

大口径反射镜高反射膜研究进展

孙梦至^{1,2,3}, 王彤彤^{1,2}, 王延超^{1,2,3}, 刘震^{1,2}, 刘海^{1,2},
王笑夷^{1,2}, 杨海贵^{1,2}, 高劲松^{1,2*}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:大口径反射镜是大型反射式光学系统中关键的光学元件,在工作波段的反射率直接决定了光学系统的性能。随着地基、天基观测设备的发展,对大口径反射镜高反射膜提出了更宽的工作波段、更高的反射率、更好的环境适应性等要求。针对这些挑战,各种新的膜系结构、新的镀制方法、新的膜层材料纷纷出现,满足了大口径反射镜高反射膜的各种需求。本文对近些年国内外的大口径反射镜高反射膜研究进展予以综述,并预测大口径反射镜高反射膜制备的技术趋势将由铝反射膜向银反射膜、由热蒸发向磁控溅射发展。

关键词:大口径;反射镜;高反射膜;环境适应性

中图分类号: O484; TN304 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160902.0203

Research development of high reflecting coating for large-diameter mirror

SUN Meng-zhi^{1,2,3}, WANG Tong-tong^{1,2}, WANG Yan-chao^{1,2,3}, LIU Zhen^{1,2}, LIU Hai^{1,2},
WANG Xiao-yi^{1,2}, YANG Hai-gui^{1,2}, GAO Jin-song^{1,2*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

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

Abstract: Large-diameter mirrors are the key optical elements in large aperture reflective type optical system, and the optical system performance is directly associated with the reflectance in the working wavelength region. With the great development of the ground-based and space-based observing instruments, more critical performance is required for large-diameter mirrors, such as wider wavelength region, higher reflectance, better envi-

收稿日期:2015-12-21;修订日期:2016-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478035)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60478035)

ronment durability and so on. Kinds of new coating structures, new coating methods, new coating material are emerging to the challenges, meeting the requirements of high reflecting coating for large-diameter mirror. This paper reviews the research development of high reflecting coating for large-diameter mirror home and abroad, and predicts the developing trend for preparing high reflecting coating of large-diameter reflector from Al mirror to Ag mirror as well as from thermal evaporation to magnetron sputtering.

Key words: large-diameter, mirror; high reflecting coating; environment durability

1 引言

自第一台伽利略望远镜的诞生到现在已有400年的时光。望远镜的发展延伸了人类视野的极限,得以让人类领略宇宙的浩瀚,也为天文学的不断进步奠定了基础。对于光学系统,瑞利判据指出在一定的波长下,系统的分辨率取决于通光孔径的大小,通光孔径越大则光学系统的分辨率越高,从1609年口径4.2 cm、镜筒长度1.3 m的伽利略望远镜到1990年发射升空的2.4 m口径哈勃望远镜再到2009年主镜单镜口径8.4 m的大双筒望远镜(LBT),为了满足观测更加遥远目标和获得更清晰图像的要求,大口径光学元件的制造能力不断取得突破,获得了飞速发展。

反射式光学系统相对于透射式光学系统不存在色散的问题,而且更易获得大通光孔径,即更高的分辨率,因此反射式望远镜成为了目前被应用最为广泛的大口径光学系统的类型,而大口径反射镜正是大型反射式光学系统中的核心关键元件之一。大口径反射镜的光学性能重度依赖于镜体反射面镀制的反射膜的性能。

2 大口径高反射镜面临的主要问题

2.1 工作波段及反射率要求

随着近些年探测技术及激光技术的发展,光谱响应范围已经不只局限于可见光波段,对于紫外波段,红外波段,乃至太赫兹波段都提出了需求,宽光谱观测的需求无疑对反射膜的光谱性能提出了工作波段的要求^[1-2]。此外,大型光学系统中大多需要经过多次反射,反射率的差异在经过

多次运算后对信噪比的影响很大。因此,宽光谱高反射率是目前所要提高的大口径反射膜的主要光学性能之一。

2.2 反射镜吊装运输及膜厚均匀性要求

大口径镀膜对大口径反射镜的吊装、膜厚均匀性的控制也是一项挑战。大口径反射镜重量大,运输、转移,吊装、反转对于反射镜有很大的破坏风险;对大口径反射镜镀膜,反射镜中心到边缘蒸镀或者溅射的角度差异很大,不易于控制膜厚均匀性,而膜厚均匀性是衡量镀膜装置和膜层质量的一项重要指标^[3]。

