

## 星间通信系统高精度分光镜的研制

王振宇 付秀华 林兆文 黄健山 魏雨君 吴桂青 潘永刚 董所涛 王奔

### Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system

WANG Zhen-yu, FU Xiu-hua, LIN Zhao-wen, HUANG Jian-shan, WEI Yu-jun, WU Gui-qing, PAN Yong-gang, DONG Suo-tao, WANG Ben

引用本文:

王振宇, 付秀华, 林兆文, 黄健山, 魏雨君, 吴桂青, 潘永刚, 董所涛, 王奔. 星间通信系统高精度分光镜的研制[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 334–341. doi: 10.37188/CO.2023–0100

WANG Zhen-yu, FU Xiu-hua, LIN Zhao-wen, HUANG Jian-shan, WEI Yu-jun, WU Gui-qing, PAN Yong-gang, DONG Suo-tao, WANG Ben. Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 334–341. doi: 10.37188/CO.2023–0100

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0100>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 星间激光通信终端光学天线的隔离度

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 462 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0462>

#### 二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术

Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 644 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644>

#### 双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

#### 高精度连续变倍率激光扩束系统设计

Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 693 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0693>

#### 星载激光通信技术研究进展

Progress of research on satellite-borne laser communication technology

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1260 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1260>

#### 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术

Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 486 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0486>

文章编号 2097-1842(2024)02-0334-08

## 星间通信系统高精度分光镜的研制

王振宇<sup>1,2</sup>, 付秀华<sup>1,2\*</sup>, 林兆文<sup>2,3</sup>, 黄健山<sup>3</sup>, 魏雨君<sup>1,2</sup>, 吴桂青<sup>3</sup>, 潘永刚<sup>2,3</sup>, 董所涛<sup>2</sup>, 王奔<sup>2,3</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林长春 130022;

2. 长春理工大学中山研究院, 广东中山 528437;

3. 中山吉联光电科技有限公司, 广东中山 528437)

**摘要:**随着星间通信系统的迅速发展,数据传输的精度要求不断提高。分光镜作为系统的核心元件,其光谱特性和面形精度直接影响整个系统的传输精度。本文基于薄膜干涉理论,选取 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 作为高低折射率膜层材料进行膜系设计,采用电子束蒸发的方式在石英基板上制备高精度分光镜。同时根据膜层应力补偿原理建立面形修正模型,修正分光镜面形。光谱分析仪检测结果显示,分光镜在入射角度为 21.5°~23.5°内,1563 nm 透过率大于 98%,1540 nm 反射率大于 99%。激光干涉仪检测结果显示,分光镜反射面形精度 RMS 由  $\lambda/10$  修正至  $\lambda/90$  ( $\lambda=632.8$  nm),透过面形精度 RMS 为  $\lambda/90$ 。

**关键词:**星间通信;分光镜;应力补偿;面形精度

中图分类号:O484

文献标志码:A

doi: 10.37188/CO.2023-0100

## Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system

WANG Zhen-yu<sup>1,2</sup>, FU Xiu-hua<sup>1,2\*</sup>, LIN Zhao-wen<sup>2,3</sup>, HUANG Jian-shan<sup>3</sup>, WEI Yu-jun<sup>1,2</sup>,

WU Gui-qing<sup>3</sup>, PAN Yong-gang<sup>2,3</sup>, DONG Suo-tao<sup>2</sup>, WANG Ben<sup>2,3</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China;

3. Zhongshan Jilion Optoelectronics Technology Co., Ltd., Zhongshan 528437, China)

\* Corresponding author, E-mail: goptics@126.com

**Abstract:** With the rapid development of inter-satellite communication systems, the requirements for data transmission accuracy are constantly increasing. As the core component, the spectral characteristics and surface shape accuracy of the beam splitter directly affect the transmission accuracy of the whole system. Ac-

收稿日期:2023-06-09; 修订日期:2023-07-06

基金项目:2022年度中山市第二批社会公益与基础研究项目(No. 2022B2005);长春市激光制造与检测装备科技创新中心资助项目(No.2014219)

Supported by the Second Batch of Social Welfare and Basic Research Projects in Zhongshan City in 2022 (No. 2022B2005); Changchun Laser Manufacturing and Testing Equipment Science and Technology Innovation Center Project (No. 2014219)

cording to the interference theory of thin film,  $Ta_2O_5$  and  $SiO_2$  were selected as the high and low refractive index film materials for the design of the film system, and electron beam evaporation was used to prepare a high-precision beam splitter on a quartz substrate. At the same time, a surface shape correction model was established based on the principle of film stress compensation to control the surface shape. Through the detection of a spectral analyzer, it can be seen that the transmittance of beam splitter is greater than 98% at 1563 nm and the reflectance is greater than 99% at 1540 nm within the incidence range of  $21.5^\circ$  to  $23.5^\circ$ . The surface shape was measured by laser interferometer, it can be seen that the reflective surface shape accuracy RMS is corrected from  $\lambda/10$  to  $\lambda/90$  ( $\lambda=632.8$  nm), and the transmissive optical surface shape accuracy RMS is  $\lambda/90$ .

