

2.5 m口径反射镜宽光谱高反射率反射膜的研究*

田杰^{1,2,3} 李新南^{1,2,3} 王晋峰^{1,2,3†} 王俊^{1,2} 宗卫杰^{1,2} 谢多^{3,4}
路金豪^{1,2,3} 黄亚^{1,2}

(1 中国科学院南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所) 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

(4 南京信息工程大学物理与光电工程学院光学工程系 南京 210044)

摘要 为提高天文望远镜的观测能力,望远镜主镜口径不断增大,同时对其膜层要求也更为严格,要求反射波段更宽且反射率更高.基于国内天文望远镜的需求,研究了一种基于离子束辅助沉积技术的大口径镜面宽光谱高反射膜镀制技术.通过分析3.2 m镀膜设备的几何配置和离子源线性能量分布区域,采用了双离子源分区独立控制的方法,在2.5 m口径非球面镜面范围内获得光学常数一致性较好的膜层.从2.5 m主镜镀膜前的实际面形出发,通过模拟确定了镀膜时的镜面高度,并计算了修正板的形状和尺寸,确保膜层的均匀性优于1.2%.设计膜系后,在模拟基片上不同位置放置测试片进行实际镀制,经过测试,每个测试片都达到了设计目标.根据实验结果,采用离子束辅助沉积的技术,应用3.2 m镀膜设备,最终完成2.5 m主镜的宽光谱高反射率反射膜镀制.

关键词 仪器: 宽光谱高反射膜, 望远镜, 技术: 光谱, 技术: 离子束辅助沉积

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

望远系统的主镜尺寸决定了其系统分辨率,只有采用更大口径的反射镜,才能获得更高的系统分辨率^[1].大口径望远镜需要反射率更高的反射镜.光在大型望远系统中,常常需要经过多次反射,主光学系统的光学效率是各个反射镜之间反射率相乘的结果.提高反射镜的反射率对提升整个光学系统的效率具有重要意义.随着光学测量、光度测量等技术的发展,人们可利用的波段范围已由原来的可见光,扩展到了覆盖由紫外至红外的宽光谱范围,需要研究更宽光谱反射膜的相关技术^[2].因此,需要在大口径光学元件中研究宽光谱高反射率

反射膜的相关技术.

目前常用的大口径反射镜沉积方式有两种,分别为热蒸发技术和磁控溅射技术.磁控溅射技术的优势在于溅射粒子方向可控,致使大口径镜面可以采用镜面向上的方式完成镀膜过程,避免了翻转吊装过程中的风险,膜层沉积初始动能大,膜层微结构致密, Gemini望远镜、VLT (Very Large Telescope)等望远镜采用了此项技术.但溅射过程中大量的带电粒子会降低薄膜纯度,且磁控溅射技术所能够沉积的膜料类型有很大的局限性.热蒸发技术中薄膜生长环境处于高真空状态,能够获得纯度很高的薄膜^[3].然而普通的热蒸发镀制大口径镜面时,因考虑到镀膜与吊装过程中的风险,采用镜

2024-03-06收到原稿, 2024-04-07收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11627804)资助

†jfwang@niaot.ac.cn

面向上或竖立的形式,致使薄膜沉积过程只能使用热电阻蒸发膜料,限制了膜料的选择,并限制了反射膜的致密程度及牢固度, LBT (Large Binocular Telescope)、Subaru望远镜、MMT (Multiple Mirror Telescope)^[4-8]等国外望远镜以及中国科学院云南天文台2.4 m望远镜^[9]、由中国科学院南京天文光学技术研究所(下称南京天光所)研制的中国2.16 m望远镜均采用这种镀膜方式。

离子束辅助沉积作为热蒸发的一种,镀膜过程处于高真空环境中. 离子源可在镀膜前对基底进行刻蚀,去除微观上的杂质,从而提高膜层与基底的牢固度. 镀膜过程中,离子源可通过动能交换为膜料分子提供更大的初动能,从而提高膜料在基底的迁移率,使生成的薄膜更加致密. 离子源对膜层的轰击也将提高膜层的牢固度、致密度,从而提高膜层的折射率并降低膜层的消光系数^[10-14]. 镜面向下的镀膜形式有利于电子枪的运用,扩展了可镀制膜料的种类. 由于以上优点,离子束辅助沉积技术常常被应用于中小口径高精度薄膜的研制中. 郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)子镜^[15]以及南京天光所镀制的落下阡-SONG (Stellar Observations Network Group)望远镜主镜、云南大学1.6 m多通道测光巡天望远镜主镜等镜面的膜层镀制均采用离子束辅助沉积技术. 但考虑到更大口径镜面翻转的风险,且受限于镀膜设备、沉积工艺等因素,很少有在2 m以上镜面使用离子束辅助沉积研制宽光谱高反射率反射膜^[16-17].