2.3 环境适应性

地基大口径反射镜通常都要暴露在室外的严苛环境下使用,天基大口径反射镜还需考虑空间辐射的影响^[4],这就对反射膜的光学性能和环境适应性提出了很高的要求,不仅希望高反射膜具有优秀的耐久性,更希望反射膜层在被破坏失效后易于清洗清除。因此,选择合适的反射层以达到大口径反射镜光学性能的需求;选择合适的保护层以防止反射膜被外界环境所腐蚀或清洁表面污物时被损伤;选择合适的连接层以使膜层间连接更加牢固;并且希望连接层材料易于被化学试剂清洗而不损伤反射镜基底。

3 大口径反射镜高反射膜的研究进展

3.1 反射层的选择

大口径光学系统制造难度大,成本高,所以在单一的大口径光学系统当中需要尽可能的收集更宽的光谱,最大化的利用一套系统收集更多信息,所以反射膜的宽光谱反射特性在反射层选择时被列为主要因素。金属反射膜具有膜系简单,制备工艺相对需求低,工作波长范围宽等优点,可以在

很宽的工作波长下都能达到非常高的反射率,最大程度的满足了大口径光学系统的设计和使用需求,因此在目前使用的大口径光学系统中金属反射膜得到了大范围的应用。

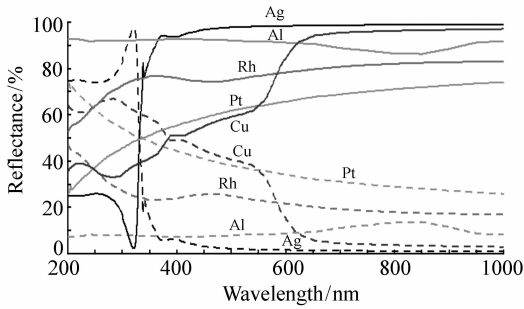


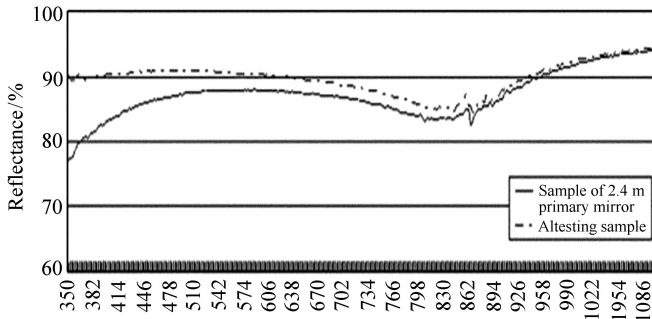
图1 常用金属膜的反射率(实线)和吸收率(虚线)曲线

Fig. 1 Reflectance (solid) and absorbance (dash) of commonly-used metal coatings

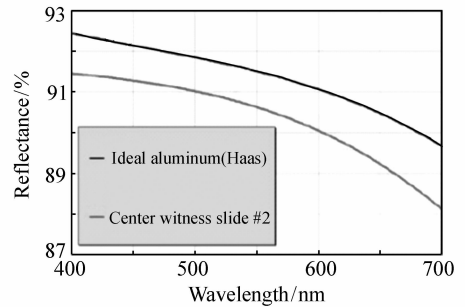
图1 给出几种常用金属膜在不同波长上的反

射率和吸收率。从图中我们看到,Al 在紫外到红外区域都拥有很高的反射率,Ag 和 Au 虽然拥有的工作波段不如 Al,但是在自己所在的工作波段拥有更高的反射率,其他金属材料在光学特性上都要稍逊一筹,目前反射光学系统中最常用的金属反射膜材料就是 Al、Au 和 Ag。但是由于一般大口径光学系统工作波段为紫外到红外,所以除非工作波段仅在红外有要求,否则 Au 作为反射膜是比较少出现的。

目前著名的大口径反射式天文望远镜主要参数如附表1所示^[5-15],可见目前常用的反射镜材料为铝,这是因为铝在宽波段有较高的反射率,而且其表面在空气中迅速形成一层致密的 Al_2O_3 保护膜防止 Al 被进一步腐蚀破坏,且 Al_2O_3 保护膜对反射率的影响可以被天文应用所接受^[10],所以可以不在表面加镀保护膜。但是铝镜大部分光谱范围在可见到近红外波段,且反射率在 90% 左右,其中两个大口径铝反射镜在所需光谱范围内的反射率曲线如图2所示。



(a) 2.4 m 镀铝望远镜主镜反射率^[13]
(a) Reflectance of 2.4 m primary Al mirrors



(b) MMT6.5 m 望远镜主镜镀铝反射率^[12]
(b) Reflectance of MMT6.5 m primary Al mirrors

图2 2.4 m(a)和 MMT6.5 m(b)望远镜主镜镀 Al 反射率^[12]

