

文章编号 1004-924X(2009)12-2952-07

# 应用 SiC 反射镜表面改性技术 提高 TMC 光学系统信噪比

陈红<sup>1</sup>, 王彤彤<sup>1</sup>, 高劲松<sup>1</sup>, 巩盾<sup>1,2</sup>, 王笑夷<sup>1</sup>, 郑宣鸣<sup>1</sup>, 申振峰<sup>1,2</sup>, 张忠玉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 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; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为了消除 SiC 反射镜的固有缺陷, 提高反射式光学系统的信噪比, 使用 SiC 表面改性技术对同轴三反射 (TMC) 光学系统的 SiC 反射镜进行了处理。首先, 应用等离子体辅助沉积 (PIAD) 技术沉积了一层 Si 改性层, 接着对改性层进行精密抛光, 然后在反射镜表面镀制 Ag 膜和增强膜, 最后获得了表面改性对 TMC 光学系统信噪比的影响。Wyko 轮廓仪测试表明, SiC 反射镜的粗糙度  $R_a$  由 10.42 nm 降低到了 0.95 nm; 镀制高反射膜后, 主镜、次镜、三镜及折叠镜在 0.5~0.8  $\mu\text{m}$  可见光波段的反射率 >98%。计算结果表明, 应用了表面改性技术后 TMC 反射式光学系统的信噪比提高了 5% 以上, 说明 SiC 表面改性技术是一种提高 TMC 光学系统信噪比的有效方法。

**关键词:** TMC 系统; 表面改性; SiC 反射镜; 信噪比

**中图分类号:** O484.4; TH703 **文献标识码:** A

## Improvement of signal noise ratio of TMC optical system by SiC surface modification technology

CHEN Hong<sup>1</sup>, WANG Tong-tong<sup>1</sup>, GAO Jin-song<sup>1</sup>, GONG Dun<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-yi<sup>1</sup>,  
ZHENG Xuan-ming<sup>1</sup>, SHEN Zhen-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhong-yu<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A SiC surface modification technique was applied to a TMC (Three Mirror Coaxis) reflective optical system to eliminate the intrinsic defects of SiC mirrors and to improve the Signal Noise Ratio (SNR) of the reflective optical system. Firstly, a Si layer as a modified coating was deposited on the SiC mirror surface. Then, a fine polish process was employed in the modified layer and the high reflective coatings composed of a silver film and enhancing films were deposited on the mirror surface. Finally, the effect of surface modification on the TMC reflective optical system was obtained. The measurement by a Wyko profilometer indicates that the roughness  $R_a$  of the SiC mirror is reduced from 10.42 nm to 0.95 nm and the reflectivities of the primary mirror, secondary mirror, tertiary mirror

收稿日期: 2009-04-22; 修订日期: 2009-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60478035)

and fold mirror are all higher than 98% between 0.5~0.8  $\mu\text{m}$ . Calculation results indicate that the SNR has improved more than 5% after surface modification, which proves that surface modification technique is an effective way to improve the SNR of a TMC reflective optical system.

**Key words:** TMC system; surface modification; SiC mirror; signal noise ratio

## 1 引 言

反射式光学系统是用于空间观测的常用光学系统之一,和透射式光学系统相比,反射式光学系统没有色散,避开了长焦距透射式光学系统的二级光谱校正问题,而且具有在空气环境和真空环境下焦面位置相同的性质,因此该类系统在地面条件下确定焦面后就可真空环境中使用<sup>[1-3]</sup>。

空间观测技术的飞速发展,使得大口径反射镜光学系统的需求日益迫切,反射镜作为反射式光学系统的核心部件,其物理性能和机械性能的要求越来越高。SiC 是一种性能优良的空间反射镜镜体材料,具有高比刚度、高热稳定性、高轻量化比、近净尺寸成型等诸多优点,因此引起了各国相关研究机构的高度关注,并取得了一系列的成果。但是 SiC 材料固有的缺陷,亦使得 SiC 镜体的表面存在孔洞或台阶状结构,从而造成了即使经过精密抛光,其表面的散射依然很严重的后果,即使镀制反射膜其反射率仍不高,难以满足可见光波段的需求。对于多次反射的反射式光学系统,还会出现系统能量降低的现象,对光学系统的信噪比有明显的影 响。SiC 表面改性技术是一种有效地消除 SiC 反射镜缺陷的技术<sup>[4-9]</sup>。现今,国际上通行的 SiC 表面改性技术是在 SiC 反射镜表面镀制一层性质接近于反射镜镜体材料的改性层(通常为 Si 或者 SiC),然后对改性层进行精密光学抛光,来获得超光滑的镜面。一般来说,改性层是具有一定厚度的致密膜层,可以覆盖在镜体表面修复存在缺陷的镜体;另外,改性层具有更好的抛光特性,易于获得均匀且粗糙度小的镜面;而且,粗糙度的改善可以提高反射率。由于反射式光学系统的信噪比和反射率有直接的关系,因此应用该技术后,可以显著地提高反射式光学系统的信噪比。

