

## 2.4 m 望远镜铝反射镜介质保护膜的研究

伦宝利<sup>1,2,3</sup> 秦松年<sup>1</sup> 王建国<sup>1,2</sup> 刘 忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011  
<sup>2</sup> 中国科学院天体结构与演化重点实验室, 云南 昆明 650011  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用国内首个自上向下热蒸发反射膜的大型镀膜机 ZZS3200, 开展了 2.4 m 望远镜铝反射镜镀膜介质保护膜的研究。根据 2.4 m 望远镜主镜面型, 结合 ZZS3200 型镀膜机真空室空间几何配置, 分析了介质保护膜膜厚均匀性, 设计了一款自上向下热蒸发保护膜材料的蒸发舟, 开展了铝反射镜的介质保护膜工艺研究。结果表明: 蒸发舟蒸发特性接近 1, 2.4 m 主镜介质保护膜膜厚不均匀性小于 13.6%。脱膜清洗效果表明, 相比于 SiO<sub>2</sub> 保护膜, MgF<sub>2</sub> 保护膜更容易清洗, 可减少脱膜对镜面造成的腐蚀, 并有更高的反射率, 更适用于 2.4 m 望远镜主镜。完成 2.4 m 望远镜主镜镀膜铝加 MgF<sub>2</sub> 保护膜, 镀膜片在 350~1100 nm 波段范围内, 平均反射率为 87.16%, 实测 2.4 m 望远镜极限星等不低于 23.5 等。

**关键词** 薄膜; 保护膜; 铝反射膜; 脱膜; 天文主镜

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0907002

## Study of Protective Layer for 2.4 m Telescope's Al Coating

Lun Baoli<sup>1,2,3</sup> Qin Songnian<sup>1</sup> Wang Jianguo<sup>1,2</sup> Liu Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China  
<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The technology for coating protective dielectric layer to 2.4 m telescope's aluminium coating is studied using the large vacuum evaporation coating machine ZZS3200, which is the first vacuum evaporation chamber evaporating materials from top to bottom in China. According to the profile of 2.4 m telescope's primary mirror and the geometry of ZZS3200, the uniformity of the dielectric layers is analyzed and a moly boat source for evaporating materials from top to bottom is designed. The result shows that the index of evaporation characteristics is approximate to 1, and the non-uniformity of the dielectric film on 2.4 m mirror is less than 13.6%. Comparing the effect of removing the old protected aluminium coating, it is found that, compared with the SiO<sub>2</sub>-protected coating, MgF<sub>2</sub>-protected coating is easier to be removed, which can decrease the erosion of mirror during the coating removal, and has higher speculum reflectivity. The 2.4 m telescope's mirror aluminium coating with MgF<sub>2</sub>-protected layer is completed. The reflectivity of witness sample is 87.16% in the wavelength range of 350~1100 nm, and the limiting magnitude is not less than 23.5 magnitude.

**Key words** thin films; protective layer; aluminium coating; coating removal; astronomical mirror

**OCIS codes** 310.1515; 310.6870; 310.3840; 350.1260

### 1 引 言

云南天文台丽江 2.4 m 望远镜位于云南天文台

丽江观测站, 目前配备终端有 PI 公司的 CCD、云南天文台暗弱天体分光及成像仪(YFOSC)、丽江太阳系外

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11003042)

作者简介: 伦宝利(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事天文薄膜技术方面的研究。E-mail: lunbl@ynao.ac.cn

导师简介: 刘 忠(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文光学技术方面的研究。E-mail: lz@ynao.ac.cn

行星探测器(LiJET),其工作波段集中在330~1100 nm。该望远镜由英国TTL公司制造,2005年开始安装,主镜有效口径2400 mm,由一整块微晶玻璃加工而成,重2.39 t,镀有单层铝反射膜。

单层铝反射膜暴露在空气中,会在表面形成一层厚度约9 nm的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化层。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>是典型的两性氧化物,在酸性和碱性环境都会受到腐蚀。2.4 m望远镜已经运行了7年,由于大气中灰尘在主镜表面的沉积及酸性成分<sup>[1]</sup>对膜层的腐蚀,主镜效率大大下降,因此,有必要对主镜重新镀膜并加镀保护膜<sup>[2-5]</sup>。

