文章编号:1001-5078(2023)12-1916-05　　· 光学技术 ·

空间光学遥感系统设计及反射膜的研制

徐子奇[1],高明辉[2]
(1. 长春电子科技学院,吉林 长春 130114;2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学一部,吉林 长春 130033)

摘　要:本文采用 Code V 软件设计一种空间光学遥感系统,该系统的 F 数为 2,入瞳直径为 125 mm,出瞳直径为 39 mm,畸变小于 0.5 %,点列图均方根直径小于 5 μm。根据光学薄膜基础理论,设计出铝基碳化硅的表面镀镍后,波长 1064 ± 5 nm 处 R > 98.5% 的反射膜。选择铝基碳化硅作为反射镜的基底材料,采用改性的镍层再镀反射膜的方法,在 OZZSQ900 型箱式真空镀膜机上完成了铝基碳化硅基底镀镍层铝膜的制备。采用岛津 UV-2600i 光谱仪对镀膜样品的反射光谱进行测试,测试结果满足设计要求。该研究具有重要的实际意义和工程价值。

关键词:光学设计;Code V;铝基碳化硅;光学薄膜;反射膜
中图分类号:110.1758;110.2990　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.12.018

Design of space optical remote sensing system and development of reflective film

XU Zi-qi[1], GAO Ming-hui[2]
(1. Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130114, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In this paper, Code V software is used to design a space optical remote sensing system. The F-number of the system is 2, the diameter of the entry pupil is 125 mm, the diameter of the exit pupil is 39 mm, the distortion is less than 0.5 %, and the root-mean-square diameter of the dot plot is less than 5 μm. According to the basic theory of optical thin film, the reflective film with R > 98.5 % at wavelength 1064 ± 5 nm after nickel plating on the surface of aluminum-based silicon carbide was designed. Aluminum-based silicon carbide was selected as the substrate material of the mirror, and the aluminum-based silicon carbide substrate nickel-coated aluminum film was prepared on the OZZSQ900 box vacuum coating machine by using the modified nickel layer. UV-2600i spectrometer was used to test the reflection spectrum of the coated sample, and the test results met the design requirements. The research has important practical significance and engineering value.

Keywords: optical design; Code V; AlSiC; optical thin film; reflective film

1　引　言

随着空间技术的不断发展,空间光学遥感系统在地球观测、资源调查、环境检测和城市规划等领域得到了广泛的应用[1-5]。反射镜高反膜是空间遥感光学系统中的重要光学元件。为了观测到更多的目标、获取更多的地球以及空间观测信息,

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20230201117GX);吉林省教育厅科学研究项目(No. JJKH20231432CY);教育部产学合作协同育人项目(No. 220603053244249)资助。
作者简介:徐子奇(1984 -),女,硕士研究生,副研究员,主要研究方向为光学工艺、光机结构设计、教科研管理等。E-mail:m18946667652@163.com
通讯作者:高明辉(1971 -),男,副研究员,博士研究生,主要研究方向为光机结构设计。E-mail:ccgaomh@163.com
收稿日期:2023-09-08

对空间光学遥感系统的反向射膜提出了更高要求，即要求有更高的反射率，还要提升基底光学性能，降低空间环境对高反膜性能的影响以及降低薄膜应力等[6-7]。

20 世纪 50 年代，英国雷丁大学率先开始从事空间红外光学薄膜技术的研究工作[8]。我国以中国科学院长春精密机械研究所、浙江大学等为代表的单位，承担了大量空间光学遥感系统光学薄膜产品的研制工作[9-10]。目前空间光学系统反射镜镜体的首选材料是表面改性碳化硅，碳化硅与金属材料比较具有机械强度高，刚性好、硬度大，耐磨损、密度小、耐高温，热膨胀系数小、导热系数高和耐腐蚀性好等优点，被广泛应用于航空、航天、国防等领域[11-14]。

本文根据设计指标完成了对空间光学遥感系统的设计方案和薄膜制备等工作。实验结果给出铝基碳化硅镀膜后，1064 ±5 nm 处 R =98.878%，膜层稳定性好，通过了环境适应性要求。