## 2 光学系统设计

本文设计的是一个同轴三反(TMC)光学系统,其光谱为 0.5~0.8  $\mu\text{m}$ ;地面像元分辨率  $\leq 1.0$  m(500 km 轨道高度);相机视场角  $\geq 2^\circ$ ;光学设计传递函数(MTF)  $\geq 0.45$ (奈奎斯特频率)。像面上所成的像是一条窄长的像面,因此可以用轴外的一条窄长的像面,以使 TMC 光学系统避免二次遮拦。利用 3 个面的非球面系数可以校正球差、慧差和像散,合理分配 3 个反射镜的曲率半径校正场曲。同卡塞格林系统相比,TMC 系统的视场大,中心遮拦小,可以取更小的相对孔径,而且系统总长度较小,在这方面 TMC 系统有明显优势。对于具体的计算方法,本文不做过多的阐述,这里只给出最后的设计结果。

表 1 是使用 CODE V 进行光学系统设计的最终结果,光学系统包括了主镜、次镜、三镜和折叠镜 4 块反射镜,其中折叠镜除了折叠光路外,还具有调焦的功能。

表 1 TMC 光学系统的设计参数

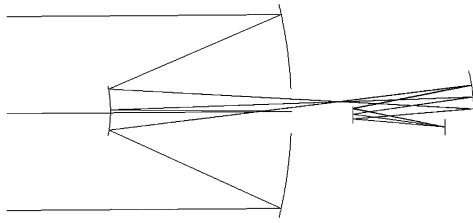
Tab.1 Parameters of TMC optical system

	曲率半径	距离	非球面系数	尺寸
主镜	-1134.65	-448.36	-0.9721	$\varphi 520$
次镜	-300.5	900	-2.082 9	$\varphi 118$
三镜	-405.34	-300	-0.539	106×50
折叠镜	Infinity	228.19	平面	40×20
系统焦距	4375		F#	-9.1146
视场角	$2T_x$	$2^\circ$	$T_y$	$0.5^\circ$

图 1(a),(b)分别是设计的 TMC 系统的 2D 和 3D 光路图。

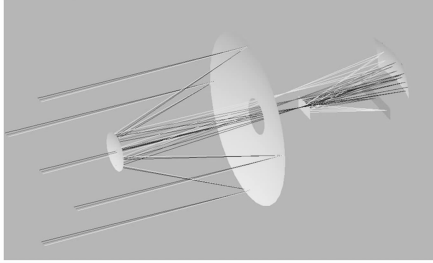
光学系统的 4 块反射镜全部使用 SiC 材料,成像部分选用 DALSA 公司的型号为 IT-EB-4096 的 TDI CCD。

图 2 是 TMC 光学系统的 MTF 结果,该结果表明在奈奎斯特频率处,TMC 系统的 MTF >



(a) TMC 光学系统的 2D 光路图

(a) 2D optical path of TMC optical system



(b) TMC 光学系统的 3D 光路图

(b) 3D optical path of TMC optical system

图 1 TMC 光学系统的光路图

Fig. 1 Optical paths of TMC optical system

0.55, 高于设计要求的 0.45。因此该 TMC 系统在光学设计上符合设计的要求, 而且具有紧凑的系统结构。反射镜镜体材料全部选择了 SiC, 在具有良好物理性能的同时, 通过轻量化技术可以有效地降低光学系统的总重。