单层介质膜将会使铝膜的反射率下降,主镜重镀需要将旧膜清洗掉,旧膜脱膜过程中,脱膜液可对主镜造成腐蚀<sup>[6]</sup>,选择保护膜时需要考虑保护膜对主镜反射率及旧膜清洗的影响。本文利用成都南光机器有限公司生产的ZZS3200镀膜机,结合2.4 m望远镜及丽江观测站的特点,对天文望远镜主镜保护膜进行了研究。

## 2 保护膜蒸发舟的设计

计算保护膜膜厚的理论分布与蒸发舟的蒸发特性的关系。ZZS3200镀膜机的真空室直径3200 mm,高度3500 mm,为减少主镜翻转时吊装风险,采用蒸发源在上,主镜在下的方式镀制主镜反射膜<sup>[2]</sup>。蒸发源A与目标点P几何关系如图1所示,当平均自由程大于蒸发源与目标点间距,分子间碰撞可以忽略时,面源在旋转球面上沉积膜厚分布的公式为<sup>[7]</sup>

$$\langle t_p \rangle = C \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^n \varphi \cos \theta}{r^2} d\omega, \quad (1)$$

式中r为蒸发源与目标点的距离;θ为直线AP与基底法线的夹角;φ为蒸发源水平放置时直线AP垂直方

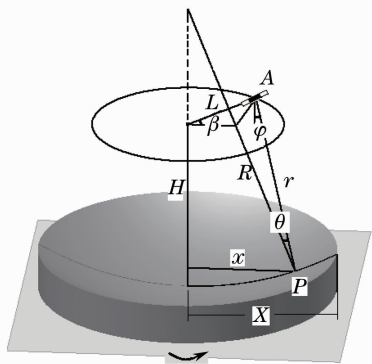


图1 蒸发源A与目标点P几何关系示意图  
Fig.1 Geometrical relationship between source A and target P

向的夹角;C为与蒸发材料密度相关的常数;ω为镜片旋转角速度;n为蒸发源的蒸气发射特性指数,与蒸发舟结构、蒸发物沾湿源材料程度、蒸发方式、蒸发速率等相关。

ZZS3200镀膜机配备3组介质蒸发源,平均分布在半径L的圆上,每个舟可独立控制,令目标点坐标P(x<sub>p</sub>,y<sub>p</sub>,z<sub>p</sub>)=(x,0,z<sub>p</sub>),蒸发源坐标A(x<sub>A</sub>,y<sub>A</sub>,z<sub>A</sub>)=[Lcos(β),Lsin(β),H],建立几何模型,则有:

$$\begin{cases} z_p = R - \sqrt{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)} \\ r = \sqrt{(x_A - x_p)^2 + (y_A - y_p)^2 + (z_A - z_p)^2} \\ \cos \varphi = (H - z_p)/r \\ \cos \theta = \frac{R^2 + r^2 - [x_A^2 + y_A^2 + (R - H)^2]}{2Rr} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,x为目标点与主镜旋转轴距离,x∈[0,X],X为主镜半径,L为蒸发源A与主镜旋转轴距离,H为蒸发源所在平面与镜面顶点距离,R为镜面曲率半径。

将X=1200 mm,L=1080 mm,H=1250 mm,R=11520.0 mm,代入(1)、(2)式,可以得到2.4 m主镜上保护膜膜厚分布。由于镀膜机内部结构不易改变,这里重点考察蒸发舟的蒸发特性n对保护膜膜厚分布的影响<sup>[8]</sup>,考虑到对于面源蒸发源很难使n<1,计算1≤n≤4时,膜层的理论厚度分布结果如图2所示。定义膜厚不均匀性为

$$t_{n-u} \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\text{avg}}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中t<sub>max</sub>为膜厚最大值,t<sub>min</sub>为膜厚最小值,t<sub>avg</sub>为膜厚平均值。对图2中每个n值,计算球面基底膜厚分布的不均匀性,得到的结果如表1所示。

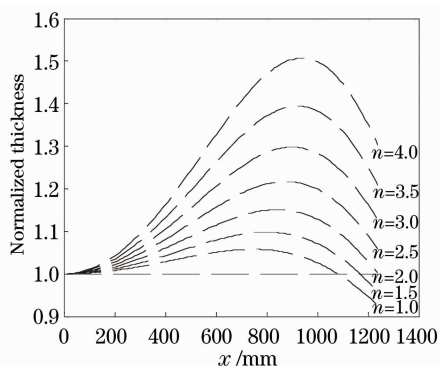


图2 蒸发舟不同的蒸发特性n对应球面基底的膜厚分布  
Fig.2 Thickness distribution on spherical substrate with different evaporation characteristics n