**Key words:** inter-satellite communication; beam splitter; stress compensation; surface accuracy

## 1 引言

低轨道卫星具有传输延迟小、通信容量大和覆盖面积广等特点,因此受到各国的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。目前,美、欧、日、俄及中国等多个国家都在积极发展星间通信技术<sup>[3-5]</sup>,以占领有限的近地卫星轨道,满足通信需求。随着该技术的飞速发展,数据传输精度要求不断提高,因此对核心元件的光谱性能和面形精度提出了更高的要求。

本文针对星间通信系统中的核心元件—分光镜进行研制,其作用是对 1540 nm 和 1563 nm 两个波长的信号光进行分束。目前对于该光学元件的光谱性能的研究已经较为成熟,难点在于解决光学元件因薄膜应力产生面形偏差<sup>[6-7]</sup>这一问题。近年来,李波<sup>[8]</sup>通过调整工艺参数控制薄膜应力的方法来调控面形,李阳<sup>[9]</sup>使用有限元分析法得出应力较小的膜系结构,从而调控面形,白金林<sup>[10]</sup>通过建模预测薄膜应力对基底造成的形变量,然后对基底预加工与形变方向相反面形的方法来调控面形。但薄膜应力成因复杂,模型多样繁琐<sup>[11]</sup>,计算量庞大,上述方法制备光学元件所能达到的面形精度有限。

本文通过沉积与基底相同的材料,利用其应力来修正面形。通过拟合实验数据,建立面形修正模型以计算所需沉积的膜层厚度。相关资料显示,关于星间通信系统中高精度分光镜的研究鲜有报道,本文重点研究分光镜的光谱和面形修正方法,解决高精度通信传输的难题。

## 2 膜系结构与面形修正方案

### 2.1 膜系结构设计

针对分光镜指标要求,综合考虑材料的光学性能和机械性能,选择  $Ta_2O_5$  与  $SiO_2$  作为薄膜材料<sup>[12]</sup>,基底为石英基底,尺寸为  $\Phi 26$  mm $\times$ 5 mm。

1563 nm 与 1540 nm 两波长相差仅 23 nm,其中 1540 nm 为高反射波长,1563 nm 为高透射波长。通过比较干涉截止滤光膜和窄带滤光膜两种方案,结合真空镀膜设备的控制精度,选择沉积多腔窄带滤光膜实现 1563 nm 与 1540 nm 两束信号光的分束。模拟分析了  $Ta_2O_5$ 、 $SiO_2$  分别作为间隔层,对膜系光谱陡度、半宽度以及矩形度的影响。最终选择  $Ta_2O_5$  作为间隔层,这样可以增加透射区的光谱宽度,减少制备难度。设计的膜系结构为: Sub/(HL)<sup>2</sup> 2H(LH)<sup>2</sup> L(HL)<sup>3</sup> 4H(LH)<sup>3</sup> L(HL) <sup>3</sup> 6H (LH)<sup>3</sup> L (HL)<sup>3</sup> 6H (LH)<sup>3</sup> L (HL)<sup>3</sup> 4H (LH)<sup>3</sup> L(HL)<sup>2</sup> 2H LHL 0.70H0.79L/Air。中心波长  $\lambda$  为 1600 nm, H 层代表  $Ta_2O_5$ ,厚度为  $\lambda/4$ , L 层代表  $SiO_2$ ,厚度为  $\lambda/4$ , Sub 为石英基底, Air 为空气,入射角度为  $22.5^\circ$ ,设计的分光膜总厚度为 22.14  $\mu$ m,图 1 为分光膜理论光谱透过率曲线。

为提高 1563 nm 处的透过率,在分光镜后表面沉积了 1563 nm 的增透膜,膜系为 Sub/0.32H0.35L1.87H0.96L/Air,增透膜总厚度为 750 nm,中心波长为 1600 nm,图 2 为分光镜双面理论光谱透过率曲线,可见,在入射角度为  $21.5^\circ\sim 23.5^\circ$  时均满足要求。