Fig. 2 Reflectance of 2.4 m(a) and MMT 6.5 m(b) primary Al mirrors

然而,随着大口径反射镜对光学性能要求的提高,铝反射镜的反射率、吸收率越来越无法满足人们的需求,因此,银反射镜被看作是有望实现各项要求的金属膜材料。但是由于银与玻璃基底连接性差易发生剥落,在空气中被氧化、硫化、氯化等严重影响其反射率,因此尚无法实现广泛应用。但 1998 年 Gemini(8 m 双子座望远镜)成功实现

银膜在大口径反射镜的应用^[10,16],虽然尚存在镀膜困难、反射率在 400 nm 以下骤降等一系列问题,但是仍然使银膜应用在大口径反射镜上成为可能,更将光谱带宽拓宽至 0.3 ~ 25 μm 且显著提高宽带反射率,如图3所示。而我国云南天文台在 2009 年建成的主镜镀铝 2.4 m 大口径天文望远镜系统也正式投入使用^[13-14]。随着目前更

宽的工作波段的需要,2013年又对银反射膜层进

行了探索。

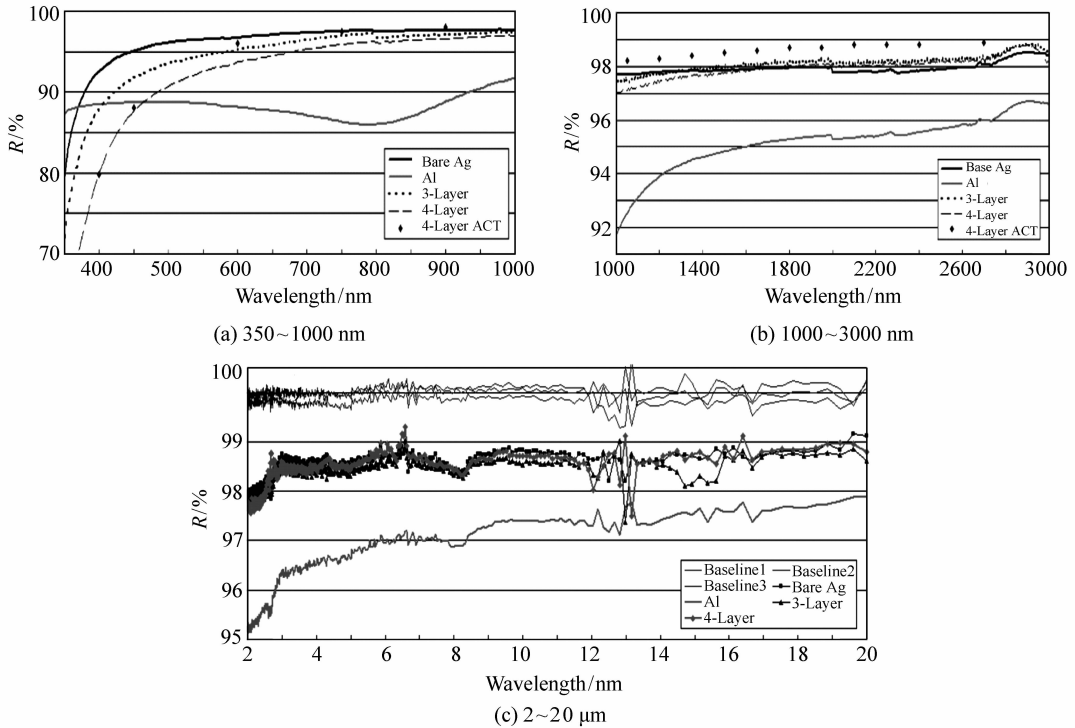


图3 Gemini 镀银望远镜主镜反射率曲线^[16]

Fig. 3 Reflectance of Gemini primary Ag mirror

3.2 反射膜的淀积技术

反射膜淀积技术包括物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)等。一般反射镜镀膜均采用物理气相沉积,包括热蒸发、溅射和离子镀膜等^[17]。

离子镀虽然兼具热蒸发和溅射的特点,但是由于其淀积原理使处于离子态的淀积粒子最终在基板表面氧化生成低吸收的氧化物,因此不适合采用离子镀方法镀大口径金属反射镜。

热蒸发几乎能淀积所有薄膜,蒸发粒子不带电,而且因为高真空淀积,几乎不受残余气体分子碰撞,能够制成高纯度薄膜。但是由于淀积粒子能量低,故常呈多孔的柱体结构。离子辅助蒸镀(IAD)或PIAD虽属于热蒸发,但是随着氩、氧离子的辅助轰击,大大提高薄膜的致密度、牢固度,也使氧化物薄膜的吸收进一步降低。

普通的溅射系统溅射速率较低,磁控溅射技术使溅射速度大大提高,在溅射金属时更可避免二次电子轰击而使基板保持接近冷态,在低温镀膜要求下具有重要的意义。但是由于溅射过程中

