法,以便获得更加准确的光学常数。

在超高真空室中,薄膜制作在栅网支撑的 C 膜上,然后再传递到测试室进行薄膜透过率的测量。要在其他测试装置上进行测量,则需要在薄膜表面上制作保护膜。Larruquert 等^[44]在 6.7~174.4 nm 波段测试了 Sc 膜的光学常数,其中 53.6~174.4 nm 波段是原位完成的,低于 30 nm 波长的测量是离线完成的。为了进行离线测试,样品表面沉积 C 保护膜。Fernández-Perea 等^[39]进一步在 20~1 000 eV 能段测试了 Sc 膜的透过率,获得了 Sc 膜的消光系数,通过 Kramers-Krönig 关系获得了 Sc 膜的折射率。他们^[45]还测量了不同厚度 Ce 膜在 6~1 200 eV 能段的透过率,得到其消光系数,得出 Ce 膜的最小吸收能量点在 16.1 eV。Larruquert 等^[46]测量了 Yb 薄膜在 7~1 700 eV 能段的透过率,发现 Yb 的低吸收区在 12~24 eV,最低吸收能量点在 21.2 eV。Fernández-Perea 等^[47]进一步完善了 Ce 膜透过率测试,得到其透射带在 12~25 eV 内,吸收最小值在 16.1 eV。接着,他们测量了 Pr 薄膜在 4~1 600 eV 能段的透过率^[48],得到 Pr 薄膜的透射带为 12~25 eV,最大透过率在 16.87 eV 处。他们还^[49]测量了 Eu 薄膜在 8.3~1 400 eV 能段的透

率,得到 Eu 薄膜的透射带为 12~25 eV,最大透过率在 16.7 eV 处。2009 年,Vidal-Dasilva 等^[50]测量了 Tm 薄膜在 2.75~1 600 eV 能段的透过率和光学常数,得到 Tm 薄膜的透射带为 17~25 eV,最大透过率在 23 eV 处。2009 年,Fernández-Perea 等^[51]测量了 SiO 薄膜在 7.1~800 eV 能段的透过率,得到 SiO 薄膜的光学常数。García-Cortés 等^[52]测量了 Lu 薄膜在 3~1 800 eV 能段的透过率和光学常数,其在 20~26 eV 有透射峰,最佳透过率在 25.1 eV 处。2011 年,Fernández-Perea 等^[53]测量了 Ho 薄膜在 3~1 340 eV 能段的透过率和光学常数,得到 Ho 薄膜的透射带为 17~23 eV,最大透过率在 21.5~22 eV 处。2012 年,Rodríguez-de Marcos 等^[54]测量了 Sr 薄膜在 6~1 220 eV 能段的透过率和光学常数,得到 Sr 薄膜的透射带为 14~20 eV,最大透过率在 18.5 eV 处。2015 年,Rodríguez-de Marcos 等^[38]测量了 Ca 薄膜在 4~1 000 eV 能段的透过率和光学常数,得到 Ca 薄膜的透射带为 17~25 eV,最大透过率在 23 eV 处。

直接将待测薄膜沉积在极紫外敏感二极管上,也能够测量材料的光学常数。2004 年,Us-penskii 等^[55]针对在空气中样品表面化学反应引起极紫外波段光学常数测试存在较大误差的问题,推导了带有保护膜样品反射率和透过率与膜厚的精确关系,大大简化了具有相同厚度保护膜和不同厚度样品的折射率和消光系数的确定,得到了 Sc 薄膜样品 18~70 eV 和 Ti 薄膜样品 18~99 eV 的光学常数。2006 年,Kjornrattanawanich 等^[41]测量了 3~100 nm 波段 Nd 和 Gd 材料的光学常数。测试时,待测薄膜直接沉积在光电二极管上,Nd 膜层厚度在 5~172 nm,Gd 厚度在 8.6~180 nm,样品表面沉积了 7 nm 的 Si 保护层。Seely 等^[56]测量了 La 和 Tb 的光学常数,发现 La 在 90 nm 附近有透射带,其最低能量吸收点在 16.5 eV,Tb 的最低能量吸收点在 19.5 eV。Dy 的光学常数初步测试表明,其透射带峰值在 60 nm 位置。2009 年,Kjornrattanawanich 等^[40]将 Dy 薄膜直接沉积在光电二极管表面上,再镀 7 nm 的 Si 作为保护膜。在 Dy-on-Si 基板和 Si capping-on-Dy 界面都沉积了 2 nm 的 W,避免界面扩散。Dy 膜层厚度为 7.6,16,56.8,84.1 和

120 nm,在21 eV有透射峰。同时,他们还修正了La,Tb,Nd和Gd薄膜的光学常数。2010年,Kjornrattanawanich等^[42]将Sm,Ho和Er薄膜直接沉积在光电二极管表面上形成Si/W/Sm/W结构,Sm厚7 nm和100 nm,Si/W/Ho/W和Si/W/Er/W薄膜中Ho和Er分别是8 nm和90 nm,W膜厚2 nm,外层Si厚7 nm,其表面会生成2 nm的氧化硅,由此得出Sm,Ho和Er膜层的光学常数。

从大量测得的材料光学常数中,人们发现测量结果存在一定的偏差,而且波长越长,偏差越大。2022年,Delmotte等^[57]提出了一种确定波长大于20 nm的极紫外吸收系数方法,给出了考虑保护膜与待测薄膜间反射效应的解析公式,由此可以精确得到光学常数,并测量了Al膜在20~72 nm波段的光学常数。

图1给出了极紫外波段常用的Sc,Al,Mg和Si的消光系数^[57],图2给出了部分镧系元素的吸收系数^[58]。这些材料的光学常数是研制40~90 nm波段多层膜的基础。多层膜的反射性能依赖于膜层材料的选取。周期多层膜需选择一种吸收尽可能低的材料作为间隔层,理想的间隔层材料应有一个比工作波长略微短的吸收线,在40~90 nm波段,这样的吸收线基本上是镧系金属的O吸收线和稀土元素的N吸收线;另一种材料应与间隔层材料形成大的光学衬度,同时吸收应尽可能低。