本论文将在实现了2.5 m镜面安全翻转吊装的基础上,在南京天光所3.2 m真空镀膜设备中研究如何在2.5 m口径内精确地控制薄膜光学常数和膜层厚度的均匀性,利用离子束辅助沉积技术获得宽光谱高反射率反射膜,并最终在2.5 m主镜上完成宽光谱高反射率反射膜的镀制。

2 2.5 m反射镜中膜层光学常数一致性研究

天文领域的宽光谱高反射率反射膜一般由金

属膜加介质膜组成. 金属膜提供基础反射率,介质膜一方面可以作为金属膜的保护膜,减少金属膜与空气的接触,防止金属膜氧化,另一方面,介质膜可以对工作波段的反射率进行加强,使反射镜在工作波段范围内获得更高的反射率. 镜面向下的金属膜沉积工艺已很成熟,且金属膜的生长容差较大. 因此,大口径反射镜中宽光谱高反射率反射膜的研究的重点在于如何精确地控制薄膜在镜面的生长,获得具有一致性高的介质膜层。

介质膜对光的影响由(1)式中的特征矩阵给出^[18]:

$$\begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \cos \theta_1$, 其中 λ 是光的波长, θ_1 为折射角, d_1 是膜层厚度. 对于平行(p)分量, $\eta_1 = n_1 / \cos \theta_1$, 对于垂直(s)分量, $\eta_1 = n_1 \cos \theta_1$, 其中 n_1 是薄膜的有效折射率. 对于实际薄膜而言,薄膜常常存在吸收,折射率 n_1 扩展为复折射率 $n_1 - ik_1$, 其中, k_1 是消光系数. 折射率 n_1 与膜层材料特性及其聚集密度有关,反映了材料的硬度、应力、均匀性和化学稳定性,折射率与膜厚的乘积构成了薄膜的光学厚度,影响着膜层的光学特性. 消光系数代表了光在其中损耗的情况。

按2.5 m主镜面形加工模拟基片,基片为不锈钢材质,经过轻量化以后,其尺寸、重量、曲率等参数均与实际待镀膜镜面一致,模拟基片实物图如图1所示. 为验证膜层特性,在模拟基片不同位置放置测试片,用于过程实验. 由于基底在镀膜过程中旋转,测试片在模拟基片径向上放置,由中孔边缘到镜面边缘均匀放置8个测试片。

根据镜面形状、3.2 m真空镀膜设备几何配置、离子源能量交换线性分布范围,对于 Ta_2O_5 、 SiO_2 两种不同的材料,独立设置两个不同区域的离子源能量大小及束流密度^[19-22],用Jeol电子枪分别沉积了 Ta_2O_5 和 SiO_2 厚膜,用包络线算法计算并拟合,获得了实际膜层的光学常数. 图2、图3分别为 Ta_2O_5 薄膜、 SiO_2 薄膜光学常数随波长变化的曲线. 图中, P1-P8表示模拟基片的不同位置。