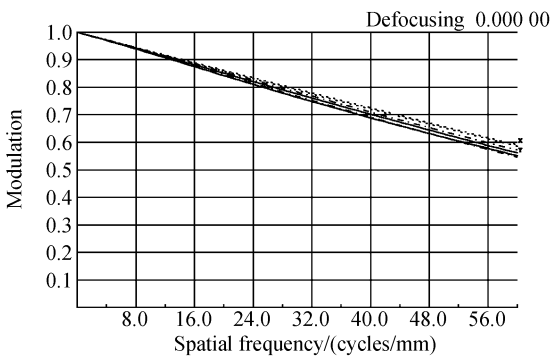


图 2 TMC 光学系统的 MTF

Fig. 2 MTF of TMC optical system

### 3 SiC 反射镜表面改性

SiC 镜体材料根据制备方法的不同, 通常可以分为反应烧结碳化硅 (Reaction Bonded Silicon Carbide, RB-SiC), 常压烧结碳化硅 (Sintered Sili-

con Carbide, S-SiC), 热压碳化硅 (Hot-Pressed Silicon Carbide, HP-SiC) 等, 本文选用的 SiC 镜体材料为 RB-SiC。但无论采用何种方法制备的 SiC 反射镜镜体, 由于其固有的缺陷, 镜体表面在进行了精密抛光后依然有微观缺陷的存在。RB-SiC 主要的缺陷是由于反射镜表面的 SiC 和 Si 的金属二相性导致的表面散射。图 3 是未改性抛光后光入射到 RB-SiC 反射镜表面时的示意图。

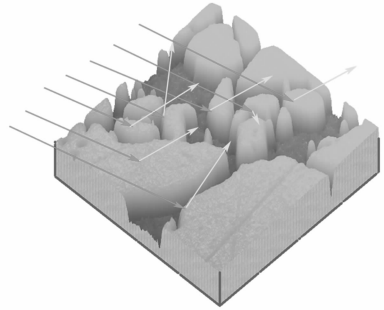


图 3 光入射到 RB-SiC 表面时的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of incident light on RB-SiC surface

从图 3 中可以看出, 由于金属二相性, 使得 RB-SiC 镜体表面在抛光时的 SiC 和 Si 的去除速率不同, 导致了抛光后在表面形成了许多台阶状的缺陷。根据标量散射理论<sup>[10-11]</sup>, 光在入射到粗糙的表面时会发生散射, 散射的大小和粗糙度的平方成正比, 降低光学系统的信噪比, 进而影响成像质量。因此, 必须对 SiC 反射镜进行表面改性。

RB-SiC 反射镜表面改性的流程如图 4 所示。

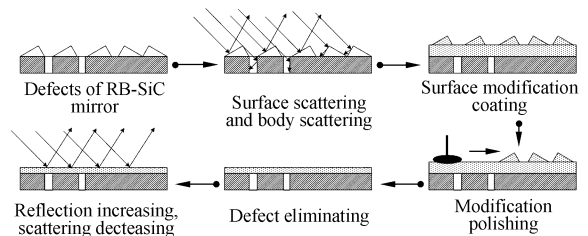


图 4 SiC 反射镜表面改性流程图

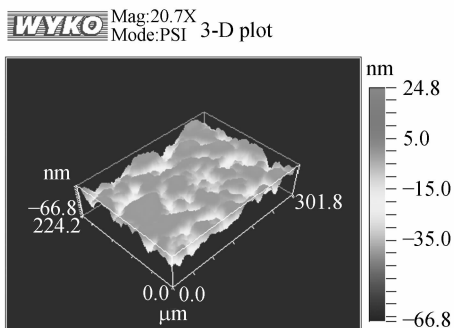
Fig. 4 Flow chart of surface modification of SiC mirror

图 4 的流程图说明了由于反射镜表面缺陷的存在导致了在未进行表面改性之前, 入射到 SiC 反射镜表面的光会因为散射造成损失。镀制一层和反射镜基底性质类似, 具有一定厚度, 和基底结

合牢固,并且具有良好抛光特性的改性层后,对其进行抛光,可以获得低粗糙度的超光滑表面,消除固有缺陷带来的负面影响。

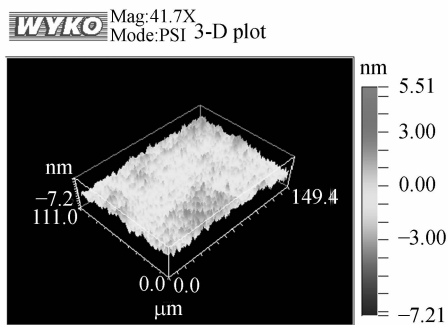
本文改性的方法是使用 PIAD 工艺镀制 Si 改性层,这种方法由于在成膜的过程中引入了等离子体辅助成膜,因此可以在较低的温度下获得近体材料特性的 Si 改性膜层。