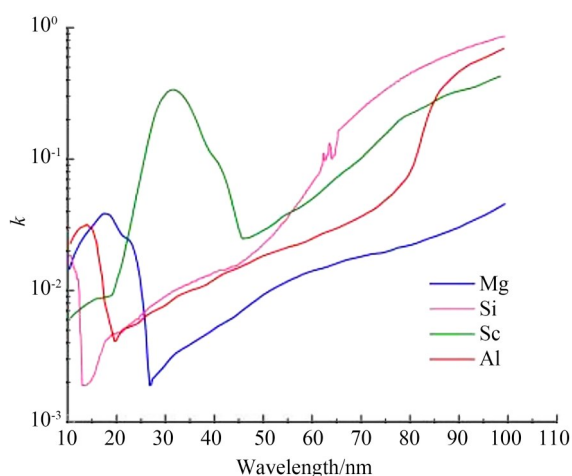


图1 极紫外波段常用材料的消光系数

Fig. 1 Extinction coefficient of commonly used materials in EUV range

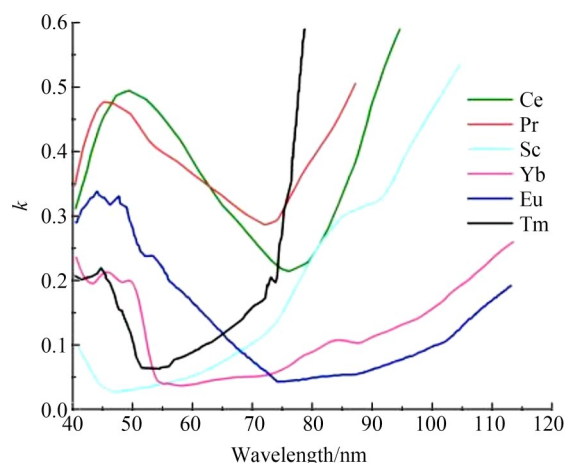


图2 极紫外波段实验测定镧系元素的消光系数

Fig. 2 Extinction coefficient of tested Lanthanide elements in EUV range

4 40~90 nm波段多层膜进展

目前,在40~90 nm波段工作的多层膜主要有Mg/SiC,Sc/Si,Sc/Al,Ru/Al,Mo/Al,Si/Gd,Si/Tb,SiC/Tb,Ge/Si和Al/Yb等材料组合。

4.1 Mg基多层膜

Mg的L2,3吸收线约在25 nm,原则上在略大于吸收线的波长处,Mg多层膜可以得到最高反射率。Mg基多层膜包含Mg/Co,Mg/C,Mg/B₄C,Mg/Si和Mg/SiC两种材料以及Mg/Sc/SiC三种材料的组合形式^[59-63]。在两种材料组合的多层膜中,Mg/Si多层膜的反射率为5.6%,Mg/B₄C的反射率仅有0.2%,Mg/SiC比较稳定,性能最好,反射率通常可达到42%~44%,是研究最多的Mg基多层膜。Mg/SiC多层膜在He II谱线的30.4 nm处的理论反射率高达60%,带宽为1.4 nm,而实际多层膜的最高反射率只有45%,这是由于Mg与SiC之间相互扩散导致的^[64]。美国太阳动力学天文台原计划采用Mg/SiC多层膜,但因其时间稳定性未达要求而最终放弃^[65]。为了提高Mg/SiC多层膜的稳定性,Soufli等^[66]阐明了Mg/SiC多层膜性能变差的来源和演化过程。对于沉积在非常洁净基底上的Mg/SiC多层膜,腐蚀多发生在多层膜结构的表面上。环境中的离子、氢氧根等可通过具有针孔等缺陷的磁控溅射薄膜到达表面SiC层下的Mg层,使Mg与环境物质相互作用。在基板上和最

上层 Mg 上镀制 20 nm 的 Al, 经过数周时间, Mg 和 Al 会融合形成 MgAl 合金, 可极大增强 Mg/SiC 多层膜的抗大气腐蚀性, 从而增强时间稳定性。在表面上镀制 3~4 nm 的 SiC 保护层, 可以使多层膜性能在 4 年内保持稳定^[67]。Mg/Sc/SiC 三种材料组合多层膜在 28.4 nm 处得到了 52.8% 反射率和 1.6 nm 的带宽。

Mg/SiC 多层膜一般工作在 25~35 nm 波段, 也可延长至 80 nm 波段。Fernández-Perea 等^[66]制作了 $[\text{SiC}/\text{Mg}]_{40}/\text{SiC}$ 结构, 周期为 52.4 nm, γ 值为 0.77, SiC 厚度为 10.8 nm, 在 76.9, 46.8 和 33.1 nm 处, 其反射率分别为 40.6%, 33.4% 和 17.2%, 带宽分别为 15, 3.6 和 1.2 nm。带有抗腐蚀层的 $\text{Al}/[\text{SiC}/\text{Mg}]_x\text{N}/\text{SiC}/\text{Al-Mg}/\text{SiC}$ 多层膜的周期为 52.2 nm, γ 值为 0.78, SiC 厚度为 11.8 nm, Al-Mg 厚度为 45 nm, SiC 厚度是 9.5 nm。多层膜的反射率峰值位置在 76.0, 46.9 和 33.1 nm, 峰值反射率分别为 38.0%, 30.0% 和 15.4%, 带宽分别为 14.1, 3.6 和 1.2 nm。 $\text{Al}/[\text{SiC}/\text{Al-Mg}]_x\text{N}/\text{SiC}$ 多层膜周期为 45.0 nm, γ 值为 0.79, SiC 厚度是 8.8 nm, 反射率峰值位置分别在 64.5, 40.4 和 28.6 nm, 峰值反射率分别为 29.5%, 24.6% 和 15.3%, 带宽分别为 9.6, 2.2 和 0.9 nm。 $\text{Al}/[\text{SiC}/\text{Mg}]_{40}/\text{SiC}/\text{Al}/\text{SiC}$ 结构的多层膜周期为 31.5 nm, γ 值为 0.75, SiC 厚度为 6.2 nm, Al 厚度为 30.9 nm, SiC 厚度是 9.2 nm, 在 55.7 nm 和 30.7 nm 处的反射率分别为 38.8% 和 19.4%, 带宽分别为 5.6 nm 和 1.1 nm。由此可知, Mg/SiC 多层膜在 55~76 nm 波段可以获得 30%~40% 的反射率, 带宽为 5.6~15 nm。除带宽较宽外, Mg/SiC 多层膜还具有反射率较高的高级次反射。