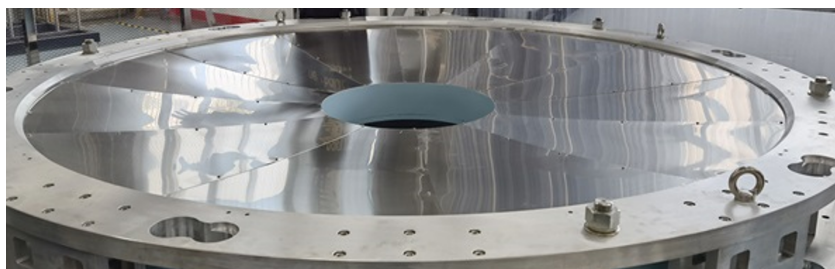
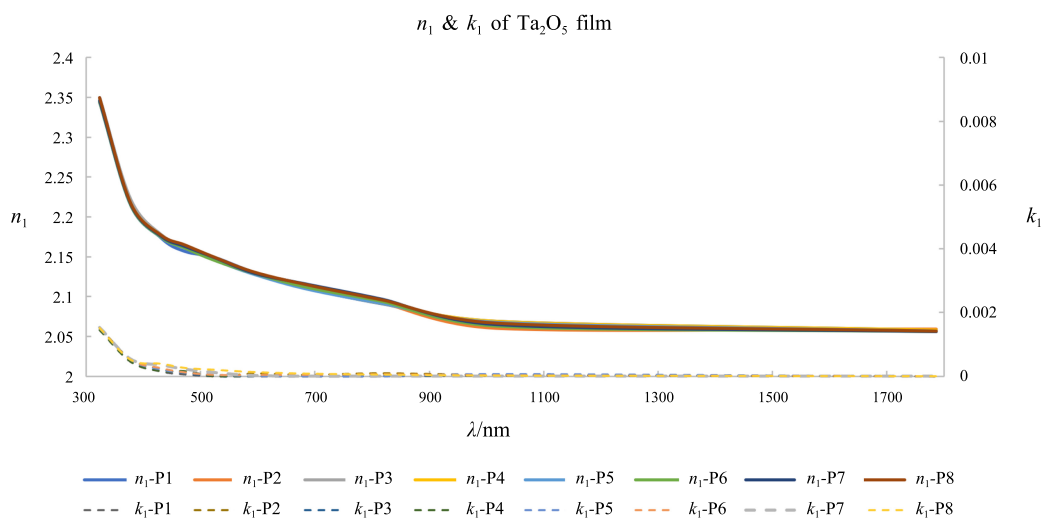
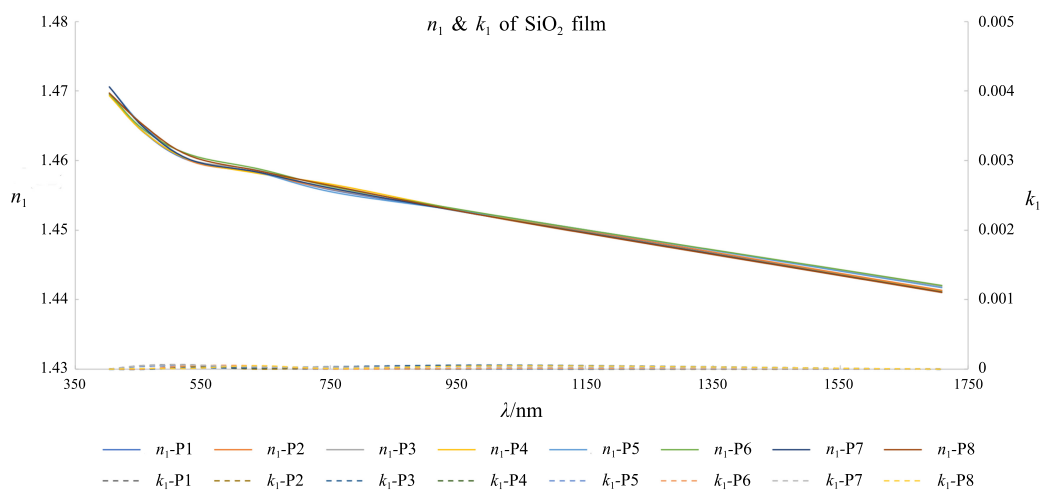


图 1 2.5 m 镜面模拟基片

Fig. 1 Simulated substrate of 2.5 m mirror

图 2 模拟基片中 8 个不同位置 Ta_2O_5 材料光学常数曲线Fig. 2 Optical constant curves of Ta_2O_5 material at 8 different positions in the simulated substrate图 3 模拟基片中 8 个不同位置 SiO_2 材料光学常数曲线Fig. 3 Optical constant curves of SiO_2 material at 8 different positions in the simulated substrate

从图2和图3可以看出,生长的膜层折射率接近理想材料的折射率,消光系数较小.根据离子源能量线性分布范围,分区域独立设置双离子源参数的方法可以在大口径镜面中获得聚集密度高、光学性能优异的介质膜层.模拟基片径向方向上8个不同位置的测试片所得膜层光学常数一致性好.

3 2.5 m反射镜中膜厚均匀性研究

大口径镜面薄膜生长过程中,介质膜膜厚均匀性对反射率的影响也至关重要.均匀性差会影响反射率波峰的波长位置,甚至使整个镜面出现肉眼可见的色差,影响观测^[23].

膜厚均匀性与蒸发源的蒸发特性、设备及镜面的几何配置关系密切.在2.5 m镜面的离子束辅助沉积镀膜过程中,采取镜面向下的形式,镀膜过程中,基片绕镜面中心旋转.为获得更好的稳定性和均匀性,镀膜过程中所使用的蒸发源是面蒸发源.其蒸气发射特性具有方向性,发射限为半球,镜面中任意一点的膜厚用下式表示:

$$t_s = \frac{m \cos^j \varphi \cos \theta}{\pi \mu r^2}, \quad (2)$$

式中, m 为蒸发材料总质量; φ 为发射角,即面源法线与连接蒸发源和镀膜表面元的直线所构成的角度; θ 为沉积角,即镀膜表面法线与连接蒸发源和镀膜表面元的直线所构成的角度; μ 为材料密度; r 为蒸发源到镀膜表面的距离; j 是与蒸发源特性相关的系数,前期实验表明,对于 Ta_2O_5 薄膜的光斑大小及工艺, j 为2.7; 对于 SiO_2 薄膜的光斑大小及工艺, j 为4.3.