图 5(a),(b)分别是使用 Wyko 轮廓仪测试的改性前抛光和改性后抛光的结果。



(a) 未改性抛光的 RB-SiC 反射镜表面

(a) Surface profile of RB-SiC mirror without modification after polishing



(b) 改性抛光的 RB-SiC 反射镜表面

(b) Surface profile of RB-SiC mirror with modification after polishing

图 5 抛光的 RB-SiC 反射镜表面

Fig. 5 Surface profiles of RB-SiC after polishing

在图 5(a)中可以清楚地观察到未改性之前抛光后的 RB-SiC 表面因为 Si 和 SiC 两相同时存在,导致抛光后的表面凹凸不平,存在明显的台阶状缺陷。图 5(b)的结果则表明在改性抛光后的 RB-SiC 表面的台阶状缺陷已经得到消除,证明了表面改性技术可以有效地消除 SiC 镜体的固有缺陷。

表 2 是改性前后 Wyko 轮廓仪测量的粗糙度测量结果。经过对比,在改性抛光后, RB-SiC 镜体表面的粗糙度降低了一个数量级,因此 RB-SiC 镜体表面的台阶状缺陷是影响粗糙度的主要因素,表面改性抛光后,光入射到表面时,散射降低,反射效率提高。

表 2 改性前后 RB-SiC 反射镜抛光的粗糙度测量结果

Tab. 2 Roughness results of polished RB-SiC before and after surface modification

	$R_a$	$R_q$	$R_z$	$R_t$
改性前抛光/nm	10.42	12.89	76.07	91.55
改性后抛光/nm	0.95	1.18	8.96	12.72

图 6 是同一镀膜过程中,在改性前后抛光的 RB-SiC 反射镜表面镀制 Ag 膜增强膜的测试结果。膜系结构为:基底/Ag(120 nm)/ $Al_2O_3$ (40 nm)/ $SiO_2$ (140 nm)|空气。使用 e 型电子枪蒸发的方法沉积薄膜,膜层厚度由 INFICON 公司生产的 IC5 型晶体膜厚控制仪监控。

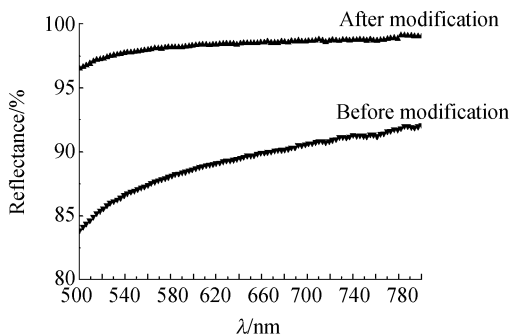


图 6 改性前后抛光的 RB-SiC 反射镜镀制 Ag 膜增强膜的测试结果

Fig. 6 Test results of polished RB-SiC mirrors before and after surface modification coated with Ag and enhanced films

测试使用的是 Lambda 900 UV/Vis/NIR 分光光度计。

反射率的大小对光学系统的性能有直接的影响。测量结果表明在  $0.5 \sim 0.8 \mu m$  的可见光波段改性后的反射率  $> 98\%$ ,而没有改性之前的反射率只有  $90\%$  左右。这说明了在镀制相同的反射膜时,反射率的高低和反射镜表面的粗糙程度

有直接关系。

## 4 信噪比的影响

信噪比反映了遥感相机对辐射能量的探测能力,信噪比是由输入信号的强弱,即太阳天顶角、地面反照率、TDI 积分级数等参数决定的。

CCD 输出图像的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 定义为:

$$\text{SNR} = \frac{S_e}{N_e} = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + \sigma_R^2 + D_e}}, \quad (1)$$

其中,  $S_e$  为信号电子数;  $\sigma_R$  为 CCD 读出噪声均方根电子数;  $D_e$  为暗电流电子数。

由信号电压和电荷转换效率 (Charge Conversion Efficiency, CCE) 可以计算得到信号电子数  $S_e$ , 即

$$S_e = \frac{S}{\text{CCE}}. \quad (2)$$

对于选定的 CCD,  $\text{CCE} = 12 \text{ V/e}^-$ ,  $\sigma_R = 51\text{e}^-$ ,  $D_e = 1120\text{e}^-$ , 因此要求得信噪比, 只需要求得信号输出电压  $S$  即可。