Bogachev 等^[68-69]提出在 Mg/Si 多层膜界面处分别添加不同阻隔层方法, 制作了 $\text{Si}/\text{B}_4\text{C}/\text{Mg}/\text{Cr}$ 多层膜, 在 30.4 nm 处其反射率为 46%, 但一年后, 反射率下降到 30%, 稳定性仍然不高。他们^[69]还制备了 Mg/Al 及添加界面阻隔层的 Mg/Al/C 和 Mg/Si/Al/C 多层膜, Mg/Al 多层膜在 58.4 nm 处的最高反射率达 21%, 但这些多层膜的时间稳定性都比较差。他们同时研究了 Mo/Mg 多层膜, 当 Mo 的 γ 值为 0.07~0.153 时, 多层膜在 58.4 nm 处的峰值反射率达到 30%~

38%, 不过 Mg/Mo 多层膜反射率每年会下降 50%。Polkovnikov 等^[70]发展了 Mg/Be 多层膜, 其在 30.4 nm 处近正入射实测反射率是 49%, 在空气中反射率会持续下降。若沉积 13 nm 厚的 Al 膜, 反射率增加到 56%, 多层膜结构的时间稳定性明显提升。图 3 展示了 Mg/SiC, Mg/Al 和 Mg/Mo 3 种多层膜在 40~90 nm 波段的最高反射率。目前, 由于 Mg 的化学活性过高, 人们尚没有解决 Mg 基多层膜的长时间稳定性问题, 因此, Mg 基多层膜仅可应用在实验室中, 无法应用在空间天文观测中。

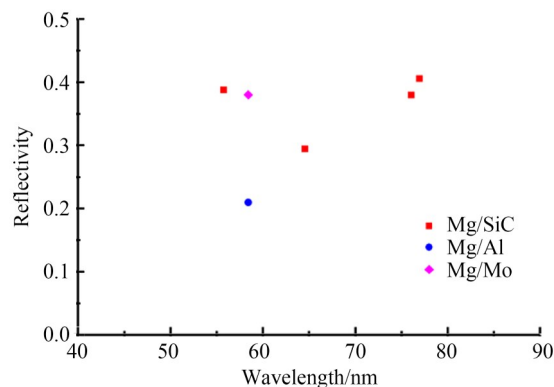


图 3 Mg/SiC、Mg/Al 和 Mg/Mo 3 种多层膜在 40~90 nm 波段的最高反射率

Fig. 3 Peak reflectivity of Mg/SiC, Mg/Al and Mg/Mo multilayers in 40-90 nm range

4.2 Sc 基多层膜

当 Sc 基多层膜工作在 Sc 的 M2,3 吸收线 43.8 nm 以上时, 会得到较高的峰值反射率和较窄的带宽。Sc/Si 是最早提出的多层膜组合^[71], 用来反射类 Ne Ar 的 46.9 nm 极紫外激光。人们制作了周期为 18~27 nm, γ 为 0.44 的多层膜, 在 36.5 nm 处得到了 54% 的反射率, 多层膜高分辨率 TEM 图像显示, Sc/Si 多层膜的界面宽度约为 6 nm。Yulin 等^[72]使用四层膜系模型拟合了 Sc/Si 的 X 射线掠入射反射测量结果, 得出 Sc/Si 多层膜的 Sc-on-Si 界面宽度为 2.6 nm, Si-on-Sc 界面宽度为 1.6 nm, 在 $\gamma=0.4$ 周期 25.45 nm 的多层膜在 45.9 nm 处反射率达 52%; 若 γ 为 0.37, 反射率会再有 2%~3% 的提升。Gautier 等^[73]提出采用 3.2 nm 厚的表面保护层, 使得 46 nm 的反射率从 37% 增加到 46%。人们采用 $\text{W}^{[74]}$, $\text{Cr}^{[72]}$,

C^[75], B₄C^[75-76], ScN^[76]和CrB₂^[77]来增加Sc/Si多层膜的热稳定性,但没有增加Sc/Si多层膜的反射率。

为了实现太阳过渡区46.5 nm的成像观测, Qi等^[78-79]制备了窄带Sc/Si多层膜,将常规Sc膜的 γ 从0.35变为0.65,此时Sc/Si多层膜在45.5 nm的反射率达到37.9%,带宽为3.68 nm,小于常规Sc/Si多层膜的4.4 nm,满足隔离太阳46.5 nm附近其他谱线的目的。该成像望远镜成功获得了太阳46.5 nm谱线的观察^[21]。

为了提升17.2~62.0 nm波段多层膜的反射率, Delmotte等^[80]提出将两种低吸收材料组合与第三种材料构成周期多层膜的设计方法,设计了17.2~62.0 nm波段的高反射Al/Sc/B₄C, Al/Mo/B₄C和Si/Mo/B₄C多层膜。其中, Al/Sc/B₄C多层膜在整个波段的反射率都超过45%,特别是在31.0~62.0 nm波段,其反射率明显优于其他两种多层膜。他们用离子束溅射方法制作了Al/B₄C/Sc/B₄C, Al/Sc/SiC和Al/Sc/B₄C多层膜, X射线掠入射反射测量结果表明,这些多层膜结构清晰, Al/Sc/SiC多层膜的界面粗糙度小于Al/Sc/B₄C的。Rebellato等^[81]深入研究了Al/Sc, Al/Sc/SiC和Mo/Al/Sc多层膜,在Sc吸收线处,3种多层膜的反射率差别不大;但远离Sc吸收线后, Al/Sc/SiC和Mo/Al/Sc多层膜的反射率明显优于Al/Sc的。这些多层膜都有优化反射率最高的SiC保护层。周期数为25的Al/Sc多层膜在44.7 nm处的实测反射率为56.0%,带宽为3.5 nm;周期数为20的Al/Sc/SiC多层膜在44.7 nm处的反射率为57.5%,带宽为4.1 nm;周期数为20的Mo/Al/Sc多层膜在45.2 nm处的反射率为48.1%,带宽为4.6 nm;周期数为25的Al/Sc多层膜在51 nm处的实测反射率为42.4%,带宽为4.1 nm;周期数为20的Al/Sc/SiC多层膜在51 nm处的反射率为46.5%,带宽为5.6 nm;周期数为10的Al/Sc多层膜在60.6 nm处的实测反射率为27.2%,带宽为5.2 nm;周期数为7的Mo/Al/Sc多层膜在57.3 nm处的反射率为37.4%,带宽为11.2 nm。Al/Sc多层膜在60 nm处带宽最窄。Chkhalo等^[82]随后研究了带有6 nm厚MoSi₂膜表面保护层的Si/Al/Sc多层膜反射镜,多层膜采用磁控溅射方法