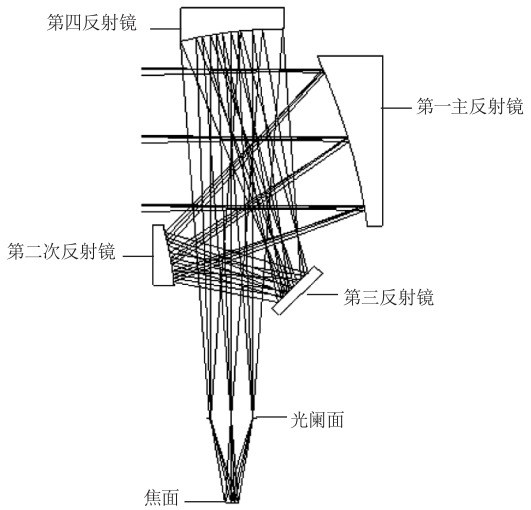
2　空间光学遥感系统设计

空间光学遥感系统的设计指标如表 1 所示，设计结果如图 1 所示。其工作原理为：第一主反射镜将入射光束进行会聚，使光束口径变小；第二次反射镜将第一主反射镜会聚的光束进行折转，并校正由第一主反射镜产生的部分球差和彗差；第三反射镜将第二次反射镜折转的光束继续折转；第四反射镜将第三反射镜折转的光束继续折转，并校正第二次反射镜引入的像散和场曲，并使光束最终成像在焦面上。其中第一主反射镜（抛物面凹面镜）与第二次反射镜（凸面镜）的顶点在该反射式光学系统的光轴上，以作离轴使用。第一主反射镜的通光口径为 126.0 mm 用于将入射光束进行会聚，使光束的口径变小，并将会聚后的光束射入第二次反射镜。第二次反射镜的通光口径为 33.7 mm 用于将所述第一主反射镜会聚的光束进行折转至第三反射镜，并校正由所述第一主反射镜产生的部分球差和彗差。第三反射镜（平面反射镜）的通光口径为 30.5 mm，用于将所述第二次反射镜所折转的光束继续折转至第四反射镜，以使所述反射式光学系统紧凑，进一步使得该反射式光学系统具有小型化和轻量化的特点。第四反射镜（双曲面镜）的通光口径为 94.8 mm，用于将第三反射镜所折转的光束继续折转至，并校正第二次反射镜引入的像散和场曲，并使光束最终成像在焦面上。第四反射镜将第三反射镜折转的光束继续折转，并校正第二次反射镜引入的像散和场曲，并将校正后的光束折转至光阑面，再由光阑面将第四反射镜所折转的光束折射至焦面，以使光束在焦面上成像。

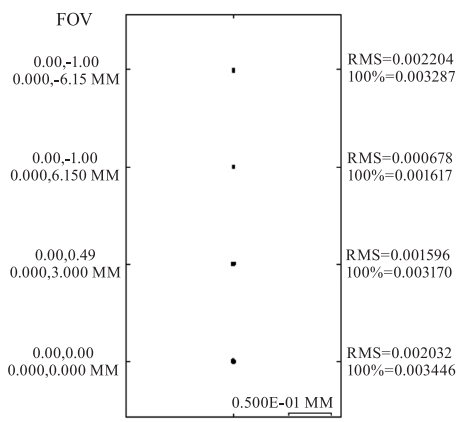
表 1　空间光学遥感系统主要技术指标

Tab. 1 Main technical index of space optical remote sensing system

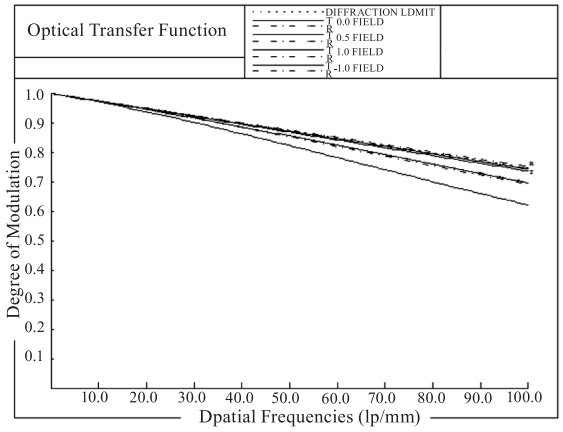
Parameters	Value
Wavelength/nm	1064
Reflectivity/%	>98.5
Field of View/mrad	5
Magnification	20 ×
Caliber/mm	150
Isolation/dB	>70