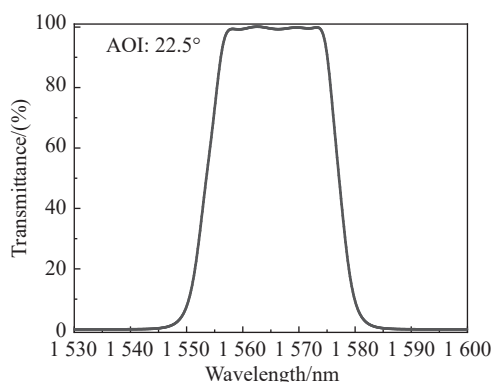


图 1 分光膜理论光谱透过率曲线

Fig. 1 Theoretical spectra transmittance curve of the splitter film

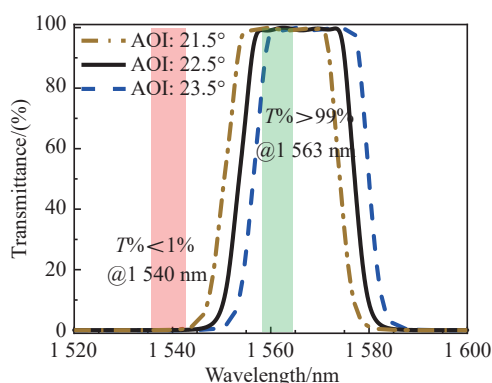


图 2 分光镜双面理论光谱透过率曲线

Fig. 2 Double sided theoretical spectra transmittance curve of the beam splitter mirror

## 2.2 面形修正方案

由以上设计可知,分光镜的两表面设计膜厚度超过  $20\ \mu\text{m}$ ,较大的薄膜应力会导致分光镜的反射波前出现面形偏差,影响光的传输精度,因此需要对分光镜进行面形修正。

### 2.2.1 应力补偿模型的建立

薄膜沉积过程中会产生薄膜应力<sup>[13]</sup>,若按照薄膜应力对基底造成的形变方向来区分,薄膜应力分为压应力和张应力。当薄膜应力为张应力时,将使基底变凹,如图 3(a)所示;当薄膜应力为压应力时,将使基底凸起,如图 3(b)所示。

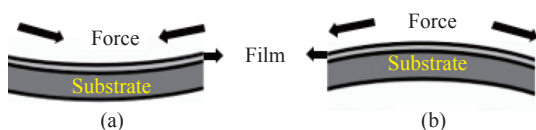


图 3 薄膜应力图。(a)张应力;(b)压应力

Fig. 3 Thin film stress maps. (a) Tensile stress; (b) compressive stress

在分光镜表面沉积分光膜后,应力导致反射波前产生面形偏差,图 4(彩图见期刊电子版)为未镀膜的基底反射波前示意图,红色虚线为理想状态的参考波前。PV 为波前最高点与最低点的间距,波前 RMS 可以表示为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i - W_{\text{avg}})^2} \quad (1)$$

其中, $n$  为采样点数, $W_i$  为每个采样点的波前, $W_{\text{avg}}$  为参考波前,即所有采样点的波前平均值。图 5(彩图见期刊电子版)为沉积分光膜和增透膜后发生形变的基底波前矢高与曲率半径示意图,绿色虚线为波前拟合球面。

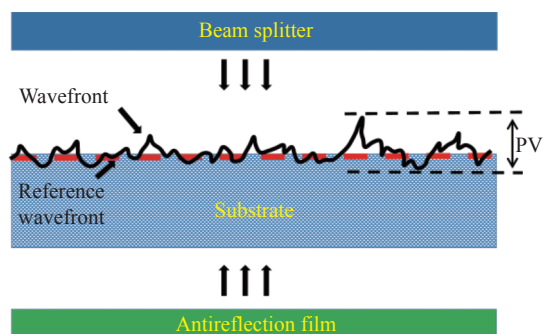


图 4 基底的反射波前示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reflection wavefront of the substrate

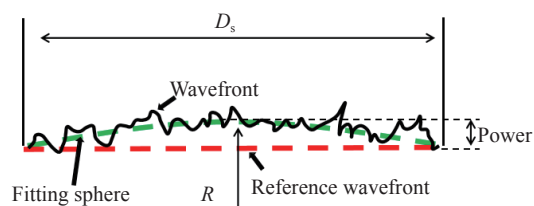


图 5 基底的矢高值与曲率半径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the Power and curvature radius of the substrate