制备, BESSY II同步辐射反射率测试结果表明:在58.4 nm处,多层膜样品的峰值反射率是32%,10个月后,峰值反射率减小为25%,带宽为6 nm,再经6个月与10个月,反射率都为21.5%,带宽为6.3 nm。这说明Si/Al/Sc多层膜6个月内的反射率有较大变化,6个月后反射率稳定不再变化。Rebellato等^[83]采用X射线掠入射反射法、X射线大角度衍射法,以及高分辨率透射电子显微图像,详细分析带有SiC保护层的Al/Sc, Al/Sc/SiC和Mo/Al/Sc多层膜样品^[81],测试了这些样品的反射率。电子显微观测表明,膜层内Al是柱状生长,Sc是非晶生长,Al-Sc界面厚约3 nm。选区电子衍射可知:薄膜内Al的结晶有(111), (200)和(220), Al₃Sc合金有(111)和(110)。在不同样品中, XRD观察到Al的晶向以及Sc的晶向。

Chkhalo等^[84]测试了带有MoSi₂表面保护层的Si/Al/Sc多层膜的反射率,发现在空气中存储40个月的多层膜在58.4 nm的峰值反射率从最初的32%下降到20.5%,其间后20个月的反射率从21.5%到20.5%。这表明Si/Al/Sc多层膜反射率在20个月后基本上会稳定在20%的水平,此时多层膜带宽基本不变,都为6.3 nm。为了寻求反射率下降的原因,用二次离子质谱和掠入射X射线反射率测量研究了膜层的内部结构。掠入射X射线反射率测量结果表明,在空气中保存40个月的Si/Al/Sc多层膜仍具有很好的周期结构。拟合结构参数表明,经过长期保存后Si/Al/Sc多层膜内部的界面粗糙度会增加。二次离子质谱测量结果表明,存放40个月的Si/Al/Sc多层膜周期性好和表面氧化物增加,多层膜结构内部的氧和碳含量都有增加,这表明存放期间氧主要集聚在多层膜表面的假设是不对的。二次离子质谱测量还表明,尽管Si是镀在Sc-Al界面上,但Si可以扩散通过Sc层,并在Al-Sc界面富集。此外,Sc-Al界面和Al-Sc界面宽度不同,Sc-Al界面宽度更大。存放40个月的样品比只存放1个月的样品,界面宽度变化不超过10%。存放40个月样品反射率降低主要源于表面和界面引入的杂质。研究还表明,3 nm和6 nm的表面保护层的作用基本一致。

图4展示了Si/Sc, Al/Sc, Si/Al/Sc和Mo/

Al/Sc 4 种多层膜在 40~90 nm 波段的最高反射率。综上所述,Al 和 Sc 的化学活性致使其多层膜在前 6 个月内的反射率变化明显,而后基本不发生变化,这会对其应用范围产生一定的限制。

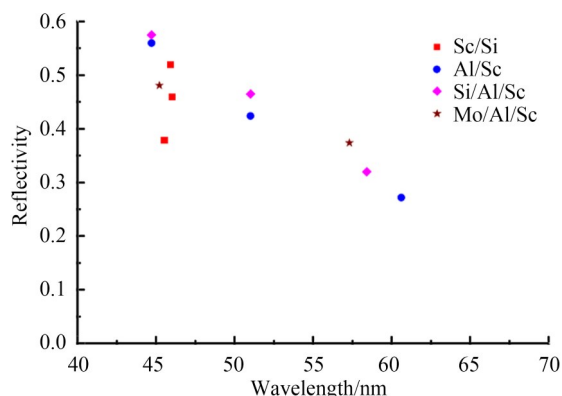


Fig. 4 Peak reflectivity of Si/Sc, Al/Sc, Si/Al/Sc and Mo/Al/Sc multilayers

图 4 Si/Sc, Al/Sc, Si/Al/Sc 和 Mo/Al/Sc 四种多层膜的最高反射率

4.3 铜系与其他的材料组合

铜系元素在 40~90 nm 波段有吸收线,由其组成的多层膜可以获得较高的反射率和较窄的带宽。Windt 等^[85]发展了 Si/Tb 和 SiC/Tb 多层膜, $N=10$, 周期 $d=30.2$ nm 和 $\gamma=0.26$ 的 Si/Tb 多层膜在 60 nm 处, 5° 入射角的峰值反射率约达 22%, 带宽为 6.5 nm。TEM 测试表明, Si-Tb 界面宽度约为 5 nm, Si-Tb 界面宽度约为 4 nm。 $N=10$, 周期 $d=31.0$ nm 和 $\gamma=0.26$ 的 SiC/Tb 多层膜在 60 nm 处, 5° 入射角的峰值反射率约达 22%, 带宽为 9.4 nm。在 100 °C 经 1 h 退火后, Si/Tb 多层膜的反射率基本没变, 只是反射率峰向短波移动了 0.2 nm; 在 200 °C 经 1 h 退火后, Si/Tb 多层膜的反射率相对下降了 10%, 反射率峰值向短波移动了 1.1 nm; 在 300 °C 经 1 h 退火后, 多层膜反射率消失。同样地, 在 100 °C 经 1 h 退火后, SiC/Tb 多层膜的反射率峰值移动较小, 反射率相对下降 5%, 反射峰值位置没变; 在 200 °C 经 1 h 退火后, 反射率又下降了 5%, 峰值移动小于 0.1 nm; 300 °C 退火后结构严重变化, 反射性能基本消失。Kjornrattanawanich 等^[86]研究了不

同 γ 值的 Si/Tb 多层膜的时间效应, 发现 $\gamma=0.25, 0.36, 0.47, 0.55$ 的 4 种多层膜在 8 个月后反射率都有下降, 反射率下降的绝对值小于 2.5%。进一步研究表明^[56], 带有 0.4 nm 厚度 B_4C 插层的 Si/Tb 多层膜反射率比没有插层的高约 2%。