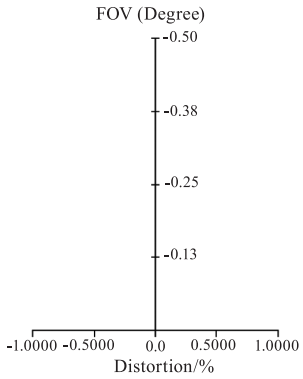
(a) 光学系统的结构示意图



(b) 均方根点列图



(c) 光学传递函数图



(d) 畸变图

图 1 空间光学遥感系统

Fig. 1 Space optical remote sensing system

该反射式光学系统的 F 数为 2,入瞳直径为125 mm,像方视场全高为 12.3 mm,畸变小于 0.5%,点列图均方根直径小于 5 μm。具体地,各反射镜的具体参数如表 2 所示。

3 铝基碳化硅表面反射膜设计

铝基碳化硅的表面改性是在其表面镀镍层,采用镀镍的方式可保证镍层的线膨胀系数与铝基碳化硅复合材料的线膨胀系数相同,避免了镍层在温度变化时与基体热性能不匹配而出现翘曲等现象,使镍层与基体具有非常好的温度匹配和结合力。在光学加工方面,单点金刚石车削可以直接对表面的镍层进行加工,加工后具有较好的面形质量和表面光洁度。铝基碳化硅表面改性后在改性的镍层再镀反射膜需要考虑反射膜层的附着性和牢固度,避免结合力不致密导致膜层脱落。本文采用在反射膜系设计中采用粘结层 + 金属膜 + 介质膜 + 保护膜的方式。

根据空间光学遥感系统对成像光谱范围的要求,反射膜在 1064 ± 5 nm 处,反射率高于 98.5%。依据物理气象沉积的基础理论,对于 k(k = 1,2,3,…) 层膜结构,膜层与基片的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^{k} \begin{bmatrix} \cos\sigma_j & i\sin\sigma_j/\eta_j \\ i\eta_j\sin\sigma_j & \cos\sigma_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,η_j 为第 j 层薄膜材料的有效导纳;η_g 为基底材料的有效导纳;σ_j 为第 j 层膜的位相厚度,薄膜反射率为:

$$R = \left(\frac{\eta_0 - \frac{C}{B}}{\eta_0 + \frac{C}{B}} \right) \left(\frac{\eta_0 - \frac{C}{B}}{\eta_0 + \frac{C}{B}} \right)^* \tag{2}$$

式中,η_0 为入射介质的有效导纳。

综合考虑光学薄膜在面形精度、附着力、温度、湿度和反射率方面的要求,选择 n = 2.27@1064 nm 的 TiO_2,n = 1.46@1064 nm 的 SiO_2,n = 0.82@1064 nm的 Al 为反射膜材料。用 Essential Macleod 膜系设计软件对光学薄膜进行仿真模拟,软件优化后得到的理论设计曲线如图 2 所示,1064 ± 5nm 处 R = 99.147%。

表 2 空间光学遥感系统具体参数

Tab. 2 Specific parameters of space optical remote sensing system

Surface No.	Radius	Spacing	Refraction/Reflection Mode	Material
Object Surface	∞	∞	Refraction	/
1	-486.624	-182.84	Reflection	Aluminum Silicon Carbide
2	-199.327	99.22	Reflection	Aluminum Silicon Carbide
3	∞	-247.44	Reflection	Aluminum Silicon Carbide
4	386	356.67	Reflection	Aluminum Silicon Carbide
5(aperture surface)	∞	78	Refraction	/
6(Image Surface)	∞	0	Refraction	/