图 5 中,Power 为波前拟合球面的矢高值, $D_s$  为直径, $R$  为曲率半径。

计算薄膜应力时,通常将所测得的基底镀膜前后的曲率变化代入 Stoney 公式<sup>[14]</sup>,从而求出膜层的应力值。由图 5 可得以下几何关系式:

$$R^2 = (R - \text{Power})^2 + \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \quad (2)$$

通常平板分光镜的 Power 远远小于直径  $D_s$ ,

可以舍弃高阶 Power<sup>2</sup> 项,则 Stoney 公式变为:

$$\sigma = \frac{4E_s}{3(1-r_s)} \frac{t_s^2 \Delta power}{t_f D_s^2} \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为薄膜应力,  $E_s$  为基底杨氏模量,  $r_s$  为基底泊松比,  $t_s$  与  $t_f$  分别为基底的厚度与膜层的厚度,  $\Delta power$  为基底沉积膜层前后 Power 的差值。

本文使用 G150-QCL 激光干涉仪进行面形检测。检测样品基底的反射面形精度 RMS 为  $\lambda/90 \sim \lambda/100$ , Power 为  $-0.005\lambda \sim -0.009\lambda$ , 通过公式(3)可求得分光膜的膜层应力为  $-60.50$  MPa, 呈现压应力。考虑到基底为石英,其主要成分为 SiO<sub>2</sub>, 故在基底表面沉积单层 SiO<sub>2</sub> 不会影响光谱, 而且检测电子束沉积的 SiO<sub>2</sub> 薄膜知, 膜层为压应力<sup>[15]</sup>, 因此选择 SiO<sub>2</sub> 对分光镜进行面形修正。

Power 表示弯曲程度以及方向, 当基底向上凸时, Power 为负值, 当基底向下凹时, Power 为正值, 参考 Power 进行面形修正。通过沉积 SiO<sub>2</sub> 修正的 Power 可表示为:

$$P = P_B + P_A \quad (4)$$

式中, Power 的取值始终以分光膜面为准,  $P$  为所需修正的 Power,  $P_B$  为基底沉积分光膜后的 Power(膜层呈张应力时符号为正, 呈压应力时符号为负),  $P_A$  为沉积增透膜对 Power 的改变量。由此可建立面形修正模型:

$$H_s = \frac{P_B + P_A}{A} \quad (5)$$

式中:  $H_s$  为应补偿的 SiO<sub>2</sub> 厚度,  $A$  为 SiO<sub>2</sub> 对基底 Power 的修正系数, 单位为  $\Delta\lambda/100$  nm, 由于不同工艺沉积的薄膜应力不同, 分光镜两面膜系的工艺参数有一定差异, 本模型不考虑分光膜以及增透膜的沉积工艺参数, 仅考虑用于修正面形的 SiO<sub>2</sub> 的工艺参数。

由式(3)可以得出:

$$\Delta power = \frac{3(1-r_s)}{4E_s} \frac{D_s^2}{t_s^2} t_f \sigma \quad (6)$$

通过式(6)可以得出在相同材质不同径厚比的基底上沉积相同膜层时, 基底 Power 的改变量和基底径厚比的平方呈正比关系。公式(5)计算

的是径厚比为 5.2 的基底需要修正的 SiO<sub>2</sub> 厚度, 当计算其他径厚比的石英基底所需修正的 SiO<sub>2</sub> 厚度时, 可通过式(7)进行计算:

$$H_s = \frac{27.04(P_B + P_A)}{A\beta^2} \quad (7)$$

其中,  $P_B$  为所需修正基底沉积分光膜后的 Power,  $P_A$  为沉积增透膜后所需修正基底 Power 的改变量,  $\beta$  为所需修正基底的径厚比。对于其他径厚比 SiO<sub>2</sub> 厚度的修正, 该公式也具有一定的指导价值。

### 2.2.2 A 值与 P<sub>A</sub> 取值实验流程

公式(5)的修正误差来源于 A 值与 P<sub>A</sub> 值的取值准确度, 具体取值的实验流程为: ①在 4 片具有相同面形精度的基底上沉积分光膜, 将样片编号为 1#、2#、3#、4#, 分别进行面形检测。②在 1#样片分光膜的另一面沉积增透膜, 进行面形检测, 计算出增透膜对 Power 的改变量, 即 P<sub>A</sub>。③在 2#样片分光膜的另一面依次沉积一定厚度的 SiO<sub>2</sub>, 每次沉积后都进行面形检测并求解 A 值, 对实验数据进行多项式拟合, 拟合出 Power 改变量与沉积的 SiO<sub>2</sub> 厚度的关系式。④测得 3#样片沉积分光膜后的 Power, 即 P<sub>B</sub>, 结合第①步中得到的 P<sub>A</sub>, 求出所需修正的 Power, 即 P, 将 P 代入第③步的关系式, 求出对应的 SiO<sub>2</sub> 厚度, 进而计算出 A 值, 将 P<sub>A</sub>、P<sub>B</sub> 与 A 值代入式(5)对 3#样片进行修正实验, 并根据实验结果校正误差。⑤用经误差校正后的式(5)修正 4#样片, 完成分光镜的制备。