Kjornrattanawanich 等^[87]研制了 Si/Gd 多层膜, $\gamma=0.34$ 的多层膜在 62 nm 处 5° 入射角时峰值反射率达到 26.2%, 带宽为 7.3 nm, 性能最佳。Si/Gd 多层膜的界面会形成硅化物, 采用 B_4C , W 和 SiN 作为界面阻挡层能改善 Si/Gd 多层膜的界面状态, 提升反射率, Si/W/Gd 和 Si/ B_4C /Gd 多层膜的反射率提升了 8%。6 个月后反射率测试表明, Si/Gd 多层膜的反射率只下降 1%, 是稳定的。Windt 等^[88]进一步研究了 Si/Gd 多层膜的热稳定性, 在 Si-on-Gd 和 Gd-on-Si 界面加入 1 nm 厚度的 W, B_4C 和 SiN, Si/Gd 多层膜内 Si 层厚度为 10.49 nm, Gd 层厚度为 23.02 nm。W 和 SiN 阻挡层的多层膜反射率增加了 1%, B_4C 阻挡层的多层膜反射率减少了 3%。在 100, 200 和 300 °C 经 1 h 退火, W 阻挡层多层膜的性能最好, 100 °C 4 种多层膜的反射率都没有下降; 200 °C 时 W 的没有下降, 其他都有下降; 300 °C 时没有阻挡层和 SiN 轴对称的多层膜已无反射率, W 的下降很小, B_4C 的下降在一半以上。透射电镜断层观测研究显示, 在室温下, 无 W 阻挡层的多层膜的界面宽度为 3.2 nm, 有阻挡层的多层膜的界面宽度为 1.8 nm; 300 °C 退火后有 W 阻挡层的多层膜结构基本没有改变。由此表明, 在 Si-on-Gd 和 Gd-on-Si 界面上添加不同 W 厚度引起的反射率变化和应力变化, 界面厚度都为 0.6 nm 时, 300 °C 退火后反射率不发生变化。周期 d 在 25.6~44.8 nm 的一系列多层膜, 阻挡层厚度都是 0.6 nm 时, $d=32.0$ nm, 在 $\lambda=62.5$ nm 处的最高反射率达 29.7%, 带宽为 9 nm。4 种多层膜在开始的 8 个月里反射率都有下降, 主要原因是表面生成了 SiO_2 , 8 个月后反射率基本保持不变。

Vidal-Dasilva 等^[89]制作了 SiO 为表面保护层的 Al/Yb 多层膜, 它在 52.0~83 nm 有较高的反射率和较小的带宽。入射角为 5° 时, 80 和 85 nm

处的反射率分别为27.6%和24.7%,带宽分别为14.5 nm和16 nm。多层膜在干燥柜内存放两年后,80 nm处反射率由27.6%下降到20.9%,带宽由14.5 nm下降到12 nm,样品表面有树枝状斑点。

Polkovnikov等^[90]制作了带有 MoSi_2 保护膜的Ru/Al和Mo/Al多层膜,在58.4 nm处Mo/Al多层膜近正入射反射率是25.9%,带宽为10 nm,Ru/Al多层膜的反射率为26.1%,带宽大于10 nm,这不利于单谱线观测,但可以作为宽带反射镜使用。在空气中存放18个月后,这两种多层膜反射率的绝对变化都小于1.5%,也就是说这两种多层膜的时间稳定性好。Larruquert等^[91]制作的Ir/B₄C多层膜在58.4 nm处的反射率为34.3%。Nilsen^[92]基于光学常数,推断出Ge/Si多层膜在42~50 nm波段具有较高的反射率,尽管反射率比Sc/Si多层膜低,但在46.9 nm处其峰值反射率仍可达34.8%,且带宽仅有3.16 nm,Sc/Si多层膜的峰值反射率达52.7%,带宽为5.83 nm。Nilsen同时提出Ge还可以制作成44~50 nm波段的滤光片。

图5给出了几种多层膜在40~90 nm波段能达到的最高反射率。由图可知,这些多层膜的峰值反射率与Sc基和Mg基多层膜相比略有减小,但稳定性更好。由于材料的化学活性,很多能在此波段工作的多层膜的长期稳定性不够理想,只能短期使用。

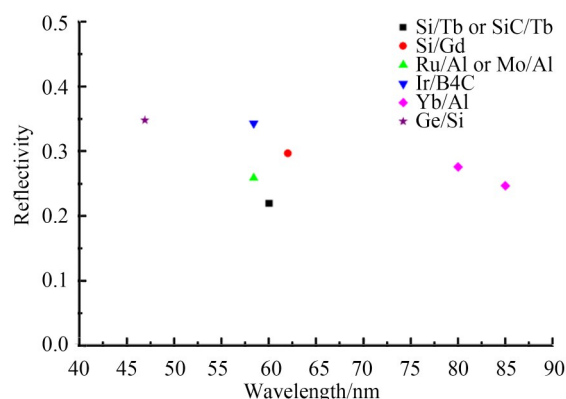


图5 几种多层膜在40~90 nm波段的峰值反射率

Fig. 5 Peak reflectivity of various multilayers in 40-90 nm

5 结 论

本文综述了40~90 nm波段极紫外多层膜的研究进展,简单回顾了多层膜理论,阐述了该波段光学常数测试的进展,然后讨论了Mg基、Sc基和镧系材料以及其他材料组合的多层膜,给出了目前各个材料组合能够达到的最佳反射率,同时还讨论了这些多层膜的时间稳定性。最后,阐明了在40~90 nm波段最有可能应用的多层膜材料组合及其能达到的峰值反射率和带宽。相比来讲,在40~90 nm波段,Sc/Si和Sc/Al组合是最有前途的多层膜,未来需要深入研究其时间稳定性。当然,表面保护层也是一个值得深入研究的方向。

参考文献:

- [1] BROOKS D H, YARDLEY S L. The source of the major solar energetic particle events from super active region 11944[J]. *Science Advances*, 2021, 7 (10): eabf0068.
- [2] CHEN Y J, LI W X, TIAN H, et al. Forward Modeling of Solar Coronal Magnetic Field Measurements Based on a Magnetic-Field-Induced Transition in Fe X [EB/OL]. 2021: arXiv: 2107.11783. <http://arxiv.org/abs/2107.11783>
- [3] ZHANG J, TEMMER M, GOPALSWAMY N, et al. Earth-affecting solar transients: a review of progresses in solar cycle 24[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, 8(1): 56.
- [4] MARSDEN R, MÜLLER D, HASSLER D, et al. Solar orbiter: exploring the Sun-heliosphere connection, solar orbiter assessment study report [J]. *Sol Phys.* 2013, 285(1-2): 25-70.
- [5] TOUSEY R. Solar spectroscopy from Rowland to SOT [J]. *Vistas in Astronomy*, 1986, 29 (2): 175-199.
- [6] BOWYER S. Astronomy and the Extreme Ultraviolet Explorer satellite [J]. *Science*, 1994, 263 (5143): 55-59.
- [7] BOWYER S. Extreme ultraviolet astronomy [J]. *Scientific American*, 1994, 271(2): 32-39.
- [8] HORNECK G, WALTER N, WESTALL F, et al. AstRoMap European astrobiology roadmap [J]. *Astrobiology*, 2016, 16(3): 201-243.
- [9] DRAKE J J, CHEIMETS P N, GARRAFFO C,