信号输出电压  $S$  定义为:

$$S = \overline{\tau_a}(\lambda) \cdot \overline{\tau_o}(\lambda) \cdot M \cdot t_{\text{int}} \cdot \Delta\lambda \cdot \overline{L}(\lambda) \cdot C \cdot \frac{\pi A_d}{4F^2} / A_d = \overline{\tau_a}(\lambda) \cdot \overline{\tau_o}(\lambda) \cdot M \cdot t_{\text{int}} \cdot \Delta\lambda \cdot \overline{L}(\lambda) \cdot C \cdot \frac{\pi}{4F^2}, \quad (3)$$

式中,  $\overline{\tau_a}(\lambda)$  为大气平均透过率;  $\overline{\tau_o}(\lambda)$  为光学系统的透过率;  $M$  为积分级次;  $t_{\text{int}}$  为积分时间;  $\Delta\lambda$  为成像波段;  $\overline{L}(\lambda)$  为地面平均光谱辐亮度;  $C$  为 CCD 响应度;  $F$  为  $F^\#$ 。

对于给定的光学系统, 选定 CCD 后, 式(3)的各个参数就可以确定。反射式系统中的  $\overline{\tau_o}(\lambda)$  指

的是经过多次反射后反射率的变化, 可以表示为:

$$\overline{\tau_o}(\lambda) = R^n. \quad (4)$$

在 TMC 光学系统中光要反射 4 次, 即  $n=4$ 。 $\overline{\tau_o}(\lambda)$  为大气平均透过率, 取 0.65;  $M$  为 TDI CCD 的积分级次, 取 96;  $\Delta\lambda$  为系统的成像的波段范围, 为  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ , 故  $\Delta\lambda$  取  $0.3 \mu\text{m}$ ;  $t_{\text{int}}$  为 CCD 的积分时间, 当轨道高度为 500 km 时,  $t_{\text{int}} = 0.142 \text{ ms}$ ;  $C$  为 TDI CCD 的响应度, 在 96 级工作时为  $750 \text{ V}(\mu\text{J}/\text{cm}^2)$ ;  $\overline{L}(\lambda)$  为地面的平均光谱辐亮度。现取太阳天顶角为  $60^\circ$ , 地面反照率为 0.2 时的光谱辐亮度来计算信噪比。此时的地面平均辐亮度  $\overline{L} = 5 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。把这些参数带入式(2)和式(3)即可计算出反射率对信噪比的影响。

根据前面实测的改性前后抛光的 RB-SiC 反射镜镀制 Ag 膜加增强膜的结果, 代入式(1)、式(2)和式(3)进行计算, 最后得到改性后的信噪比提高了 5% 以上。

## 5 结 论

TMC 光学系统的信噪比和反射镜的反射率有直接关系。采用 RB-SiC 材料制作的反射镜虽然有许多优点, 但是在直接镀制反射膜后, 反射率较低, 不能满足可见光波段的使用要求。SiC 表面改性技术是一种可以消除 RB-SiC 反射镜表面缺陷的有效方法, 改性抛光后粗糙度  $R_a$  降低到 0.95 nm, 在  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  可见光波段, 镀制 Ag 膜加增强膜后反射率  $> 98\%$ , TMC 光学系统的信噪比较改性之前提高了 5% 以上。因此, 对于使用 SiC 反射镜的光学系统, 表面改性技术是一种提高光学系统性能的有效手段。

## 参考文献:

[1] HOWARD J M, STONE B D. Image with three spherical mirrors [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (19): 3236-3231.

[2] 吴煜, 薛鸣球. 长焦距反射式光学系统研究[J]. 光学学报, 1991, 11(9): 646-650.

WU Y, XUE M Q. Study of long focal length all reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(9): 646-650. (in Chinese)

[3] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系

统设计[J]. 光学精密工程,2001,9(4):315-318.

CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*.

Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(4):315-318. (in Chinese)

[4] ROBERT S B, REGINA G S, JOHN J G. Optical surfacing of one-meter class reaction-bonded silicon carbide [J]. *SPIE*, 1995,2453:248-253.

[5] STEVE J. SiC coatings on RB SiC mirrors for ultra-smooth surfaces [J]. *SPIE*, 1993,2018:237-247.

[6] 王彤彤,高劲松,王笑夷,等. 反应烧结碳化硅表面改性的初步研究 [J]. 光学精密工程,2008,16(9):1603-1607.