有大量荷电粒子,激活粒子易反应而降低膜层纯度。

由附表1和附表2^[1,2,4,10,16,18-23]可以看出,镀铝反射膜大多数采用热蒸发的方式(Subaru、LBT、MMT、国内大口径镀铝天文望远镜等均采用热蒸发方式),但是在大口径镀膜过程中,普遍存在蒸发源过多难于控制、主镜过重不适宜Face-down的蒸镀方式的问题。此外,热蒸发功率小,也是造成膜层质量差的原因之一,而这在镀银过程中尤为明显。

另一方面,溅射由于功率大,粒子运动速率大,更容易获得均匀致密的膜层。溅射过程中基板温度低于热蒸发情况而对反射镜面型影响更小。溅射粒子运动方向受磁场控制,可以满足Face-up镀膜方式的需求,避免翻转吊装过程对膜层有破坏,也对镀膜机的机械稳定性能要求有所降低。因此,溅射技术逐渐被广泛应用(如VLT镀铝、Gemini镀银、LLNL镀银等均采用溅射方式)。

但是,2008年,开普勒空间望远镜工程采用

IAD方式使银膜在空间环境中吸湿作用明显减小,2012年,加州天文台大学(UCO)采用离子辅助电子束蒸镀方式,对镀膜机结构加以改进,电子枪、离子源和基底几何位置固定,单轴转动基底,可使任意半径处淀积的膜层一致。2013年,中科院光学系统先进制造技术重点实验室通过对挡板的设计修正膜厚也取得重大成果^[24]。

2013年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所使用PIAD技术成功在低温下完成了1.56 m望远镜铝增强高反射膜的镀制,实现了多波段多层介质增强高反射膜的镀制,膜层致密、牢固、具有良好的环境适应性,膜层均匀性优于3%,不同位置测试片反射率如图4所示;2014年,完成了国内目前最大的Face-up形式多模式磁控溅射镀制大口径光学元件的镀膜设备建造,可完成4.5 m量级反射镜的多层高反射膜镀制。

因此,不同的镀膜工艺配合着不同的需求和不同的镀膜机结构,均有望获得优秀的反射膜层。

3.3 反射镜的连结层和保护层

随着大口径反射镜对光学性能的要求越来越高,银膜已被看做是唯一有望实现各项要求的金属膜材料。

根据多年来镀铝经验,铝反射膜由于其在空气中迅速被氧化形成 Al_2O_3 保护膜而鲜有再在外层加镀保护膜的设计,一般外层保护膜的主要作用为增强铝膜反射率等光学性能。

相对而言,裸银反射镜表面会由于环境的因素出现变色(氧化、硫化、氯化等形成 Ag_2O 、 Ag_2S 、 $AgCl$ 、 Ag_2SO_4 、 Ag_2CO_3 等^[21,25-34])导致反射率降低,因此需要在其表面加镀保护膜防止其在空气中被腐蚀变色。J. M. Bennett等人指出^[18], Ag_2S 吸收主要在 $1.4 \mu m$,在红外区几乎是透明的,但是 Ag_2S 会影响银膜的光学性质,粗化银膜表面,也因此通过反常的皮肤效应^[35]带来额外的吸收。并且硫化产生的 Ag_2S 并不能像Al膜表面氧化生成的 Al_2O_3 保护膜一样,阻止硫化和腐蚀的进一步发生,因此最终导致银膜完全被腐蚀。有必要为Ag添加有效的保护膜。

保护膜不仅需要不易被腐蚀,能够提供有效的防护作用,同时也要对工作波段反射率影响小,并且其制备简单、成膜致密。Gemini提出的银膜保护方案^[16]使银反射镜耐久性有显著提高,完全暴露在室外各种环境(灰尘、高湿度、雨季、暴风雪)下254天后可见反射率损失只有0.75%/月,并且只是由于膜间嵌入的灰尘导致。而后又对比Gemini望远镜南北半球位置(GS、GN)不同保护银膜结构反射率下降情况,结果如表1所示。

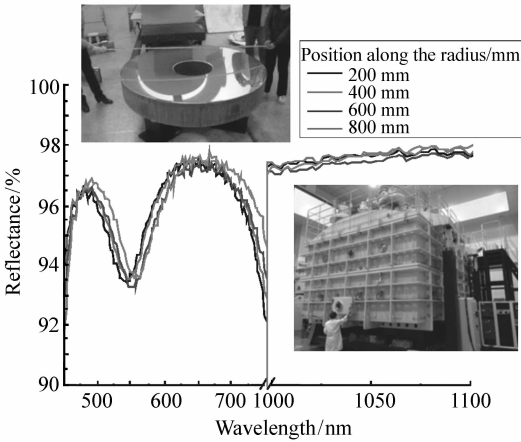


图4 中国科学院长春光机所1.56 m望远镜铝增强高反射膜不同半径处测试片反射率

Fig.4 Sample reflectance of enhanced-Al high reflecting coating of 1.56 m telescope tested at different radii (CIOMP)