## 3 薄膜制备与面形修正实验

### 3.1 分光膜的制备

实验使用光驰 OTFC-1300 蒸发镀膜机制备分光膜。该设备配有 JEOL 电子枪、RF 离子源。膜厚控制包括晶控和光控, 其中光控配置了背反和直控两种模式。分光膜采用直控和晶控相结合的方式, 增透膜采用背反监控, 补偿 SiO<sub>2</sub> 采用晶控控制。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的沉积工艺参数如表 1 所示。

采用不同的离子源电压与束流参数在 3 片基底上沉积 4000 nm 的 SiO<sub>2</sub> 薄膜, 其他工艺保持一致, 样片的 Power 改变量数据如表 2 所示。







表 1 材料沉积工艺参数

Tab. 1 Material deposition process parameters

材料	沉积速率/(nm·s <sup>-1</sup> )	起始真空度/(×10 <sup>-4</sup> Pa)	沉积温度/(°C)
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.4	7	220
SiO <sub>2</sub>	0.6	7	220

表 2 不同离子源工艺参数对应的样品 ΔPower

Tab. 2 Δpower of the sample corresponding to different process parameters of ion source

编号	电压/V	束流/mA	面形图		Δpower(λ)
			基底	沉积后	
1	1 100	950			0.148 5
2	1 000	920			0.160 2
3	950	900			0.182 1

由表 2 可知,第 1 组参数下基底的 Power 改变量最小,第 3 组参数下基底的 Power 改变量最大。为尽可能采用较薄的 SiO<sub>2</sub> 来修正分光镜面形,前表面分光膜选择第 1 组离子源参数沉积,后表面增透膜以及补偿 SiO<sub>2</sub> 选择第 3 组离子源参数沉积。最终确定的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的离子源参数如表 3 所示。

表 3 离子源工艺参数

Tab. 3 Process parameters of ion source

材料	电压/V	束流/mA	气体 O <sub>2</sub> /Scm	气体 Ar/Scm
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1 100	950	50	8
SiO <sub>2</sub> (直控)	1 100	950	50	8
SiO <sub>2</sub> (背反)	950	900	50	8
SiO <sub>2</sub> (晶控)	950	900	50	8

对沉积分光膜的样品使用光谱分析仪(OSA)进行光谱检测,测试角度为 22.5°,结果如图 6 所示,可见光谱出现了偏差。

直控监控规整膜层厚度不易产生厚度误差,但后两层在进行优化后为非规整膜层,故使用晶控控制膜厚。使用膜系设计软件对分光膜进行模拟分析,结果显示最后两层晶控控制的膜层厚度产生了偏差,导致了透过区光谱差异。直接光控的监控波长偏长导致了光谱向长波方向漂移,通

过调整后两层膜层厚度以及中心波长使光谱实测曲线与拟合曲线重合<sup>[16]</sup>。其中, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的厚度误差为 10%, SiO<sub>2</sub> 的厚度误差为 7%, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Tooling 值由 1.05 修正为 1.16, SiO<sub>2</sub> Tooling 值由 0.95 修正为 0.88。通过修正膜层厚度,并将直控监控波长降低为 2 nm 后,光谱曲线满足使用要求。