在3.2 m真空镀膜设备中镀制2.5 m主镜,2.5 m主镜倒挂于镀膜机内部,以待镀膜面顶点为坐标原点, Z 轴竖直向上,此时 Z 轴与过原点的镜面法线方向相反. XY 平面为过原点的镜面切平面.蒸发源在 XY 平面内的投影指向原点的方向为 Y 轴正方向,建立右手坐标系,其空间几何配置如图4所示.图中 h 为沉积点到发射源的垂直距离, H 为镜面中心到发射源的垂直距离, $\vec{V}_1$ 为待镀膜镜面表面点 S 至蒸发源的方向向量, $\vec{V}_2$ 为 S 点法向量; ψ 为沉积点 S 和镜面顶点连线与 Y 轴的夹角,2.5 m主镜镜

面为非球面镜,其矢高即 H 与 h 的差值由(3)式非球面公式表示:

$$H - h = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) \frac{\rho^2}{R^2}}}. \quad (3)$$

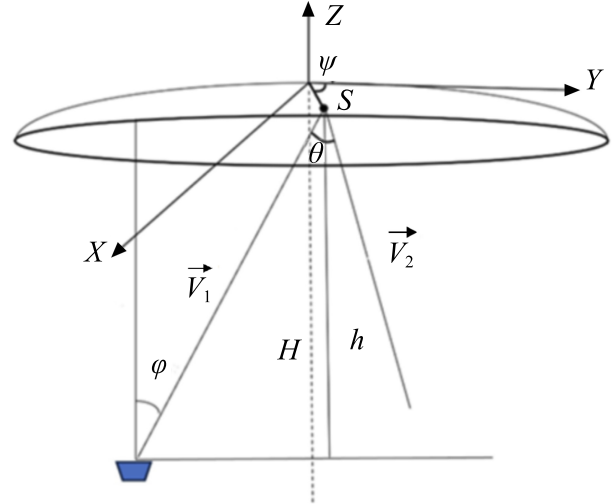


图4 3.2 m真空镀膜设备中镀制2.5 m主镜几何配置图

Fig. 4 Geometric configuration of 2.5 m simulated substrate in 3.2-meter coating equipment

(3)式中, c 为待镀膜面的曲率, k 为待镀膜面的圆锥系数, R 为待镀膜面的曲率半径.3.2 m真空镀膜设备中的各参数之间的几何关系如下

$$r^2 = h^2 + (L + \rho)^2 - 4L\rho \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right). \quad (4)$$

(4)式中, r 为向量 $\vec{V}_1$ 的模, L 为蒸发源至底板中心的距离, ρ 为 S 点在 XY 平面内的投影距镜面顶点的距离. φ 可以由 h 和 r 计算获得,见(5)式:

$$\cos \varphi = \frac{h}{r}. \quad (5)$$

θ 为向量 $\vec{V}_1$ 和 $\vec{V}_2$ 的点积除以它们的模:

$$\cos \theta = \frac{\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2}{|\vec{V}_1| |\vec{V}_2|}. \quad (6)$$

将(3)式、(4)式、(5)式、(6)式代入(2)式并积分,可得在不同 H 下的膜厚分布.根据3.2 m真空镀膜设备空间尺寸, H 分别设置为1100 mm、1200 mm、1300 mm、1400 mm、1500 mm.图5为 Ta_2O_5 膜料

在不同 H 情况下的2.5 m镜面膜厚分布图, Max值为当前高度下的镜面最大不均匀性. 图6为 SiO_2 膜料在不同 H 情况下的2.5 m镜面膜厚分布图, Max值为当前高度下的镜面最大不均匀性.

从膜厚分布图可以看出, 在镜面中心高度为1300–1500 mm时, 膜厚不均匀性相对较小, 结合镜面中孔边缘到镜面边缘的膜厚分布情况以及蒸发特性, 选择镜面中心高度 $H = 1350$ mm作为实际镀膜过程中的沉积高度. 根据 $H = 1350$ mm时2.5 m镜面膜厚分布, 采用弧长修正法设计修正板, 并通过实验精修修正板^[24–25], 用分光光度计测得2.5 m模拟基片中1–8号沉积位置单层膜在300–1700 nm波段处的透过率分别如图7和图8所示. 不同位置下薄膜透过率曲线走向一致, 基本重合.

用包络线算法得出在2.5 m非球面镜面中, 不同位置测试片中 Ta_2O_5 、 SiO_2 薄膜的实际膜厚如

表1所示. 从表1可以看出, Ta_2O_5 、 SiO_2 膜厚不均匀性均分别为1.11%和1.18%.