表1 Gemini望远镜南北半球位置(GS、GN)不同保护银膜结构反射率下降情况

Tab.1 Reflectivity loss of different Ag coatings at GS/GN

膜层	GS 470 nm 反射率月降低率(排除灰尘影响)/%	样品暴露时长/天	GN 470 nm 反射率月降低率(排除灰尘影响)/%	样品暴露时长/天
裸银	3.98	566	1.47	566
SiN_x 保护的银膜	2.28	315	-	-
3层银膜	0.28	411	0.47	263
4层银膜	0	263	0	263

银反射膜的另一个缺憾就是其与基底和保护层的结合力弱,使膜层易脱落,更不利于保护层其作用,因此需要上、下连接层起过渡作用,增强膜层之间的结合^[10,36],同时下层连接膜也有可能对上层生长的反射膜的晶粒大小、粗糙度等有改善,好的连接层使薄膜更致密、不易脱落、反射率更高^[37]。

几种典型的银反射镜的连接膜和保护膜材料及其优缺点如附表2所示。

从表中可以看出,基于氮化物的膜系结构比传统的Cr或 Al_2O_3 与Ag连接更牢固,对反射率影响也最小,但是由于其不仅在镀膜过程中不易控制溅射比例,而且在蓝光到紫外的强吸收,使其应用受限;此外,脱膜困难也是亟待解决的问题。

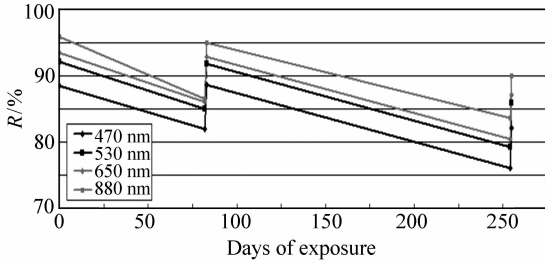


图5 4层银膜反射率随室外暴露时间变化曲线

Fig. 5 Reflectivity loss of a 4-layer Ag film sample exposed outdoor

也有人提出用Cu或氟化物做连接层的方案,更多结果仍然需要进一步研究。

4 结束语

本文详细介绍了大口径反射镜高反射膜的研究进展,简要阐述了人们在面对日益增强的天文观测的需求时,反射膜的进步和发展历程。Al反射镜在目前的大口径光学系统中的制备已经相当成熟,其材料的光学性能也已被发挥到接近极限,如果继续增强其宽带反射特性,要增加介质反射层,这将影响金属反射膜的中性特性。所以拥有从可见到红外波段反射率最高、红外吸收率最小的金属反射层材料,Ag将成为今后大口径反射层材料的研究热点。如何将Ag膜长期可靠地应用在大口径反射镜表面成为今后大口径反射膜的发展趋势。

上述研究进展为今后的大口径反射镜高反射膜的研究提供了方向:(1)由铝反射膜向银反射膜发展,可获得更高反射率、更宽的光谱带宽、更优秀的光学性能;(2)镀膜手段由热蒸发向磁控溅射改进,既解决了大口径镀膜由于面积过大而使蒸发源过多导致难于控制同步蒸发,又由于溅射粒子运动速率高于热蒸发而更易获得致密的膜层,提高膜层质量,更可以解决被镀件在下、靶材在上、蒸发粒子受重力影响导致热蒸发获得的膜层均匀性差的问题;(3)研发新的膜系结构,寻找其他膜层材料,并寻找合适的脱膜剂,使银反射镜能长期可靠地应用在大口径光学系统中。

附表1 目前国内外大口径天文望远镜主镜优缺点

Appendix 1 Advantages and disadvantages of large-diameter astronomical telescope primary mirrors currently

望远镜	年份	地基/ 天基	单镜尺 寸/m	反射膜 材料	镀膜 方式	优点	缺点
Subaru	1999	地基	8.3	Al	热蒸发	镀膜机放置在观测室地下室 内,减少运输风险;主镜面朝 上,无需竖起或反转;自行引 入离子轰击棒,使它与气体 产生辉光放电来清洁镜面	288个蒸发源 难于控制
VLT	1995 1996 1997 1998	地基	8.2 * 4	Al	磁控 溅射	镀膜机结构与Subaru类似, 有效减少主镜吊装风险;溅 射技术可以获得性能更好 的铝膜	镀膜时依靠主镜工转 调节铝膜膜厚均匀性, 对镀膜机的稳定性 要求高