WANG T T, GAO J S, WANG X Y, *et al.*. Preliminary study of reaction bonded silicon carbide surface modification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1603-1607. (in Chinese)

[7] 高劲松,王彤彤,王笑夷,等. 霍尔离子源辅助制备碳化硅改性薄膜[J]. 红外与激光工程,2008,37(4):710-713.

GAO J S, WANG T T, WANG X Y, *et al.*. Prepara-

tion of silicon carbide surface modified coatings with end-hall ion source assisted [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,37(4):710-713. (in Chinese)

[8] 陈红,高劲松,宋琦,等. 离子辅助制备碳化硅改性薄膜[J]. 光学精密工程,2008,16(3):381-385.

CHEN H, GAO J S, SONG Q, *et al.*. Si modified coating on SiC substrate by ion beam assisted deposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):381-385. (in Chinese)

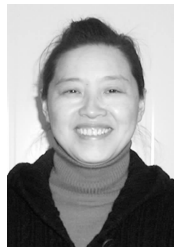
[9] 高明辉,刘磊,任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1170-1174.

GAO M H, LIU L, REN J Y. Characteristic test of SiC for space camera's mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1170-1174.

[10] BECKMANN P, SPIZZICHINO A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* [M]. New York: Pergamon, 1963:17-97.

[11] CHURCH E L, TAKACS P Z, LEONARD T A. The prediction of BRDF's from surface profile measurements[J]. *SPIE*, 1989,749:136-150.

#### 作者简介:



陈 红(1965—),女,吉林长春人,副研究员,主要研究方向为光学薄膜的理论研究和制备。E-mail: chen\_hong\_1968@hotmail.com



王彤彤(1979—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2002年于延边大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光学薄膜的理论研究和制备。E-mail: wangttbox@hotmail.com



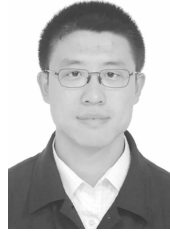
高劲松(1968—),男,吉林白城人,博士,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光学薄膜的前沿研究以及特种光学薄膜的制备方法。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn



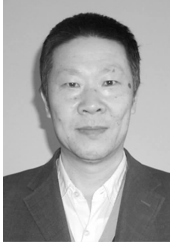
巩 盾(1982—),男,汉族,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学设计和温度对空间光学系统的影响与像质评价方面的研究。E-mail: gongdun@sina.com



王笑夷(1977—),男,辽宁鞍山人,助理研究员,1999年,2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学薄膜理论和制备方面的研究. E-mail: wangxiaoyi1977@sina.com.cn



申振峰(1977—),男,吉林人,博士研究生,2000年于东北师范大学获得学士学位,主要从事光学薄膜理论和制备以及SiC表面改性方面的研究. E-mail: zf\_shen@163.com.cn



郑宣鸣(1958—),男,四川梓潼人,副研究员,1982年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为光学薄膜的理论和制备. E-mail: zhengxmciomp@126.com.cn

通信作者:



张忠玉(1964—),男,吉林集安人,研究员,1988年于武汉测绘科技大学获得学士学位,主要研究方向为光学超精密加工与检测. E-mail: zhangzy5598@yahoo.com.cn

## ●下期预告

# SX-700 单色器光栅正弦机构数值模拟分析与实测结果

吴 坤<sup>1,2</sup>, 薛 松<sup>1</sup>, 卢启鹏<sup>3</sup>, 彭忠琦<sup>3</sup>, 陈家华<sup>1</sup>, 刘 楷<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

为上海光源(SSRF)研制的国内首台SX-700单色器,其主要设计指标波长扫描转角重复精度要求优于 $0.43''$ 。光栅正弦机构是其重要的波长扫描组件,本文详细介绍了该光栅正弦机构的转角精度误差来源。单色器结构设计时,运用有限元分析软件ANSYS对光栅正弦机构进行数值模拟计算,并根据模拟结果对光栅正弦机构的转角重复精度进行了误差分析,得到转角重复精度为 $0.28''$ ,依据分析结果制定了工程设计方案。2008年10月份单色器加工完成运抵上海光源实验大厅,利用本文建立的一套由光电自准直仪组成的测试系统对光栅正弦机构的转角重复精度进行测试,最终实测精度为 $0.15''$ 。结果表明:SSRF, SX-700单色器光栅正弦机构的转角重复精度满足设计要求。