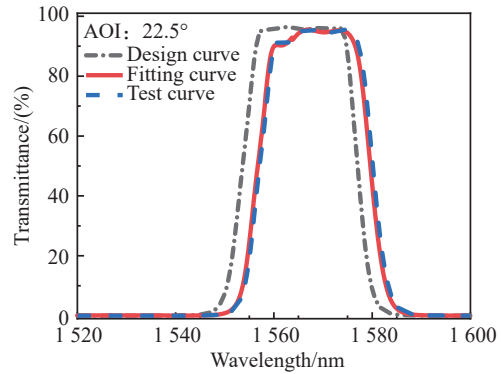


图 6 分光膜的透过率测试曲线与拟合曲线

Fig. 6 Transmittance test curve and fitting curve of the splitter film

### 3.2 面形修正实验

在 4 片面形精度水平相同的样品上按照修正后的监控厚度以及监控波长分别沉积分光膜,进行面形与光谱检测,面形检测结果如表 4 所示。

表 4 样品沉积分光膜的面形结果

Tab. 4 Surface shape results of sample deposited beam splitter

类别	编号	1#	2#	3#	4#
基底	面形图				
	PV(λ)	0.074 6	0.076 1	0.077 4	0.072 3
	RMS(λ)	0.008 7	0.009 2	0.009 7	0.008 3
	Power(λ)	0.007 3	0.008 1	0.008 4	0.007 8
沉积后	面形图				
	PV(λ)	0.516 7	0.528 9	0.531 6	0.515 3
	RMS(λ)	0.111 8	0.111 6	0.111 4	0.111 9
	Power(λ)	-0.385 9	-0.383 9	-0.382 7	-0.385 4

四片样片的能量谱密度如图 7 所示,经换算后的透过率曲线如图 8 所示。

在 1# 样品后表面沉积增透膜,计算出 Power 的改变量  $P_A$  为 0.025 4 λ。在 2# 样品后表面依次沉积一定厚度的 SiO<sub>2</sub>, 实验数据如表 5 所示。

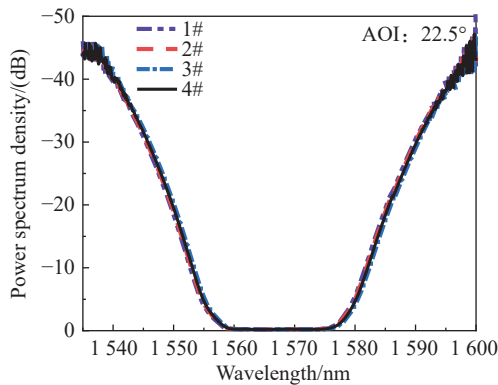


图 7 4 片样品能量谱密度图  
Fig. 7 Power spectral densities of 4 samples

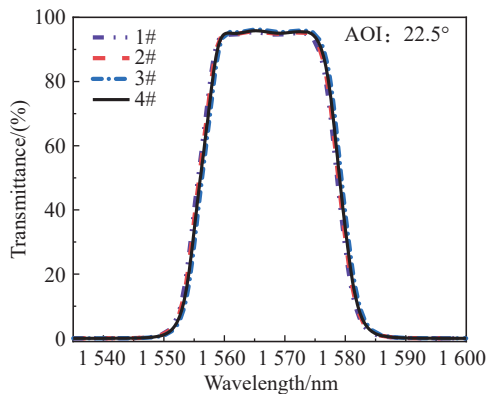


图 8 4 片样品的透过率曲线  
Fig. 8 Transmittance curves of 4 samples

表 5 样品 Power 改变量与 A 值随沉积 SiO<sub>2</sub> 膜层厚度变化的数据

Tab. 5 Data on the variation of sample Power and A-values with different thicknesses of deposited SiO<sub>2</sub> film

SiO <sub>2</sub> 厚度 (nm)	$\Delta$ Power( $\lambda$ )	$A(\Delta\lambda/100 \text{ nm SiO}_2)$
3 500	0.155 1	0.004 43
5 000	0.228 0	0.004 56
6 500	0.308 8	0.004 75
8 000	0.394 4	0.004 93
9 500	0.488 3	0.005 14

对实验数据进行多项式拟合, 如式(8)所示:

$$\Delta P = 1.48 \times 10^{-9} H_s^2 + 3.62 \times 10^{-5} H_s + 0.01, \quad (8)$$

式中,  $\Delta P$  为基底 Power 改变量。公式(5)中 A 值即为:  $\Delta P/H_s$ , 与式(8)对应的样品 Power 改变量随沉积的 SiO<sub>2</sub> 厚度变化曲线如图 9 所示。

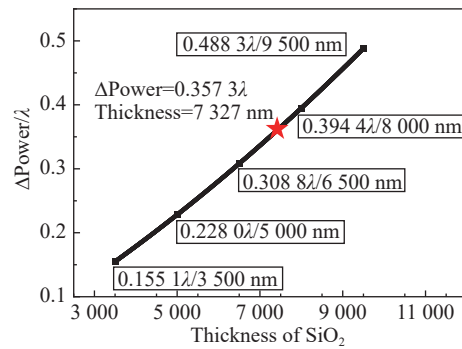


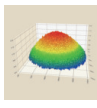

图 9 样品 Power 改变量随沉积 SiO<sub>2</sub> 厚度变化的拟合曲线  
Fig. 9 Fitting curve for the change in sample power with the thickness of deposited SiO<sub>2</sub>