Gemini	1998	地基	8.1 * 2	NiCrN _x + Ag + NiCrN _x + SiN _x	反应 溅射	圆柱体型阴极绕轴快速转动,使表面溅射更均匀,不再出现临近磁体的靶材被集中侵蚀现象	Si 中掺杂 5% 的 Al 增加直流溅射时的导电性,但是氮化铝保护层虽然对红外反射率没有影响,却对蓝光紫外区域可能有危害
LBT	2009	地基	8.4 * 2	Al	热蒸发	28 个氮化硼坩埚热蒸发工艺,蒸发源少,方便控制所有蒸发源同步蒸发,提高膜层质量 独特的 PWM 循环系统使 200 个蒸发源可以同时被加热;真空室分区设计使一面的蒸镀压力得到很好的控制;源阵列靠近基底的设计使镀膜均匀性更好	主镜与真空室竖直放置,增加操作风险
MMT	2000	地基	6.5	Al	热蒸发	自上向下热蒸发,镀前使用无水乙醇清洗蒸发源和材料,可适当减少滴落的发生	原位镀膜方式,清洗不干净
云南天文台	2009	地基	2.4	Al + MgF ₂	热蒸发	膜层致密、牢固、具有良好的环境适应性,膜层均匀性优于 3%	铝膜膜厚不均匀性为 5.82%,保护膜使可见波段反射率降低 5% 左右
上海天文台	2013	地基	1.56	Al + SiO ₂ + TiO ₂	PIAD		主镜在上的镀膜方式,使主镜吊装反转运输过程膜层有受损风险

附表 2 几种典型的银反射镜的膜层材料及优缺点

Appendix 2 Several typical materials and advantages/disadvantages of Ag reflecting mirrors

年份	第一作者/ 项目名称	连接层材料	保护层材料	镀膜 方式	优点	缺点
1973	D. K. Burge	-	SiO ₂	热蒸发	坚固耐久	$\lambda = 9.5 \mu\text{m} (R = 97.2\%)$ 和 $\lambda = 12.5 \mu\text{m} (R = 99.0\%)$ 处有明显的吸收带 随时间增长,反射率下降速度比裸银快
			MgF ₂		未表现明显吸收	
			Al ₂ O ₃		11 μm 处达到吸收极大值,并向红外扩展,但 11 μm 处最低反射率仍约为 99%	明显降低可见波段反射率
1975	G. Hass	-	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	热蒸发	坚固耐久	红外波段大角度入射时引起强烈的偏振效应
1982	S. D. Browning	厚 Al	四层高低折射率介质堆 (Al ₂ O ₃ 、 Ta ₂ O ₅)	热蒸发	厚 Al 膜上镀薄银膜(20 ~ 25 nm)使 300 ~ 320 nm 区域反射率提高;保护膜能有效保护银膜并提高紫外反射率	宽带反射率并没有体现银膜优势,工艺复杂,不如直接用铝膜

1985	D. Y. Song	Cu	四层高低折 射率介质堆 (Al_2O_3 、 Ta_2O_5)	热蒸发	用线性外推法推测这 种膜系的寿命长达两年	370 nm 附近反射率 明显降低
1998	Gemini	NiCrN_x	SiN_x	磁控 溅射	完美通过环境测试耐 久测试,反射率高达 99.1% ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)	500 nm 以下反射率 骤降,脱膜困难
1998	Norman Thomas (NIF)	NiCrN_x	SiN_x + 金属氧化物	磁控 溅射	$R_{\text{VIS}} = 95\% \sim 97\%$, $R_{\text{IR}} > 98\%$,且在 $0^\circ \sim$ 60° 入射时 $R > 95\%$, $60^\circ \sim 80^\circ$ 入射时 $R >$ 90%;推测使用寿 命达30年以上	带宽只有 400 ~ 1 000 nm, 且反射率低于 前人实验
2000	LLNL	$\text{Al} + \text{NiCrN}_x +$ $\text{Ag} + \text{NiCrN}_x$	$\text{SiN}_x +$ 金属氧化物	磁控 溅射	虽然实现大角度宽波段高反射率, 但是反射率都与裸银相差甚远	
2004	LLNL	$\text{Al} + \text{NiCrN}_x +$ $\text{Ag} + \text{NiCrN}_x$	$\text{SiN}_x + (\text{SiO}_2 +$ $\text{Ta}_2\text{O}_5)^6 +$ SiO_2	磁控 溅射	300 ~ 2 500 nm 宽带高反 射率,暴露9个月且清洁 之后反射率只轻微下降	宽带反射率只有 95%左右
2008	开普勒 空间望远镜	NiCrN_x	$\text{Si}_3\text{N}_4 +$ 五层高低 折射率金属 氧化物	离子辅助 蒸镀	温湿度测试前后反射率 没有明显变化;热蒸发使 NiCrN_x 厚度控制到刚 好能保护银膜,降低其 在紫外区域的强吸收	宽带高反射率 ($> 400 \text{ nm}$)只有 95%左右
2012	Andrew C. Phillips 等 (UCO)		$\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{YF}_3 +$ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ag} +$ $\text{YF}_3 +$ 高折 射率金属氧化物	离子 辅助 电子束 蒸镀	结构在 340 nm 及其更 短波长都有极高的反射 率;在热红外区域有约 1.5%的发射率;满足 空间望远镜长达5年 以上的使用需求	由于未知原因,膜 系在 8 ~ 12 μm 有 少量吸收,推测是 由 YF_3 引起