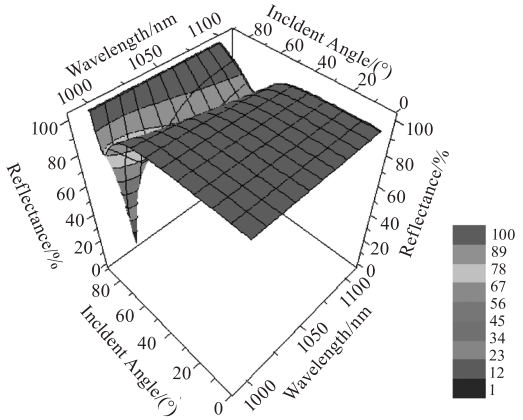


图 2　反射膜的理论设计曲线

Fig. 2 The theoretical design curve of the HR film

3　反射膜的制备

该实验是在 OZZSQ900 型箱式真空镀膜机上完成的，具体工艺流程如下：

（1）当真空度达到 2.5×10^{-3} Pa 时开离子源清洁基底表面 30 min；

（2）关闭离子源在 Ni 上用电子束蒸发方式沉积 178.17 nm 的粘结层（SiO_2）；

（3）在 SiO_2 上用热蒸发方式沉积 144.48 nm 的 Al；

（4）在 Al 上用电子束蒸发 SiO_2 89 nm 后开启离子源辅助沉积 SiO_2 和 TiO_2 介质堆，TiO_2 和 SiO_2 沉积工艺参数如表 3 所示。

表 3　TiO_2 和 SiO_2 沉积工艺参数

Tab. 3 Deposition process parameters of TiO_2 and SiO_2

Material	Substrate temperature /℃	Degree of vacuum / Pa	Deposition rate /(nm · s^{-1})	Flow rate of O_2/sccm	
				Kaufman	HPE
TiO_2	50	2.5×10^{-3}	0.35	15	8
SiO_2	50	2.5×10^{-3}	0.6	5	0

镀膜样品的反射光谱采用岛津 UV-2600i 光谱仪进行测试，样品反射率测试结果如图 3 所示。实测值在 1064 ± 5 nm 处反射率为 98.967% 比理论值低 0.18%。误差主要来源于薄膜的吸收损耗，但实验结果仍能满足设计指标要求。

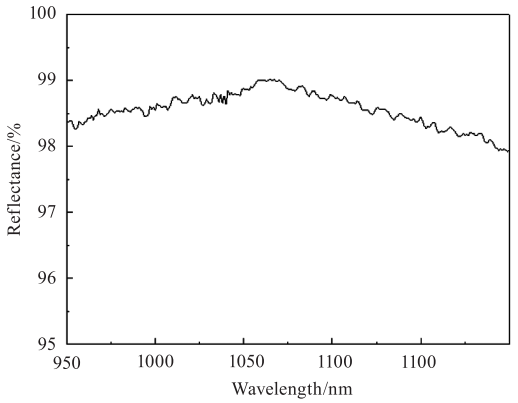


图 3　样品反射率测试曲线

Fig. 3 Test curve of reflectance of sample

将镀膜样品进行环境测试，测试结果如下：在附着力试验中，以 2 cm 宽的胶带纸，剥离强度不小于 2.6 N/cm，粘在镀膜样品表面垂直迅速拉起，无脱膜现象。在温度试验中，将测试片放入温控柜内，由室温降到 −30 ℃，保持 12 个小时；再将温度缓慢升到 30 ℃，保持 12 个小时，膜层无脱膜、裂纹、起泡现象。在湿度实验中，镀膜样品件在相对湿度为 80% ~95% 的条件下保持 48 h 无脱膜、裂纹、起泡现象。