表 1 2.5 m模拟基片中不同位置 Ta_2O_5 、 SiO_2 膜厚分布表
Table 1 Thicknesses distribution of Ta_2O_5 & SiO_2 film at different positions in the 2.5 m simulated substrate

Position	Thickness of Ta_2O_5	Thickness of SiO_2
1	289.2 nm	470.7 nm
2	288.9 nm	468.5 nm
3	287.1 nm	467.8 nm
4	289.8 nm	468.3 nm
5	289.0 nm	467.8 nm
6	290.3 nm	466.8 nm
7	289.6 nm	466.4 nm
8	289.4 nm	465.2 nm

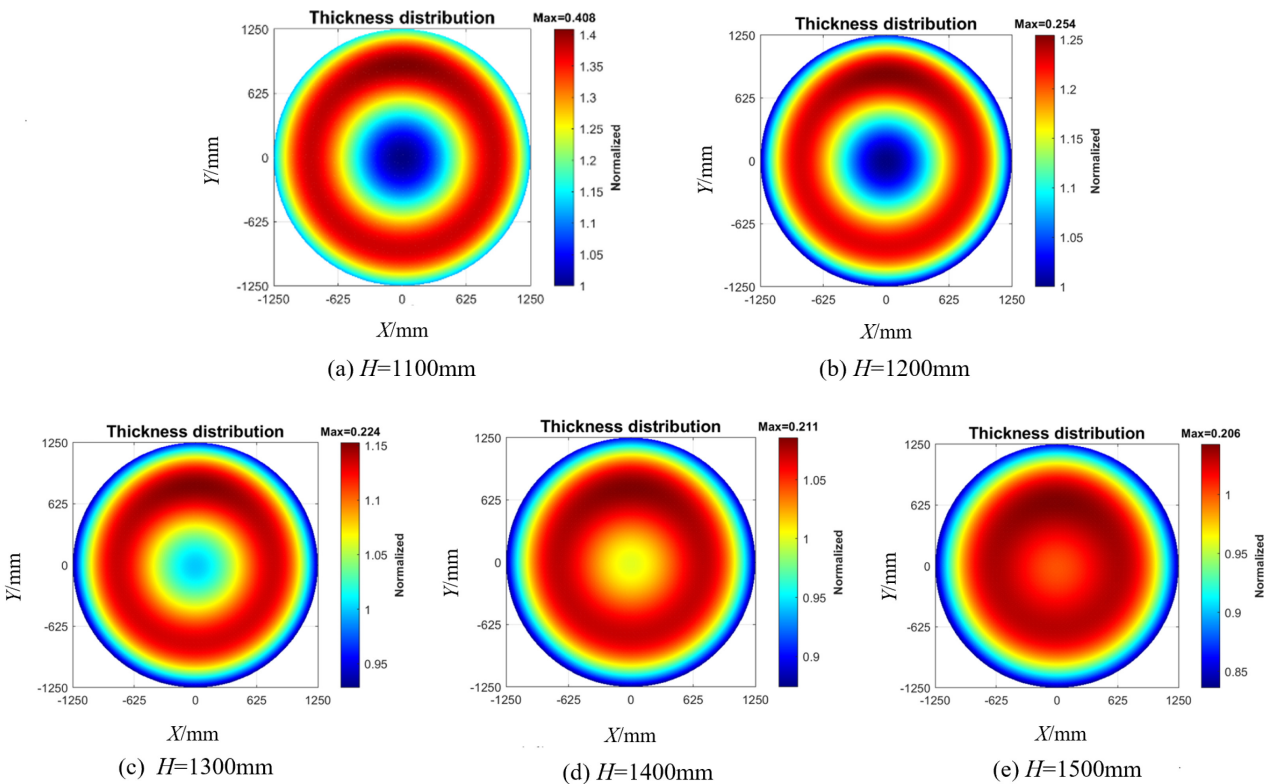
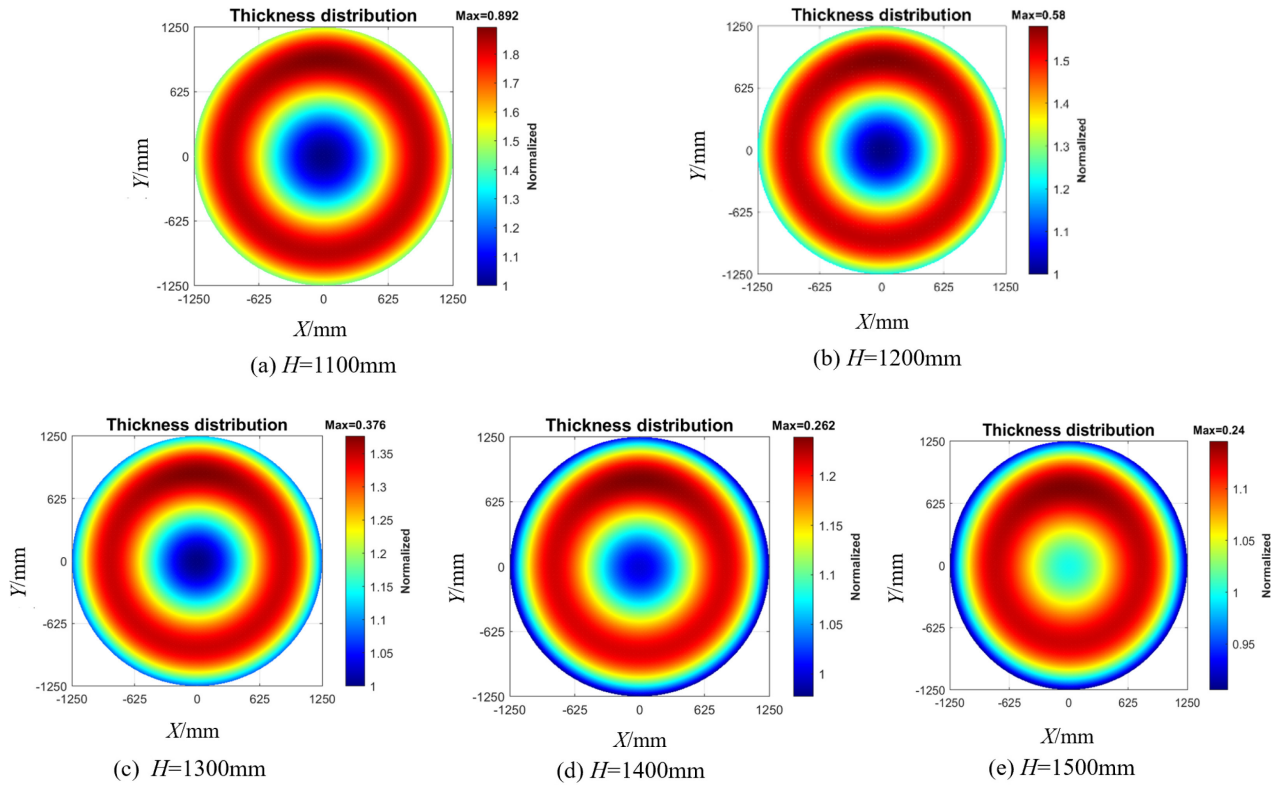
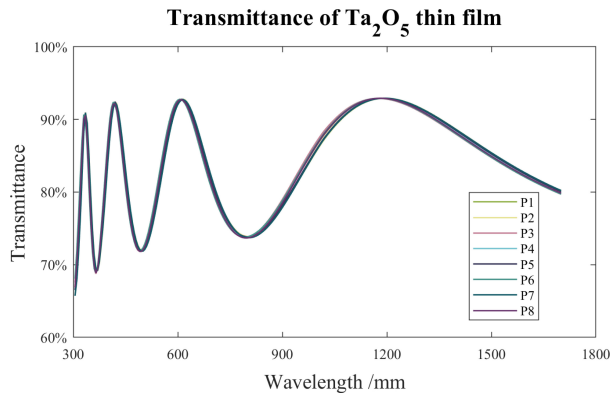
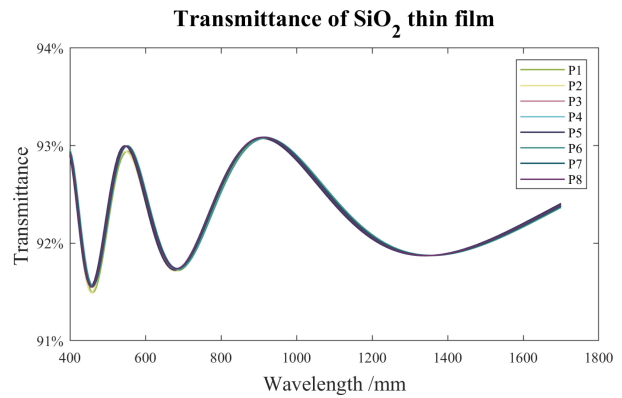