3#样片沉积分光膜后 Power 即  $P_B = -0.382 7\lambda$ , 所需修正的 Power 即  $P = P_B + P_A = -0.357 3\lambda$ , 将其代入式(8)中得出所需沉积的 SiO<sub>2</sub> 厚度为 7327 nm。

根据拟合结果, 计算出 A 值为 0.004 8, 对 3# 样品进行修正, 结果如表 6 所示。修正后的样品 Power 为  $-0.042 9\lambda$ , 修正误差为 12%。经分析, 该误差来源一是干涉仪本身具有一定的测量误差, 二是修正模型的数据应通过依次沉积一定厚度的 SiO<sub>2</sub> 并检测样品 Power 改变量获得, 因此通过该模型直接沉积一定厚度的 SiO<sub>2</sub> 使得样品 Power 改变量也存在误差。

表 6 修正前后样品的面形参数

Tab. 6 Surface parameters of samples before and after correction

类别	面形图	PV( $\lambda$ )	RMS( $\lambda$ )	Power( $\lambda$ )
修正前		0.531 6	0.111 4	-0.382 7
修正后		0.121 9	0.016 2	-0.042 9

校正误差后的 A 值为 0.0042, 该修正系数同样适用于与本文分光镜具有相同沉积材料的类似薄膜。根据 4#样片的面形检测结果得出所需沉积的 SiO<sub>2</sub> 厚度为 8571 nm, 按此厚度进行面形修正, 完成分光镜制备。使用 OSA 对分光镜光谱进行检测, 能量谱密度如图 10 所示。

经能量谱密度换算后的分光镜透过率曲线如图 11 所示。

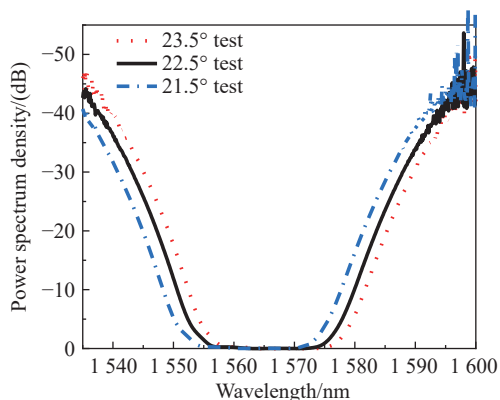


图 10 分光镜能量谱密度图

Fig. 10 Power spectrum density of beam splitter mirror

由图 11 可知,在测试角度为  $22.5^\circ$  时,  $1563\text{ nm}$  透过率为  $98.24\%$ ,  $1540\text{ nm}$  透过率为  $0.028\%$ , 考虑到镜片装夹时的角度误差,在  $21.5^\circ$  到  $23.5^\circ$  范围内  $1563\text{ nm}$  透过率大于  $98\%$ , 反射率大于  $99\%$ , 使用激光干涉仪对修正前后的面形进行检测, 检测结果如表 7 所示。可以看出:对于分光镜的透

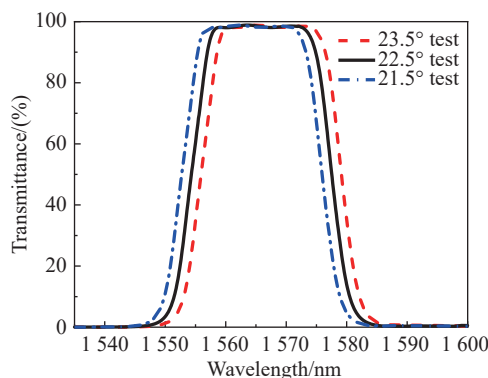







图 11 分光镜的透过率曲线

Fig. 11 Transmittance curves of beam splitter mirror

过面形而言,由电子束蒸发方式沉积的膜层足够均匀,通常不会对基底的透射波前产生影响;对所有基底进行透过面形检测,透过面形精度 RMS 均符合使用要求,因此本文在修正分光镜面形时,仅考虑反射面形。

表 7 修正前后的面形参数与面形图

Tab. 7 Surface parameters and surface profile before and after correction

类别	面形图	PV( $\lambda$ )	RMS( $\lambda$ )	Power( $\lambda$ )
基底		0.0723	0.0083	0.0078
修正前(反射面形)		0.5153	0.1119	-0.3854
修正后(反射面形)		0.0888	0.0107	-0.0153
修正前(透过面形)		0.0694	0.0097	0.0136
修正后(透过面形)		0.0783	0.0103	0.0141