- et al.* NExtUP: the normal-incidence extreme ultraviolet photometer[C]. *UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXII*. August 1-5, 2021. San Diego, USA. SPIE, 2021, 11821: 1182108.
- [10] FRANCE K C, FLEMING B T, YOUNG-BLOOD A, *et al.* EUV spectroscopy with the ESCAPE mission: exploring the stellar drivers of exoplanet habitability [C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*. December 14-18, 2020. Online Only, USA. SPIE, 2020, 11444: 1114405.
- [11] SPILLER E. Low-loss reflection coatings using absorbing materials [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(9): 365-367.
- [12] UNDERWOOD J H, BRUNER M E, HAISCH B M, *et al.* X-ray photographs of a solar active region with a multilayer telescope at normal incidence [J]. *Science*, 1987, 238(4823): 61-64.
- [13] HANDY B N, ACTON L W, KANKELBORG C C, *et al.* The transition region and coronal explorer[J]. *Solar Physics*, 1999, 187(2): 229-260.
- [14] WUELSE J P, LEMEN J R, TARBELL T D, *et al.* EUVI: the STEREO-SECCHI extreme ultraviolet imager [C]. *Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics, SPIE Proceedings*. San Diego, California, USA. SPIE, 2004, 5171: 111-122.
- [15] CULHANE J L, HARRA L K, JAMES A M, *et al.* The EUV imaging spectrometer for hinode[J]. *Solar Physics*, 2007, 243(1): 19-61.
- [16] LEMEN J R, TITLE A M, AKIN D J, *et al.* The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) [J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 17-40.
- [17] SEATON D B, BERGHMANS D, NICULA B, *et al.* The SWAP EUV imaging telescope part I: instrument overview and pre-flight testing[J]. *Solar Physics*, 2013, 286(1): 43-65.
- [18] SLEMZIN V A, KUZIN S V, ZHITNIK I A, *et al.* Observations of solar EUV radiation with the CORONAS-F/SPIRIT and SOHO/EIT instruments[J]. *Solar System Research*, 2005, 39(6): 489-500.
- [19] MARTINEZ-GALARCE D, SOUFLI R, WINDT D L, *et al.* Multisegmented, multilayer-coated mirrors for the Solar Ultraviolet Imager[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52: 095102.
- [20] KUZIN S V, ZHITNIK I A, SHESTOV S V, *et al.* The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft [J]. *Solar System Research*, 2011, 45(2): 162-173.
- [21] 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.
- [22] WINDT D L. IMD—software for modeling the optical properties of multilayer films [J]. *Computers in Physics*, 1998, 12(4): 360-370.
- [23] SPILLER E. *Reflecting Optics: Multilayers* [M]. Experimental Methods in the Physical Sciences. Amsterdam: Elsevier, 1998: 271-288.
- [24] UNDERWOOD J H, BARBEE T WJR. Layered synthetic microstructures as Bragg diffractors for X rays and extreme ultraviolet: theory and predicted performance [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(17): 3027-3034.
- [25] BRAUN S, MAI H, MOSS M, *et al.* Mo/Si multilayers with different barrier layers for applications as extreme ultraviolet mirrors [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(Part 1, No. 6B): 4074-4081.
- [26] ZHU J T, ZHOU S K, LI H C, *et al.* Thermal stability of Mg/Co multilayer with B₄C, Mo or Zr diffusion barrier layers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21849.
- [27] HUANG S P, JI B, ZHOU J, *et al.* Improving the EUV reflectivity of Mg/SiC multilayers by inserting Zr barrier layers at the SiC-on-Mg interfaces [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 832: 184-186.
- [28] SARKAR P, BISWAS A, KUMAR R, *et al.* Role of C and B₄C barrier layers in controlling diffusion propagation across the interface of Cr/Sc multilayers [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(4): 3072-3082.
- [29] WINDT D L, GULLIKSON E M. Pd/B₄C/Y multilayer coatings for extreme ultraviolet applications near 10 nm wavelength [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5850-5860.
- [30] DE ROOIJ-LOHMANN V I T A, VELDHUIZEN L W, ZOETHOUT E, *et al.* Chemical inter-