表 1 蒸发舟不同的蒸发特性  $n$  对应球面基底的膜厚不均匀性

Table 1 Non-uniformity of thickness on spherical substrate with different evaporation characteristics  $n$

$n$	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Non-uniformity / %	13.61	14.13	14.61	19.40	25.56	32.30	39.50

可见,当  $1 \leq n \leq 4$  时,蒸发特性  $n$  越小,膜厚不均匀性越小,当  $n=1$  时,膜厚不均匀性为 13.61%。使用两个宽度、深度不同的钼蒸发舟组合在一起,形成一套可以自上向下热蒸发介质的蒸发舟。两个蒸发舟同时加热,蒸发材料由下盖加热变成蒸气,然后经上盖加热从两侧向下蒸发,见图 3。ZZS3200 总共安装 3 组蒸发舟,安装半径同为 1080 mm,安装方向为沿径向方向,如图 1 中蒸发舟所示。对于每个舟,在径向方向上可近似看成两个较大的线蒸发源,使得蒸发舟在沿径向方向有更接近余弦发射体的蒸发特性,而在环绕轴旋转方向,则由主镜旋转来保证膜厚均匀性。经过测试,调节蒸发源电流以及预熔、蒸发时间,可以在不滴落、不喷溅的基础上,顺利热蒸发 SiO 和 MgF<sub>2</sub>。

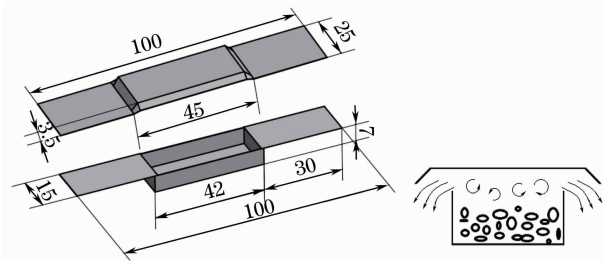


图 3 钼蒸发舟,左侧为三维立体图(单位: mm),右侧为蒸发舟工作原理

Fig. 3 Moly boat source. Left: 3D model (unit: mm), right: working principle of moly boat source

使用一组  $\Phi 50$  mm ZF7 光学玻璃,均匀放置在长 2400 mm 的平面工件架上,工件架旋转速率为 4 r/min,充氧 100 mL/min,真空度  $1.22 \times 10^{-2}$  Pa,镀制了一层 120 nm 厚的 SiO<sub>x</sub> ( $1 \leq x \leq 2$ ),由其光谱透射率反演得到膜层厚度,为与理论膜厚分布比较,将实

测数据归一化之后,结果如图 4 所示,沿直径方向膜厚均匀性与模拟结果基本一致。在边缘附近,数据有较大误差,由于 ZZS3200 镀膜机充氧管道出口口恰好位于真空室边缘处,高度与工件架接近,分析认为是由于充氧以后真空室内分子平均自由程过短引起膜层不够致密,导致在边缘处膜层吸收率增加,使得用光谱透射率反演得到的膜厚比实际值大。此外,在中心及边缘处薄膜的沉积角度变大,也对薄膜的膜层结构有一定的影响<sup>[9]</sup>,薄膜材料的折射率、吸收率与不同氧气氛围的关系,与位置的关系,需要进一步实验研究。

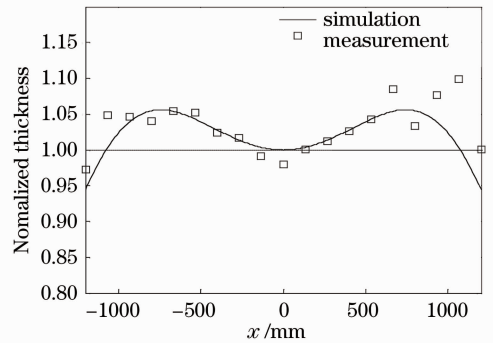


图 4 实测与模拟的保护膜膜厚径向分布  
Fig. 4 Thickness distributions of SiO<sub>x</sub> coatings by measurement and simulation