## 4 结 论

本文针对星间通信系统中分光镜的使用需求,制备了高精度分光镜,通过光谱反演分析了产生光谱误差的原因,解决了光谱偏差问题。同时,通过建立参考 Power 的面形修正模型对膜层厚度高达  $22\ \mu\text{m}$  的分光镜面形进行修正。光谱与面形

测试结果显示,该分光镜在  $21.5^\circ \sim 23.5^\circ$  入射角度范围内,  $1563\text{ nm}$  透过率大于  $98\%$ ,  $1540\text{ nm}$  反射率大于  $99\%$ , 反射面形精度 RMS 与透射面形精度 RMS 均优于  $\lambda/90$ 。以上结果对高精度分光镜的研究具有重要的参考意义。如何通过建立更精准的模型修正其他基底与沉积材料制备的光学元件,以获得更高的面形精度,仍是后续需要深入研究与探索的。

## 参考文献:

- [1] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.



- LIU X G, QIAN ZH SH, ZHOU J H, *et al.*. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite internet constellation[J]. *Communications Technology*, 2022, 55(2): 197-204. (in Chinese).
- [2] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 20220393. LI R, LIN B J, LIU Y CH, *et al.*. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220393. (in Chinese).
- [3] 王燕, 陈培永, 宋义伟, 等. 国外空间激光通信技术的发展现状与趋势[J]. *飞控与探测*, 2019, 2(1): 8-16. WANG Y, CHEN P Y, SONG Y W, *et al.*. Progress on the development and trend of overseas space laser communication technology[J]. *Flight Control & Detection*, 2019, 2(1): 8-16. (in Chinese).
- [4] 高锋瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 901-913. GAO D R, LI T L, SUN Y, *et al.*. Latest developments and trends of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese).
- [5] 夏方园, 汪勃, 张国亭, 等. 激光星间链路终端技术发展展望[J]. *光学技术*, 2023, 49(2): 175-183. XIA F Y, WANG B, ZHANG G T, *et al.*. Recent development and prospective of inter-satellite laser links terminal technology[J]. *Optical Technique*, 2023, 49(2): 175-183. (in Chinese).
- [6] 樊彦峥. 大口径镜面高反射膜制备及面形控制技术[D]. 西安: 西安工业大学, 2021. FAN Y ZH. *Deposition and surface shape control technology of large-aperture mirror high-reflection film*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese).
- [7] 高伟饶, 董科研, 江伦. 单波长激光通信终端的隔离度[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1137-1148. GAO W R, DONG K Y, JIANG L. Isolation of single wavelength laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1137-1148.
- [8] 李波, 王超, 闫涛, 等. 多层高反膜的应力研究[J]. *真空与低温*, 2023, 29(2): 146-152. LI B, WANG CH, YAN T, *et al.*. Stress study of multi-layer high reflection films[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2023, 29(2): 146-152. (in Chinese).
- [9] 李阳, 徐均琪, 刘政, 等. 残余应力对介质高反膜面型影响的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(5): 484-490. LI Y, XU J Q, LIU ZH, *et al.*. Study on the influence of residual stress on dielectric high reflection films[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(5): 484-490. (in Chinese).
- [10] 白金林, 姜玉刚, 王利栓, 等. 超低面形宽带高反射薄膜设计及制备技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200413. BAI J L, JIANG Y G, WANG L SH, *et al.*. Research on the design and preparation of ultra-low plane wide-band high reflection film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200413. (in Chinese).
- [11] OHRING M. *Materials Science of Thin Films*[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2001: 436-439.
- [12] 王凯旋, 陈刚, 刘定权, 等. 绿光波段 60 pm 超窄带滤光片的研制[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 119-131. WANG K X, CHEN G, LIU D Q, *et al.*. Fabrication of an ultra-narrow band-pass filter with 60 pm bandwidth in green light band[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 119-131. (in Chinese).
- [13] 田晓习. 光学薄膜技术中的基片与薄膜热力学匹配问题研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020. TIAN X X. *Study on thermodynamic matching between substrate and films in optical thin film technology*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science), 2020. (in Chinese).
- [14] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1909, 82(553): 172-175.
- [15] GRIGORIEV F V, SULIMOV V B, TIKHONRAVOV A V. Atomistic simulation of stresses in growing silicon dioxide films[J]. *Coatings*, 2020, 10(3): 220.
- [16] 潘永刚, 林兆文, 王奔, 等. 深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(4): 740-746. PAN Y G, LIN ZH W, WANG B, *et al.*. Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 740-746. (in Chinese).

## 通讯作者:



付秀华(1963—), 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学薄膜、光学工艺等方面的研究。E-mail: [goptics@163.com](mailto:goptics@163.com)