图 5 2.5 m模拟基片中 Ta_2O_5 薄膜膜厚分布图

Fig. 5 Thickness distribution of Ta_2O_5 thin film in the 2.5 m simulated substrate

图 6 2.5 m 模拟基片中 SiO_2 薄膜膜厚分布图Fig. 6 Thickness distribution of SiO_2 thin film in the 2.5 m simulated substrate图 7 2.5 m 模拟基片中不同位置 Ta_2O_5 薄膜透过率曲线Fig. 7 Transmittance curves of Ta_2O_5 thin film at different positions in the 2.5 m simulated substrate图 8 2.5 m 模拟基片中不同位置 SiO_2 薄膜透过率曲线Fig. 8 Transmittance curves of SiO_2 thin film at different positions in the 2.5 m simulated substrate

4 2.5 m非球面宽光谱高反射率反射膜研制

2.5 m非球面镜光谱要求为350–1700 nm波段平均反射率优于90%, 532 nm、1064 nm、1550 nm 3点波长反射率大于95%。根据光谱需求采用12层增强铝反射膜, 在铝反射膜之上镀制 Ta_2O_5 和 SiO_2 介质膜交替组合介质膜, 共12层。介质膜在增强铝膜反射光谱的同时, 对铝膜起到了保护作用, 可以有效地提高铝膜的使用寿命及环境适应性。在模拟基片上不同位置放置8个测试片沉积增强铝膜系, 不同位置所得反射率曲线如图9所示, 需求波段平均反射率为91.3%, 满足要求; 同时在532 nm、1064 nm、1550 nm处反射率均大于95%。