- action of B_4C , B, and C with Mo/Si layered structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(9): 094314.
- [31] BOSGRA J, VELDHUIZEN L W, ZOETHOUT E, *et al.* Interactions of C in layered Mo-Si structures[J]. *Thin Solid Films*, 2013, 542: 210-213.
- [32] KJORN RATTANAWANICH B, BAJT S, SEELY J F. Mo/ B_4C /Si multilayer-coated photodiode with polarization sensitivity at an extreme-ultraviolet wavelength of 13.5 nm[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(5): 1082-1090.
- [33] LARRUQUERT J I. New layer-by-layer multilayer design method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(2): 385-390.
- [34] GAUTIER J, DELMOTTE F, ROULLIAY M, *et al.* Study of normal incidence of three-component multilayer mirrors in the range 20-40 nm[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(3): 384-390.
- [35] BAJT S, CHAPMAN H N, NGUYEN N, *et al.* Design and performance of capping layers for extreme-ultraviolet multilayer mirrors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(28): 5750-5758.
- [36] CORSO A J, ZUPPELLA P, NICOLOSI P, *et al.* Capped Mo/Si multilayers with improved performance at 304 nm for future solar missions[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 13963-13973.
- [37] HENKE B L, GULLIKSON E M, and DAVIS J C. X-ray Interactions: photoabsorption, scattering, transmission and reflection at $E=50$ -30000 eV, $Z=1$ -92[J]. *At Data and Nuc Data Tables*, 1993, 54(2): 181-342.
- [38] MARCOS L R D, 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.
- [39] FERNÁNDEZ-PEREA M, LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, *et al.* Determination of optical constants of scandium films in the 20-1000 eV range [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(11): 2880-2887.
- [40] KJORN RATTANAWANICH B, WINDT D L, BELLOTTI J A, *et al.* Measurement of dysprosium optical constants in the 2-830 eV spectral range using a transmittance method, and compilation of the revised optical constants of lanthanum, terbium, neodymium, and gadolinium[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(16): 3084-3093.
- [41] KJORN RATTANAWANICH B, WINDT D L, USPENSKII Y A, *et al.* Optical constants determination of neodymium and gadolinium in the 3-to 100-nm wavelength range[J]. *SPIE Optics + Photonics*, 2006, 6317: 63170U.
- [42] KJORN RATTANAWANICH B, WINDT D L, SEELY J F. Optical constants determination of samarium, holmium, and erbium in the 1.5-850 eV spectral range using a transmittance method [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 6006-6013.
- [43] MARCOS L R, LARRUQUERT J, AZNÁREZ J, *et al.* Transmittance and optical constants of Sr films in the 6-1220 eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111: 113533.
- [44] LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, MÉNDEZ J A, *et al.* Optical properties of scandium films in the far and the extreme ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(16): 3271-3278.
- [45] FERNÁNDEZ-PEREA M, AZNÁREZ J A, LARRUQUERT J I, *et al.* Transmittance and extinction coefficient of Ce films measured *in situ* in the extreme ultraviolet and soft x-rays[C]. *Proceedings, Advances in X-Ray/EUV Optics, Components, and Applications. San Diego, California, USA. SPIE*, 2006, 6317: 63170V.
- [46] LARRUQUERT J I, FERNÁNDEZ-PEREA M, AZNÁREZ J A, *et al.* Determination of the transmittance and extinction coefficient of Yb films in the 23-1700 eV range[C]. *SPIE Proceedings, Advances in X-Ray/EUV Optics, Components, and Applications. San Diego, California, USA. SPIE*, 2006, 6317: 63170S.
- [47] FERNÁNDEZ-PEREA M, AZNÁREZ J A, LARRUQUERT J I, *et al.* Transmittance and optical constants of Ce films in the 6-1200eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 073501.
- [48] FERNÁNDEZ-PEREA M, VIDAL-DASILVA M, AZNÁREZ J A, *et al.* Transmittance and optical constants of Pr films in the 4-1600eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(11): 113515.
- [49] FERNÁNDEZ-PEREA M, VIDAL-DASILVA M, AZNÁREZ J A, *et al.* Transmittance and optical constants of Eu films from 8.3 to 1400 eV[J], *J Appl Phys*. 2008, 104(12): 123527.

- [50] VIDAL-DASILVA M, FERNÁNDEZ-PEREA M, AZNÁREZ J A, *et al.* Transmittance and optical constants of Ti films in the 2.75-1600 eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(10): 103110.
- [51] FERNÁNDEZ-PEREA M, VIDAL-DASILVA M, LARRUQUERT J I, *et al.* Optical constants of evaporation-deposited silicon monoxide films in the 7.1-800 eV photon energy range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(11): 113505.
- [52] GARCÍA-CORTÉS S, RODRÍGUEZ-DE MARCOS L, LARRUQUERT J I, *et al.* Transmittance and optical constants of Lu films in the 3-1800 eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(6): 063514.
- [53] FERNÁNDEZ-PEREA M, LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, *et al.* Transmittance and optical constants of Ho films in the 3-1340 eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(8): 083525.
- [54] RODRÍGUEZ-DE MARCOS L, LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, *et al.* Transmittance and optical constants of Sr films in the 6-1220 eV spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(11): 113533.
- [55] USPENSKII Y A, SEELY J F, POPOV N L, *et al.* Efficient method for the determination of extreme-ultraviolet optical constants in reactive materials: application to scandium and titanium [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(2): 298-305.
- [56] SEELY J F, USPENSKII Y A, KJORNRTANAWANICH B, *et al.* Coated photodiode technique for the determination of the optical constants of reactive elements: La and Tb[C]. *SPIE Proceedings, Advances in X-Ray/EUV Optics, Components, and Applications. San Diego, California, USA*. SPIE, 2006, 6317: 63170T.
- [57] FERNÁNDEZ-PEREA M, SOUFLI R, ROBINSON J C, *et al.* Triple-wavelength, narrowband Mg/SiC multilayers with corrosion barriers and high peak reflectance in the 25-80 nm wavelength region[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 24018-24029.
- [58] VIDAL-DASILVA M, FERNÁNDEZ-PEREA M, LARRUQUERT J I, *et al.* Narrowband multilayer mirrors for the extreme ultraviolet spectral range of 50 to 95 nm [C]. *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components IV, SPIE Proceedings. San Diego, CA*. SPIE, 2009, 7448: 74480N.
- [59] ZHU J T, ZHOU S K, LI H C, *et al.* Comparison of Mg-based multilayers for solar He II radiation at 30.4 nm wavelength[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(20): 3922-3925.
- [60] EJIMA T, YAMAZAKI A, BANSE T, *et al.* Aging and thermal stability of Mg/SiC and Mg/Y₂O₃ reflection multilayers in the 25-35 nm region [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5446-5453.
- [61] ZHU J T, WANG Z S, ZHANG Z, *et al.* High reflectivity multilayer for He-II radiation at 30.4 nm [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): C310-C314.
- [62] YOSHIKAWA I, MURACHI T, TAKENAKA H, *et al.* Multilayer coating for 30.4 nm[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(6): 066109.
- [63] AQUILA A, SALMASSI F, LIU Y W, *et al.* Tri-material multilayer coatings with high reflectivity and wide bandwidth for 25 to 50 nm extreme ultraviolet light[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22102-22107.
- [64] LI H C, ZHU J T, WANG Z S, *et al.* Asymmetrical diffusion at interfaces of Mg/SiC multilayers [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(5): 546-555.
- [65] BOERNER P, EDWARDS C, LEMEN J, *et al.* Initial calibration of the atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 41-66.
- [66] SOUFLI R, FERNÁNDEZ-PEREA M, BAKER S L, *et al.* Spontaneously intermixed Al-Mg barriers enable corrosion-resistant Mg/SiC multilayer coatings[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(4): 043111.
- [67] PELIZZO M, FINESCHI S, CORSO A, *et al.* Long-term stability of Mg/SiC multilayers[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51: 023801.
- [68] ZUEV S Y, KUZIN S V, POLKOVNIKOV V N, *et al.* Componentry of reflection optics for application in the tesis X-ray astrophysics experiment [J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2010, 74(1): 50-52.
- [69] BOGACHEV S A, CHKHALO N I, KUZIN S V, *et al.* Advanced materials for multilayer mirrors