4　结　论

本文设计了一种空间光学遥感系统，该系统通过将第一主反射镜和第二次反射镜为共轴系统离轴使用，即使用主次镜的部分光学口径，达到消除常规共轴系统存在中心遮拦的目的，从而进一步提高了集光能力且易于装调，以及通过利用第三反射镜折转光路，使整个光路空间结构紧凑，从而有效保证了该系统小型化和轻量化的特点，以及通过所述反射式光学系统的 F 数为 2，入瞳直径为 125 mm，出瞳直径为 39 mm，畸变小于 0.5%，点列图均方根直径小于 5 微米，从而使得相比较普通离轴三反系统，成像质量大幅提高，进一步有效克服了现有技术中的孔径小、集光能力弱、系统笨重的不足。并采用 Essential Macleod 膜系设计软件对空间光学遥感系统中的高反射膜进行了设计。在 OZZSQ900 型箱式真空镀膜机上完成了薄膜的制备，实验结果表明：在 1064 ± 5 nm 处 $R = 98.878\%$，满足技术指标要求并通过了环境测试。

参考文献：

[1]　项建胜，潘国庆，孟卫华. 一种含自由曲面的离轴三反光

学系统设计[J]. 激光与红外,2022,52(7):1073 - 1077.

[2] Carrasco-Casado A, Shiratama K, Trinh P V, et al. Development of a miniaturized laser-communication terminal for small satellites[J]. Acta Astronautica, 2022, 197: 1 - 5.

[3] 曹一青,沈志娟. 可见光/红外双波段离轴四反光学系统设计[J]. 量子电子学报,2022,39(3):324 - 333.

[4] Hu S, Yu H, Duan Z, et al. Multi-parameter influenced acquisition model with an in-orbit jitter for inter-satellite laser communication of the LCES system[J]. Optics Express, 2022, 30(19): 34362 - 34377.

[5] Wang Baohua, Liu Zhimin, Tang Shaofan, et al. Optical system design of high resolution dual - band s IR remoteensor[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(1): 102 - 109. (in Chinese)
王保华,刘志敏,唐绍凡等. 星载高分辨率红外双谱段遥感器光学系统设计[J]. 激光与红外,2022,52(1):102 - 109.

[6] Zhang Qunpeng, Chen Jiaqi, Shi Yijun. Development of the aluminum substrate reflective film in the off - axis three - mirror optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 366 - 370. (in Chinese)
张鹏泉,陈佳琪,史屹君. 离轴三反光学系统中反射膜的研制[J]. 红外与激光工程,2022,51(9):366 - 370.

[7] Kan Xiaoting, Haung Shuai, Wang Meijiao. Development of near-infrared laser high reflective film for space laser communication optical system [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(3): 444 - 448. (in Chinese)
阚晓婷,黄帅,王美娇. 空间激光通信光学系统中近红外激光高反射膜的研制[J]. 激光与红外,2023,53(3):444 - 448.

[8] Duan weibo, Liu boajian, Zhuang Qiuhui, et al. Research progress of infrared thin film coatings applied in space remote sensing systems (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9): 11 - 27. (in Chinese)
段微波,刘保剑,庄秋慧等. 应用于空间遥感系统的红外光学薄膜研究进展(特邀)[J]. 光子学报,2022,51(9):11 - 27.

[9] Fu xiongyin, Kong mingdong, Hu jianping, et al. Deposition of Multilayer for Pulse Laser Mirror with High Laser Induced Damage Threshold[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, (4): 413 - 417. (in Chinese)
付雄鹰,孔明东,胡建平等. 波长 1064 nm 脉冲激光高阈值反射膜的研制[J]. 强激光与粒子束,1999(4):413 - 417.

[10] 唐晋发. 薄膜在光学中的应用[J]. 光学仪器,1979(1):41 - 60.

[11] Bae H T, Jeong J H, Choi H J, et al. Estimation of tribological properties on surface modified SiC by chlorine gas reaction at various temperatures[J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2009, 46(5): 515 - 519.

[12] Suzuki T S, Uchikoshi T, Sakakibara S, et al. Texture development of surface-modified SiC prepared by EPD in a strong magnetic field[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2011, 119(1392): 667 - 671.

[13] Aono Y, Ando S, Hirata A. Microtribological modification of silicon carbide surface by laser irradiation[J]. Precision Engineering, 2015, 43: 270 - 276.

[14] Meng B, Zheng J, Yuan D, et al. Machinability improvement of silicon carbide via femtosecond laser surface modification method[J]. Applied Physics A, 2019, 125(1): 69.