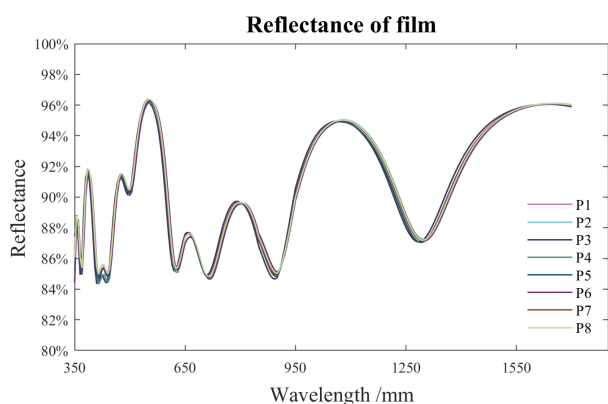


图9 2.5 m模拟基片上1–8号沉积位置膜系反射率曲线

Fig. 9 Reflective curve of the film system at deposition positions 1–8 in the 2.5 m simulated substrate

根据GB/T 26332.4-2015标准, 用宽胶带贴敷在反射膜表面, 然后垂直于膜层表面迅速提起, 重复多次直至膜层脱落。利用此方法对实验样品进行了测试, 在经过数次重复性实验后, 膜层无脱落, 说明所制备的薄膜具有较好的牢固性^[26]。在2.5 m非球面镜上完成宽光谱高反射率反射膜的研制, 镀膜后如图10所示。

对工件架上陪镀片进行测量, 测试曲线如图11所示, 满足镀膜要求。

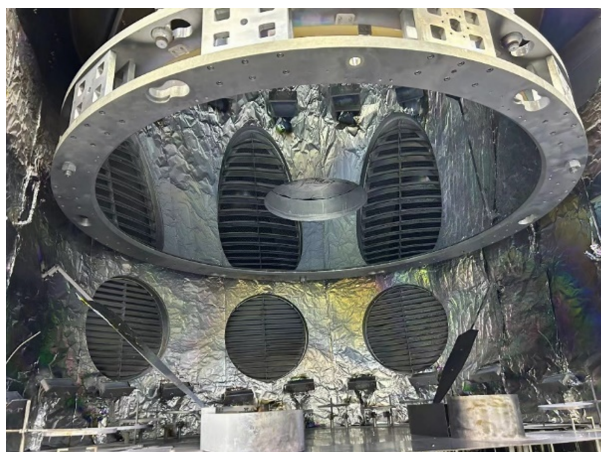


图10 2.5 m主镜镀膜

Fig. 10 Coating on the 2.5 m primary mirror

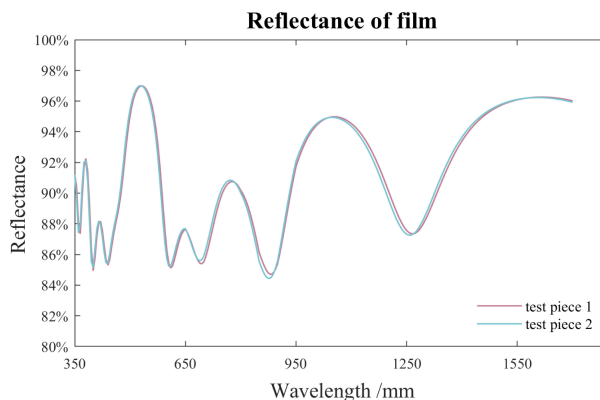


图11 2.5 m主镜陪镀片反射率曲线

Fig. 11 Reflective curve of the test pieces of the 2.5 m primary mirror

5 结论

离子束辅助沉积技术可以在2.5 m口径范围内获得性能优异的宽光谱高反射率反射膜。对于不同的薄膜材料, 通过匹配离子源线性分布范围, 并分析电子枪、离子源及基底相对位置, 独立设置双离子源参数, 在2.5 m口径非球面范围内获得光学常数一致性较好的高性能薄膜。通过对3.2 m真空镀膜设备中镜面与蒸发源的空间几何配置及镜面面形的计算, 确定满足最优均匀性的镜面几何高度, 并通过膜厚的镜面分布情况确定修正板形状及参数, 通过修正板提高了膜层的膜厚均匀性, 使2.5 m非

球面镜面中 Ta_2O_5 和 SiO_2 薄膜的膜厚均匀性均优于1.2%. 应用该方法完成了2.5 m口径非球面镜面的宽光谱高反射率膜层研制任务, 该方法还可用于后续北京师范大学1.9 m望远镜、南京大学2.5 m望远镜等多架望远镜反射镜的高性能反射膜镀制任务中.

参 考 文 献

- [1] 崔向群. 中国大型光学红外望远镜. 第十六届全国光学测试学术交流会议摘要集, 上海, 2016: 2
- [2] 孙梦至, 王彤彤, 王延超, 等. 中国光学, 2016, 9: 10
- [3] 王利, 程鑫彬, 王占山, 等. 红外与激光工程, 2007, 36: 3
- [4] Atwood B, Pappalardo D, O'Brien T, et al. Optomechanical Technologies for Astronomy. Florida: Proc. SPIE, 2006, 6273: 62730T
- [5] Zappellini G B, Martin H M, Miller S M, et al. Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications III. San Diego: Proc. SPIE, 2007, 6691: 66910U
- [6] Hayashi S S, Kamata Y, Kanzawa T, et al. Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI. Kona: Proc. SPIE, 1998, 3352: 454
- [7] Noguchi T, Kanzawa T, Yutani M, et al. Report of NAO-J, 1999, 4: 129
- [8] Kurakami T, Yutani M, Kanzawa T, et al. Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes. Glasgow: Proc. SPIE, 2004, 5494: 574
- [9] 伦宝利, 秦松年, 王建国, 等. 天文研究与技术, 2014, 11: 8
- [10] 张大伟, 贺洪波, 邵建达, 等. 激光技术, 2008, 32: 4
- [11] 张峰, 郑志宏. 材料研究学报, 1999, 13: 6
- [12] 江炳尧, 蒋军, 冯涛, 等. 功能材料, 2004, 35: 3
- [13] 艾万君, 熊胜明. 红外与激光工程, 2015, 44: 183
- [14] 李风云, 韩智洁, 刘明旭, 等. 天文学报, 2022, 63: 115
- [15] 王金晓, 王志民, 冯煜东, 等. 氧离子能量对离子束辅助沉积 Al_2O_3 薄膜的结构及光学性能的影响. 中国真空学会2006年学术会议, 西安, 2006: 18-19
- [16] 伦宝利. 大口径天文光学望远镜主镜镀膜的研究. 北京: 中国科学院大学, 2013: 3-8
- [17] 徐旭. 大口径主镜薄膜制备及其特性研究. 北京: 中国科学院大学, 2024: 2-8
- [18] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 20-22
- [19] Kaufman H R. RScI, 1990, 61: 230
- [20] Wheelock A, Cooke D L, Gatsonis N A. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville: AIAA, 2003, 5148: 1
- [21] Kaufman H R, Harper J. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2004, 22: 221
- [22] Staff of Kaufman & Robinson, Inc. Charge and Momentum Exchange in an Ion Beam. Technical Note KRI TN-03, 2003
- [23] 李凯朋, 王多书, 王济州, 等. 真空与低温, 2013, 4: 224
- [24] 艾万君, 熊胜明. 光电工程, 2011, 38: 6
- [25] 董磊, 方明, 易葵, 等. 功能材料, 2004, 35: 3216
- [26] Pawlewicz W T, Culver T R, Chiello M W, et al. Optical Thin Films IV: New Developments. San Diego: Proc. SPIE, 1994, 2262: 2

Study on the Wide Spectral and High Reflectivity Coating of 2.5 m Mirror

TIAN Jie^{1,2,3} LI Xin-nan^{1,2,3} WANG Jin-feng^{1,2,3} WANG Jun^{1,2} ZONG Wei-jie^{1,2}
XIE Duo^{3,4} LU Jin-hao^{1,2,3} HUANG Ya^{1,2}

(1 Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 Department of Optical Engineering, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

ABSTRACT In order to improve the observation capabilities of astronomical telescopes, the aperture of the telescope's primary mirror is continuously increasing, while the requirements for its coating are becoming more stringent, necessitating a wider reflection bandwidth and higher reflectivity. Based on the domestic demand for astronomical telescopes, this article investigates a wide-spectrum high-reflection

coating deposition technique for large-aperture mirrors using ion beam-assisted deposition technology. By analyzing the geometric configuration of the 3.2-meter coating equipment and the linear energy distribution area of the ion source, a dual-ion source partitioning and independent control method is adopted to achieve a coating layer with good consistency in optical constants within the range of a 2.5 m aperture spherical mirror. Starting from the actual shape of the 2.5 m primary mirror before coating, the height of the mirror surface when depositing the films is determined through simulation, and the shape and size of the correction plate are calculated to ensure that the uniformity of the coating layer is better than 1.2%. After designing the coating system, test pieces are placed at different positions in the simulated substrate for actual deposition. After testing, each test piece meets the design objectives. Based on the experimental results, the wide-spectrum high-reflectance coating of the 2.5 m primary mirror is finally completed using the 3.2-meter coating equipment and the ion beam-assisted deposition technology.

Key words instrumentation: wide spectral and high reflective film, telescopes, techniques: spectroscopic, techniques: ion beam assisted deposition