- for extreme ultraviolet solar astronomy [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2126-2135.
- [70] POLKOVNIKOV V N, CHKHALO N I, PLESHKOV R S, *et al.* Stable high-reflection Be/Mg multilayer mirrors for solar astronomy at 30.4 nm[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 263-266.
- [71] USPENSKII Y A, LEVASHOV V E, VINOGRADOV A V, *et al.* High-reflectivity multilayer mirrors for a vacuum-ultraviolet interval of 35-50nm [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 771-773.
- [72] YULIN S A, SCHAEFERS F, FEIGL T, *et al.* Enhanced reflectivity and stability of Sc/Si multilayers [C]. *SPIE Proceedings, Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications. San Diego, California, USA.* SPIE, 2004, 5193: 155 - 163.
- [73] GAUTIER J, DELMOTTE F, BRIDOU F, *et al.* Characterization and optimization of magnetron sputtered Sc/Si multilayers for extreme ultraviolet optics [J]. *Applied Physics A*, 2007, 88 (4) : 719-725.
- [74] VORONOV D L, ZUBAREV E N, KONDRATENKO V V, *et al.* Study of fast diffusion species in Sc/Si multilayers by W-based marker analysis[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 513(1/2) : 152-158.
- [75] ZHU J T, ZHANG J Y, JIANG H, *et al.* Interface study on the effect of carbon and boron carbide diffusion barriers in Sc/Si multilayer system [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12 (22): 25400-25408.
- [76] GAUTIER J, DELMOTTE F, ROULLIAY M, *et al.* Performances and stability of Sc/Si multilayers with barrier layers for wavelengths around 46 nm [C]. *SPIE Proceedings, Advances in Optical Thin Films II. Jena, Germany.* SPIE, 2005, 5963: 59630X.
- [77] PERSHYN Y P, ZUBAREV E N, KONDRATENKO V V, *et al.* Reactive diffusion in Sc/Si multilayer X-ray mirrors with CrB₂ barrier layers [J]. *Applied Physics A*, 2011, 103 (4) : 1021-1031.
- [78] QI R Z, WU J L, YU J, *et al.* Narrowband EUV Sc/Si multilayer for the solar upper transition region imager at 46.5 nm [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(10): 105002.
- [79] WU J L, QI R Z, ZHANG Z, *et al.* Structural and optical properties of narrowband Sc/Si multilayer at 46.5 nm [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 933301.
- [80] DELMOTTE F, DEHLINGER M, BOURASSIN-BOUCHET C, *et al.* Multilayer optics for coherent EUV/X-ray laser sources [C]. *SPIE Proceedings, X-Ray Lasers and Coherent X-Ray Sources: Development and Applications XI. San Diego, California, USA.* SPIE, 2015, 9589: 958907.
- [81] REBELLATO J, SOUFLI R, MELTCHAKOV E, *et al.* High efficiency Al/Sc-based multilayer coatings in the EUV wavelength range above 40 nanometers [J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (4) : 869-872.
- [82] CHKHALO N, POLKOVNIKOV V, SALASH CHENKO N, *et al.* Reflecting properties of narrowband Si/Al/Sc multilayer mirrors at 58.4 nm [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4666-4669.
- [83] REBELLATO J, SOUFLI R, MELTCHAKOV E, *et al.* Optical, structural and aging properties of Al/Sc-based multilayers for the extreme ultraviolet [J]. *Thin Solid Films*, 2021, 735: 138873.
- [84] CHKHALO N I, DROZDOV M N, LOPATIN A Y, *et al.* Study of the temporal stability of the reflection coefficient in the vicinity of 58.4nm of narrow-band Sc/Al mirrors with Si or ScN interlayers and a MoSi₂ protective cap layer [J]. *Thin Solid Films*, 2023, 783: 140047.
- [85] WINDT D L, SEELY J F, KJORNATTANAWANICH B, *et al.* Terbium-based extreme ultraviolet multilayers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3186-3188.
- [86] KJORNATTANAWANICH B, WINDT D L, SEELY J F, *et al.* SiC/Tb and Si/Tb multilayer coatings for extreme ultraviolet solar imaging [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(8): 1765-1772.
- [87] KJORNATTANAWANICH B, WINDT D L, SEELY J F. Normal-incidence silicon - gadolinium multilayers for imaging at 63 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 965-967.
- [88] WINDT D L, BELLOTTI J A, KJORNATTANAWANICH B, *et al.* Performance optimization of Si/Gd extreme ultraviolet multilayers [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5502-5508.

- [89] VIDAL-DASILVA M, FERNANDEZ-PEREA M, MENDEZ J A, *et al.* Narrowband multilayer mirrors for the extreme ultraviolet spectral range of 50 to 95 nm [J], *Opt Express*, 2009, 17(25): 22773-22784.
- [90] POLKOVNIKOV V N, CHKHALO N I, MELTCHAKOV E, *et al.* Stable multilayer reflective coatings for λ (HeI) = 58.4 nm for the KORTES solar telescope [J]. *Technical Physics Letters*, 2019, 45(2): 85-88.
- [91] LARRUQUERT J I, KESKI-KUHA R A M. Sub-quarter-wave multilayer coatings with high reflectance in the extreme ultraviolet [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25): 5398-5404.
- [92] NILSEN J. Designing a high-reflectivity normal-incidence Ge/Si multilayer X-ray mirror for the 44 - 50 nm wavelength range [J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(12): 3460-3467.

作者简介:



来 搏(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,2017年于明尼苏达大学获得学士学位,2019年于罗切斯特大学获得硕士学位,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail:laixx126@qq.com

通讯作者:



王占山(1963—),男,博士,教授,1985年于南开大学获得学士学位,1988年于中国科学院长春光学精密机械研究所获得硕士学位,1996年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事强激光薄膜器件与系统、极紫外与X射线多层膜器件与系统以及微纳智能感知等方面的研究。E-mail:wangzs@tongji.edu.cn