参考文献:

- [1] SONG D Y, SPRAGUE R W, MACLEOD H A, *et al.*. Progress in the development of a durable silver-based high-reflection coating for astronomical telescopes[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(8): 1164-1170.
- [2] THOMAS N L, WOLFE J D. UV-shifted durable silver coating for astronomical mirrors[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2000; 312-323.
- [3] 伦宝利. 大口径天文光学望远镜主镜镀膜的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(云南天文台), 2013.
LUN B L. Research on mirror coating of large diameter astronomical optics telescope[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Yunnan Observatory), 2013. (in Chinese)
- [4] SHEIKH D A, CONNELL S J, DUMMER R S. Durable silver coating for Kepler space telescope primary mirror[J]. *SPIE*, 2008, 7010: 70104E-5.

- [5] HAYASHI S S, KAMATA Y, KANZAWA T, *et al.*. Status of the coating facility of the Subaru Telescope[C]. *Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 1998:454-462.
- [6] NOGUCHI T, KANZAWA T, YUTANI M, *et al.*. Coating of the 8.3 m primary mirror of the Subaru telescope[J]. *Report of the National Astronomical Observatory of Japan*, 1999, 4:129-137.
- [7] KURAKAMI T, YUTANI M, KANZAWA T, *et al.*. Mirror coating 2003 in SUBARU telescope[J]. *SPIE*, 2004, 5494:575-581.
- [8] First Large VLT Mirror Successfully Coated. [EB/OL]. [2014-08-06]. <http://www.eso.org/public/images/eso9819a/>.
- [9] The Giant Coating Plant for the ESO VLT. [EB/OL]. [2013-04-09]. <http://www.eso.org/public/images/eso9711a/>.
- [10] JACOBSON M R, KNEALE R C, GILLETT F C, *et al.*. Development of silver coating options for the Gemini 8-m telescopes project[C]. *Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 1998:477-502.
- [11] HILL J M. The large binocular telescope[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(16):D115-D122.
- [12] CLARK D, KINDRED W, WILLIAMS J T. In situ aluminization of the MMT 6.5 m primary mirror[J]. *SPIE*, 2006, 6273:627305-13.
- [13] 伦宝利, 秦松年, 王建国, 等. 2.4米望远镜主镜镀膜工艺的研究[J]. *天文研究与技术*, 2014, 02:176-183.
LUN B L, QIN S N, WANG J G, *et al.*. A study of technologies of coating on the primary mirror of the 2.4m optical telescope of the yunnan observatories[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2014, 2:176-183. (in Chinese)
- [14] 伦宝利, 秦松年, 王建国, 等. 2.4米望远镜铝反射镜介质保护膜的研究[J]. *中国激光*, 2013, 9:162-166.
LUN B L, QIN S N, WANG J G, *et al.*. Study of protective layer for 2.4 m telescope's Al coating[J]. *Chinese Laser*, 2013, 9:162-166. (in Chinese)
- [15] 尹锡舜, 李宪华, 叶达康, 等. 1.56米天文望远镜片镀膜设备[J]. *真空科学与技术*, 1985, 6:64-68.
YIN X S, LI X H, YE D K, *et al.*. Coating equipment for 1.56 m astronomical telescope lens[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1985, 6:64-68. (in Chinese)
- [16] BOCCAS M, VUCINA T, ARAYA C, *et al.*. Coating the 8-m Gemini telescopes with protected silver[J]. *SPIE*, 2004, 5494:239-253.
- [17] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等著. 现代光学薄膜技术[M]. 第1版. 浙江:浙江大学出版社, 2006.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. First edition. Zhejiang: Zhejiang University press, 2006. (in Chinese)
- [18] BURGE D K, BENNETT H E, ASHLEY E J. Effect of atmospheric exposure on the infrared reflectance of silvered mirrors with and without protective coatings[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(1):42-47.
- [19] HASS G, HEANEY J B, HERZIG H, *et al.*. Reflectance and durability of Ag mirrors coated with thin layers of Al₂O₃ plus reactively deposited silicon oxide[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(11):2639-2644.
- [20] BROWNING S D, JACOBSON M R, MACLEOD H A, *et al.*. Development of high reflectance coatings for ground-based astronomical instruments[C]. 1982 Astronomy Conferences. International Society for Optics and Photonics, 1982:310-315.
- [21] THOMAS N L, WOLFE J D, FARMER J C. Protected silver coating for astronomical mirrors[C]. *Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 1998:580-586.
- [22] WOLFE J, SANDERS D. *Optical & Environmental Performance of Durable Silver Mirror Coatings Fabricated at LLNL* [M]. United States: Department of Energy, 2004.
- [23] PHILLIPS A C, MILLER J S, BOLTE M, *et al.*. Progress in UCO's search for silver-based telescope mirror coatings[J]. *SPIE*, 2012, 8450:84502G-8.
- [24] 张立超, 高劲松. 基于遮挡矩阵的膜厚修正挡板的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 11:2757-2763.
ZHANG L C, GAO J S. Design of uniformity correction masks based on shadow matrix[J]. *Opt. Precision Eng.*. 2013, 11:2757-2763. (in Chinese)
- [25] BENNETT H E, BURGE D K, PECK R L, *et al.*. Validity of ellipsometry for determining the average thickness of thin,