### 3 保护膜对反射率的影响

铝反射镜常用的保护膜材料有 SiO, SiO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 镀制单层保护膜时,选定某一参考波长  $\lambda_0$ ,镀制  $\lambda_0/2$  光学厚度的保护膜,由于干涉效应,在参考波长  $\lambda_0$  的整数倍处,膜系的反射率与纯铝膜的反射率相同,但在其他波长处,反射率则会显著下

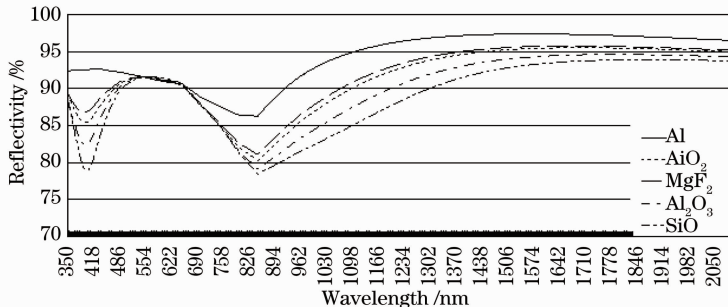


图 5  $\lambda_0 = 550$  nm,  $\lambda_0/2$  单层保护膜的铝反射膜反射率

Fig. 5 Reflectivity of Al coating with  $\lambda_0/2$  single protective layer when  $\lambda_0 = 550$  nm

降。图 5 为选择中心波长  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$  时,铝膜加镀单层  $\lambda_0/2$  保护膜后在  $350 \sim 2100 \text{ nm}$  波段内反射率的理论变化,这里假设铝膜足够厚,光学没有透过铝膜。

在图 5 中可以看出,当保护膜在  $\lambda_0$  处光学厚度为  $\lambda_0/2$  时,反射膜的反射率在  $\lambda_0$  处与裸铝膜一样,但在其他波长处,反射率比纯铝膜显著降低,并且降低幅度与保护膜材料的折射率有关,保护膜材料的折射率越大,则反射率减少越明显。由于  $\text{MgF}_2$  拥有这几种材料中最低的折射率,以  $\text{MgF}_2$  作为保护膜材料相比其他材料反射率的损失最少。如果需要提高反射率,可以为铝膜加镀 2 层  $\lambda_0/4$  的  $\text{MgF}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  介质膜。但是将对旧膜清洗带来更大的困难。

#### 4 带保护膜的铝反射膜脱膜实验及分析

对于铝膜保护膜材料, $\text{Al}_2\text{O}_3$  使用蒸发舟,易分解生成吸收膜,需要使用电子束热蒸发, $\text{SiO}_2$  加热,易分解成  $\text{SiO}$  和  $\text{O}_2$ ,常用的方法是在充氧氛围下蒸镀  $\text{SiO}$  得到  $\text{SiO}$  与  $\text{SiO}_2$  的混合层  $\text{SiO}_x (1 \leq x \leq 2)$ ,通过调节氧气的含量即可调节  $\text{SiO}_x$  的折射率,得到合适的保护膜。 $\text{MgF}_2$  常用作紫外铝反射镜保护膜<sup>[10]</sup>。考虑到 ZZS3200 镀膜机使用蒸发舟蒸镀介质保护膜,重点测试  $\text{SiO}_x$  与  $\text{MgF}_2$  保护膜的情况。

天文主镜每次重镀时,都需要将旧的膜层清洗掉。常用稀盐酸或热的强碱<sup>[11]</sup>作为铝膜的脱膜清洗液。保护膜需要选择可方便、快速洗掉旧膜的材料与工艺,减少主镜损伤。

使用不同工艺,镀制了一批直径 25 mm K9 玻璃、200 mm 平板窗玻璃、2400 mm 钢化玻璃的测试片,使用煮沸的水配置质量分数为 10% 的  $\text{NaOH}$  溶液,分别进行脱膜液冲洗实验,统计不同保护膜时膜层清洗时间,结果如图 6 所示。其中,当氧气量为 50 mL/min 时,清洗 140 nm 的  $\text{SiO}_x$  保护膜,多次补充热的脱膜液,使用脱脂棉纱布擦拭,清洗时间超过

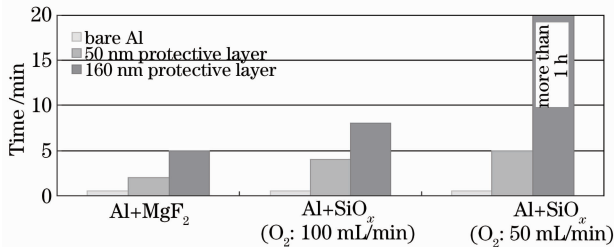


图 6 不同保护膜时膜层脱膜时间

Fig. 6 Time taken by removing Al coating with different protective layers

1 h, 仍不能将膜层完全洗掉,后来使用稀盐酸,对镜面进行清洗,20 min 以内,只能在镜面上腐蚀出类似“针孔”的一些斑点结构,使用稀盐酸超过 2 h,铝膜完全清除。如图 7 为刚使用稀盐酸后,腐蚀出的斑点结构。

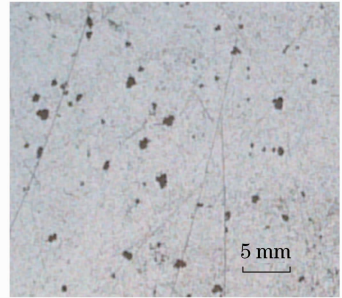


图 7 Al+140 nm 致密  $\text{SiO}_x$  脱膜

Fig. 7 Removing the Al+140 nm densified  $\text{SiO}_x$  film

分析其原因,室温下蒸镀的  $\text{MgF}_2$  保护膜是多孔结构<sup>[12]</sup>, $\text{NaOH}$  溶液可以通过保护膜的孔隙与铝膜发生反应,进而洗掉膜层。镀  $\text{SiO}_x$  时,不同充氧量有不同的膜层结构:充氧量为 100 mL/min,真空室内气压  $6.8 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,此时平均自由程小于蒸发源与镜面的距离,膜层分子与空气分子间发生碰撞,使得保护膜膜层疏松, $\text{NaOH}$  溶液可以与铝层接触,进而腐蚀掉反射膜;充氧量为 50 mL/min 时,平均自由程大于蒸发源与镜面的距离, $\text{SiO}_x$  保护膜致密, $\text{NaOH}$  溶液无法接触到铝膜,只有通过针孔渗透进入的脱膜液可以腐蚀掉针孔附近的铝膜,形成如图 7 中所示较大的斑点。对于致密  $\text{SiO}_x$  保护膜情况,可以使用稀盐酸,但是时间过长,考虑到盐酸具有挥发性,2.4 m 主镜侧面使用胶水粘有侧支撑的珉钢粘接块,为安全起见,最终没有采用稀盐酸作为脱膜清洗液。

使用  $\text{MgF}_2$  或过量氧气环境下蒸发的稀疏  $\text{SiO}_x$  做保护膜,保护效果不如致密  $\text{SiO}_x$ ,但是方便清洗,减少脱膜操作对主镜及粘接块的影响。考虑到  $\text{MgF}_2$  折射率  $\text{SiO}_x$  低,所以  $\text{MgF}_2$  更适于作为天文望远镜主镜的铝反射膜保护膜。

#### 5 2.4 m 望远镜主镜镀膜

2012 年 10 月,对 2.4 m 望远镜主镜进行镀膜,反射膜系为铝加  $\text{MgF}_2$ ,开镀前真空室真空度  $4.22 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ,铝膜厚度 130 nm,最大沉积速率为 6 nm/s, $\text{MgF}_2$  沉积速率为 0.3 nm/s,为了尽量减少保护膜对反射率的影响, $\text{MgF}_2$  厚度 33.2 nm。其陪镀片放置于半径 1310 mm 位置,使用 Lambda950 分光光度计测量光谱反射率,如图 8 所示,350 ~



1100 nm 波段范围内,平均反射率为87.16%,350~780 nm 波段范围内,平均反射率为 85.98%。主镜安装完成以后,2012 年 12 月 6 日测光夜,对 23.5

等的源 SDSSJ051358.52+264523.8 进行了观测,使用 r 波段,曝光 20 min,得到信噪比约为 3 的星像图,星象半宽 1.3",证明极限星等不低于 23.5 等。

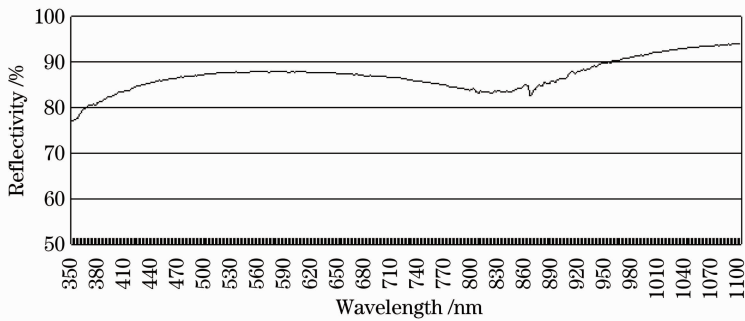


图 8 陪镀片反射率

Fig. 8 Reflectivity of witness sample

## 6 结 论

使用国内第一台自上向下蒸镀铝反射膜的大型镀膜机,根据保护膜膜厚分布的要求,设计出一种自上向下热蒸发保护膜,蒸发特性接近 1 的蒸发舟,膜厚不均匀性为 13.61%,使用 MgF<sub>2</sub> 做铝膜保护膜,可以在下次重镀时用质量分数为 10% 的热 NaOH 溶液快速洗掉旧铝膜。2012 年 10 月,完成国内单片主镜口径最大的丽江 2.4 m 望远镜主镜镀膜工作,采用了 MgF<sub>2</sub> 做为铝膜的保护膜,保护膜厚度 33.2 nm,陪镀片在 350~1100 nm 波段范围内平均反射率为 87.16%,实测 2.4 m 望远镜极限星等不低于 23.5 等。

## 参 考 文 献

- 1 Tong Jixiang. Urban air pollution status and characteristics in Yunnan Province[J]. Environmental Science Survey, 1990, (1): 25-29.  
童吉祥. 云南省城市大气污染状况及特点[J]. 环境科学导刊, 1990, (1): 25-29.
- 2 Pei Wenjun, Liu Hongxiang, Du Weichuan. Coating the 2 m level primary mirror with protected aluminum[C]. SPIE, 2012, 8415: 841517.
- 3 Bruce Atwood, Daniel Pappalardo, Thomas O'Brien, et al.. The aluminizing system for the 8.4 meter diameter LBT primary mirrors[C]. SPIE, 2006, 6273: 62730T.
- 4 D Clark, W Kindred, J T Williams. In-situ aluminization of the MMT 6.5 m primary mirror[C]. SPIE, 2006, 6273: 627305.
- 5 T Kurakami, M Yutani, T Kanzawa, et al.. Mirror coating 2003

- in SUBARU telescope[C]. SPIE, 2004, 5494: 574-585.
- 6 Gu Zhengtian, Liang Peihui, Zhang Weiqing. Influence of chemical cleaning on glass surface optical performance [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(3): 367-370.  
顾铮天, 梁培辉, 张伟清. 化学清洗对玻璃表面层光学特性的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(3): 367-370.
- 7 Ai Wanjun, Xiong Shengming. Analysis of film thickness uniformity for large aperture coater of 3.6 m in diameter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 73-78.  
艾万君, 熊胜明. 3.6 m 大口径镀膜机膜厚均匀性分析[J]. 光电工程, 2011, 38(11): 73-78.
- 8 Wang Ning, Shao Jianda, Yi Kui, et al.. Impact of evaporation characteristics of SiO<sub>2</sub> on uniformity of thin-film thickness[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2051-2056.  
王宁, 邵建达, 易葵, 等. SiO<sub>2</sub> 材料蒸发特性对膜厚均匀性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2051-2056.
- 9 Pan Yongqiang, Hang Lingxia. Optical properties and surface roughness of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by using oblique angle deposition[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0207001.  
潘永强, 杭凌侠. 斜角入射沉积 TiO<sub>2</sub> 薄膜的光学特性和表面粗糙度[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0207001.
- 10 Lin Dawei, Guo Chun, Zhang Yundong, et al.. Preparation on vacuum ultraviolet reflective aluminum films [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0231001.  
林大伟, 郭春, 张云洞, 等. 真空紫外波段铝反射膜制备[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0231001.
- 11 Takeshi Nouchi, Tomio Kanzawa, Tomio Kurakami, et al.. Coating and cleaning of SUBARU telescope mirrors[C]. SPIE, 2000, 4003: 391-395.
- 12 Zhong Disheng. Selection and Application of the Reference Vacuum Coating-Optical Materials [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. 162-165.  
钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2011. 162-165.

栏目编辑: 韩峰