discontinuous, absorbing films[J]. *JOSA*,1969,59(6):675-681.

- [26] GRAEDEL T E. Corrosion mechanisms for silver exposed to the atmosphere[J]. *J. Electrochemical Society*,1992,139(7):963-1970.
- [27] THOMAS N,ERLANDSON A,FARMER J,*et al.*. Protected silver coatings for flashlamp-pumped Nd:glass amplifiers[J]. *SPIE*,1998,3578:730-736.
- [28] THOMAS N L,SIEKHAUS W J,FARMER J C,*et al.*. Prevention of corrosion of silver reflectors for the National Ignition Facility[C]. SPIE's International Symposium on Optical Science,Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics,1998:394-400.
- [29] FARMER J,THOMAS N,SIEKHAUS W,*et al.*. Atmospheric tarnishing of silver-plated laser mirrors[J]. *Lawrence Livermore National Laboratory Oct*,1997,6.
- [30] THOMAS N,WOLFE J,FARMER J,*et al.*. Protected silver coating for national ignition facility flashlamp reflectors[C]. OSA Optical Interference Coatings Topical Meeting, Tucson, Arizona, USA,1998:1-9.
- [31] JACOBSON M R,KNEALE R C,GILLET F C,*et al.*. Development of silver coating options for the Gemini 8-m telescopes project[C]. Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics,1998:477-502.
- [32] RICE D W,PETERSON P,RIGBY E B,*et al.*. Atmospheric corrosion of copper and silver[J]. *J. Electrochemical Society*,1981,128(2):275-284.
- [33] REAGOR B T,SINCLAIR J D. Tarnishing of silver by sulfur vapor; film characteristics and humidity effects[J]. *J. Electrochemical Society*,1981,128(3):701-705.
- [34] FRANEY J P,KAMMLOTT G W,GRAEDEL T E. The corrosion of silver by atmospheric sulfurous gases[J]. *Corrosion Science*,1985,25(2):133-143.
- [35] BENNETT H E,BENNETT J M,ASHLEY E J,*et al.*. Verification of the anomalous-skin-effect theory for silver in the infrared[J]. *Physical Review*,1968,165(3):755.
- [36] 孙喜莲,范正修,邵建达. Al_2O_3 和Cr过渡层对Ag膜光学性质及其附着力的影响[J]. *金属学报*,2007,3:307-310.
SUN X L,FAN Z X,SHAO J D. Effects of Al_2O_3 and Cr interlayers on the optical property and adhesion of Ag film[J]. *Metal*,2007,3:307-310. (in Chinese)
- [37] 谢致薇,蒙继龙,王国庆. 物理气相沉积薄膜的界面与附着力[J]. *真空科学与技术*,2001,3:33-39+43.
XIE ZH W,MENG J L,WANG G Q. Interfaces and adhesion in physical vapor deposition films[J]. *Vacuum Science and Technology*,2001,3:33-39+43. (in Chinese)

作者简介:



孙梦至(1991—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学功能薄膜方面的研究。E-mail: sunmengzhi@icloud.com



高劲松(1968—),男,吉林白城人,博士,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学薄膜的前沿研究以及特种光学薄膜的制备方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn