

低偏振超宽光谱分色膜设计与制备

于天燕^{1,2}, 秦 杨^{1,2}, 蒋 林^{1,2}, 段微波^{1,2*}, 刘定权^{1,2}

(1. 上海市光学薄膜与光谱调控重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 可见/红外超宽光谱分色片是星载中分辨率光谱成像仪 III 型光学系统中的重要光学薄膜器件。利用诱导透射原理, 采用金属-介质膜系结构加非对称等效导纳匹配层, 实现了 45° 入射时 $0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 光谱高效透射, $1.35\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段光谱高效反射, 从而将入射光束分配到不同的光路。同时通过消偏振控制设计, 获得了可见近红外波段低偏振灵敏度(LPS)。所研制的分色片可见近红外波段平均透射率大于 85%, LPS 小于 4%; 短波及长波红外波段平均反射率大于 90%。

关键词: 光学薄膜; 超宽光谱分色片; 诱导透射; 偏振灵敏度

中图分类号: O436; TN214

文献标识码: A

Design and fabrication of an ultra-broadband dichroic beam-splitter with low polarization

YU Tian-Yan^{1,2}, QIN Yang^{1,2}, JIANG Lin^{1,2}, DUAN Wei-Bo^{1,2*}, LIU Ding-Quan^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Optical Coatings and Spectral Modulation, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: This paper describes the design and fabrication of one kind of dichroic beam-splitter that operates in an ultra-broadband spectral range from visible to longwave infrared regions simultaneously. The use of metal-dielectric coatings makes it implement structures that transmit the visible/near infrared radiation from 0.4 to $1.05\ \mu\text{m}$ and reflect infrared radiation from 1.36 to $13\ \mu\text{m}$. At the same time, the structures are designed to obtain a low linear polarization sensitivity (LPS) in the visible/near infrared region. The transmission of visible/near infrared region is more than 85% and the average reflection of infrared region is more than 90%. The LPS of the region $0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$ is less than 4%.

Key words: optical coatings, ultra-broadband dichroic beam-splitter, induced transmission, polarization sensitivity

引言

中分辨率光谱成像仪(MERSI)是“风云三号”气象卫星上的重要遥感仪器之一,工作波段覆盖从 $0.4\ \mu\text{m}$ 至 $13\ \mu\text{m}$,地面分辨率有 $1\ 000\ \text{m}$ 和 $250\ \text{m}$,光谱分辨率有 $20\ \text{nm}$ 、 $50\ \text{nm}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 等,可以同时获取丰富的地气辐射景象,它的主要任务是对地球的海洋、陆地、大气进行全球动态监测,并进一步加强对云特性、气溶胶、陆地表面特性、海表特性、低层水汽的监测,提高我国在天气预报、气候变化研究和地球环境监测的能力^[1]。目前,在 FY-3E 卫星搭

载的改进型中分辨率光谱成像仪 III 型(MERSI-III),相比 FY-3A~3C 星中分辨率光谱成像仪(MERSI-I 型仪器),优化调整了部分太阳反射波段通道,增加了 5 个中长波红外通道,其中两个红外分裂窗实现 $250\ \text{m}$ 空间分辨率观测,并增加了 $1.38\ \mu\text{m}$ 短波红外卷云探测通道,具有覆盖可见光至长波红外谱段范围 25 个光谱通道的成像能力^[1-2],同时相比 FY-3D 星的 MERSI-II,增加了对可见近红外通道的偏振灵敏度控制,从而提高了仪器的定量化测量能力。

收稿日期: 2023-12-20, 修回日期: 2024-02-08

Received date: 2023-12-20, Revised date: 2024-02-08

作者简介(Biography): 于天燕(1973—),女,山东乳山人,研究员,博士,主要研究领域为航天光学薄膜元件及相关光学薄膜材料特性;光学薄膜技术。E-mail: tian_yu@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: duanweibo@mail.sitp.ac.cn

MERSI-III 光学系统是以分色片和滤光片组合形成光谱通道,光辐射信号先经由四个分色片按波段粗分到五个不同的成像光路,然后由 25 种微型滤光片精准限定各光谱通道的中心波长、带宽和波形,最后与探测器耦合进行各光谱通道信号探测。图 1 为光路排布示意图,D1-D4 为分色片,其中第一分色片(D1)即本文所要研究的分色片,覆盖可见至长波红外的超宽光谱范围。按照通道划分需求,D1 需要在 45° 入射角下将 $0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 波段的光透射, $T_{0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}} > 80\%$ (其中 $T_{0.4\ \mu\text{m}} > 70\%$, $T_{1.04\ \mu\text{m}} > 70\%$); $1.35\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段的光反射,其中 $R_{1.35\sim 2.2\ \mu\text{m}} > 80\%$, $R_{3.05\sim 13\ \mu\text{m}} > 90\%$ 。同时,透射波长 ($0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$) 光谱区偏振灵敏度要求优于 4% 。这种分色方式一般采用诱导透射的原理,采用介质/金属/介质(D/M/D)的分色片结构形式^[3-6],但是对于 MERSI-III 第一分色片,由于透射带宽,且与反射带的过渡区很窄,常规的 D/M/D 结构形式无法同时满足系统的光谱及偏振要求,为此本文围绕窄过渡区宽光谱高效分光及高偏振灵敏度控制展开研究。

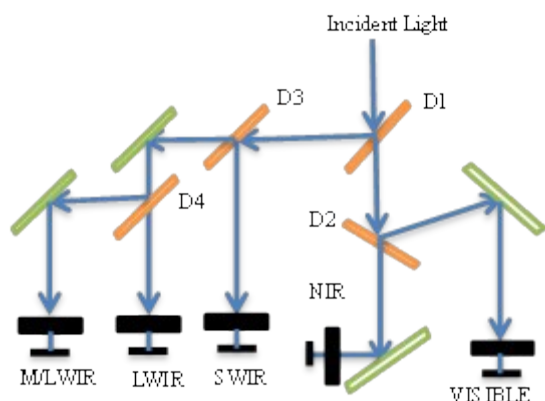


图 1 MERSI-III 光路排布示意图

Fig. 1 MERSI-III optical layout

1 理论分析

1.1 诱导透射原理

为了更好地理解含有吸收层(通常为金属层)的光学薄膜并很好地利用其进行光学薄膜设计, Berning 和 Turner^[7]提出了诱导透射的概念。如图 2 的含一层金属膜的膜系结构,其势透射率定义为

$$\varphi = \frac{T}{1-R} = \frac{\text{Re}(Y_e)}{\text{Re}(\text{BiCi}^*)}, \quad (1)$$

由薄膜特征矩阵

$$\begin{bmatrix} \text{Bi} \\ \text{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i}{(n-ik)}\sin\delta \\ i(n-ik)\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ X+iZ \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n-ik)d = \frac{2\pi nd}{\lambda} - \frac{i2\pi kd}{\lambda} = \alpha - i\beta$, $\alpha = \frac{2\pi nd}{\lambda}$, $\beta = \frac{2\pi kd}{\lambda}$, $Y_e = X + iZ$ 为出射导纳。

可以得出势透射率为

$$\varphi = \left\{ \frac{q[n^2 - k^2 - 2nk\left(\frac{Z}{X}\right)]}{(n^2 + k^2)} + r + \frac{p}{X} + \frac{s(X^2 + Z^2)}{X(n^2 + k^2)} \right\}^{-1}, \quad (3)$$

式(3)中

$$q \equiv (\sin^2\alpha \text{ch}^2\beta + \cos^2\alpha \text{sh}^2\beta)$$

$$r \equiv (\cos^2\alpha \text{ch}^2\beta + \sin^2\alpha \text{sh}^2\beta)$$

$$p \equiv (n\text{sh}\beta \text{ch}\beta + k\cos\alpha \sin\alpha)$$

$$s \equiv (n\text{sh}\beta \text{ch}\beta - k\cos\alpha \sin\alpha)$$

由式(3)可见,当金属膜的光学常数和厚度选定以后,势透射率仅仅是出射导纳($Y_e=X+iZ$)的函数^[8]。

多层金属膜的势透射率则等于多层膜(N)势透射率的乘积^[9]:

$$\varphi_{\text{system}} = \prod_{j=1}^N \varphi_j, \quad (4)$$

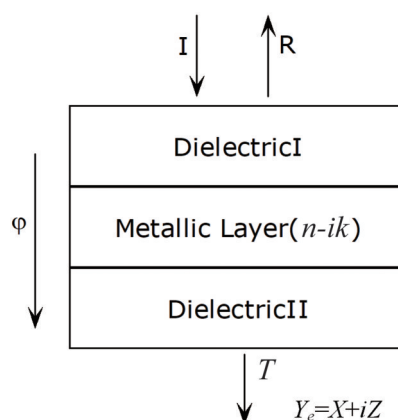


图 2 包含金属层的薄膜系统示意图

Fig. 2 The schematic view of a metallic layer included coating system

1.2 薄膜偏振效应

当光线以一定的倾斜角入射到两种各向同性介质的界面 N_0, N_1 上时,其电场矢量可以分解为垂直于入射面的分量 ES 和平行于入射面的分量 EP,也就是把入射光分解成了 S 偏振光和 P 偏振光。如

图3所示。

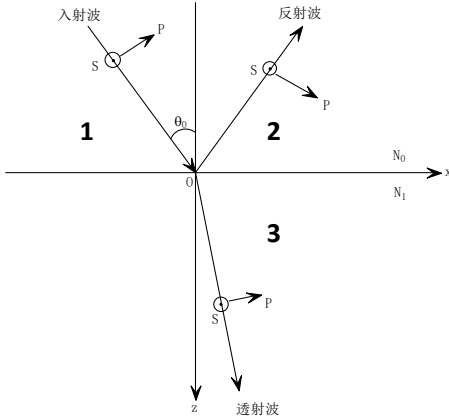


图3 倾斜入射时偏振光的电矢量示意图

Fig. 3 The schematic view of the electric vectors for the oblique incident light

对于P偏振光,电场振动方向在入射平面内,而此时磁场振动方向则垂直于入射面,即平行于界面。由电磁场在界面处的连续性条件可知:

$$\vec{H}_{p1} + \vec{H}_{p2} = \vec{H}_{p3} \quad (5)$$

$$\vec{E}_{p1} \cos \theta_0 + \vec{E}_{p2} \cos \theta_0 = \vec{E}_{p3} \cos \theta_1 \quad (6)$$

由电场强度与磁场强度的关系 $\vec{H} = N(\vec{K} \times \vec{E})$, 则式(5)变为

$$N_0 \vec{E}_{p1} + N_0 \vec{E}_{p2} = N_1 \vec{E}_{p3} \quad (7)$$

由式(6)、(7)组成的方程组联立可解:

$$E_{p2} = E_{p1} \frac{N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} \quad (8)$$

则振幅反射率为

$$r = \frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} \quad (9)$$

能量反射率为

$$R_p = \frac{(N_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0)^2}{(N_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0)^2} \quad (10)$$

这与光垂直界面入射时 $R = \frac{(N_2 - N_1)^2}{(N_2 + N_1)^2}$ 形式相比, 可以得出膜层对P偏振光的有效折射率 $\eta_p = N_1 / \cos \theta_1$ 。

同样对S偏振光应用电磁场在界面处的边界连续条件, 可以得到S偏振光的能量反射率为

$$R_s = \frac{(N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1)^2}{(N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1)^2} \quad (11)$$

可以得出膜层对S偏振光的有效折射率 $\eta_s = N_1 \times \cos \theta_1$ 。通常, $R_s \neq R_p$, 即S光和P光的反射光谱发生了分离, 也就是说当光束倾斜入射时薄膜产生了偏振效应。倾斜入射时, 多层薄膜的矩阵仍然适用^[10]。

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于S偏振光和P偏振光, 其导纳由式(13)给出

$$\eta_{js} = n_j \cos \theta_j, \quad \eta_{jp} = n_j / \cos \theta_j \quad (13)$$

由上面两式可分别算出S、P光的B、C值, 进而求得 R_s, R_p, T_s, T_p 。

假设入射光束为自然光, 其偏振灵敏度P(即LPS)的表达式为

$$P^{(r)} = \left| \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \right| \quad (14)$$

$$P^{(t)} = \left| \frac{T_s - T_p}{T_s + T_p} \right| \quad (15)$$

对于本文所要研究的分色片, 只对可见近红外波段提出了偏振要求, 因此其偏振灵敏度由式(15)计算得出。

2 膜系设计与材料选择

根据1.1节的分析, 我们知道透射率取决于金属膜的参数和出射导纳, 与入射侧的膜堆及导纳无关, 因此为了获得最大透射率, 选择具有尽可能大的 k/n 值的金属膜材料, 在可见和近红外区, 银(Ag)膜是最佳选择^[11]。诱导透射分色片的基本膜系结构为D/M/D(D代表介质层; M代表金属层)。根据本文所研制分色片的工作波段及可靠性等多方面考虑, 选择硫化锌(ZnS)作为与金属层相邻的匹配介质层。图4为根据材料实验椭圆偏振数据拟合得出的Ag膜的光学常数。根据金属Ag膜的成膜特点, 需采用室温冷镀, 因此ZnS膜层的沉积温度也为室温。由于ZnS膜层的性能受温度影响明显^[12], 因此对室温沉积的ZnS膜层光学常数进行了拟合, 结果如图5所示。

为了能够满足红外波段90%的反射率要求, 考虑到Ag膜厚度控制精度及成膜质量, 本文选择单层金属层的初始诱导结构, 即ZnS/Ag/ZnS, 基片为熔石英(JGS-1)。由于分色片工作的透射波段为0.4~1.05 μm , 三层诱导结构无法展宽至需要带宽。根

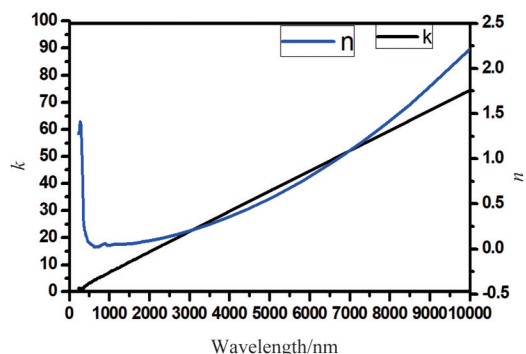


图4 Ag的光学常数拟合结果

Fig. 4 The fitted optical constants of Ag film

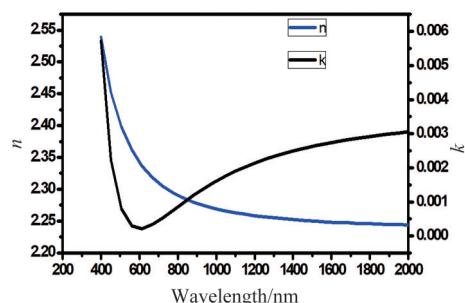
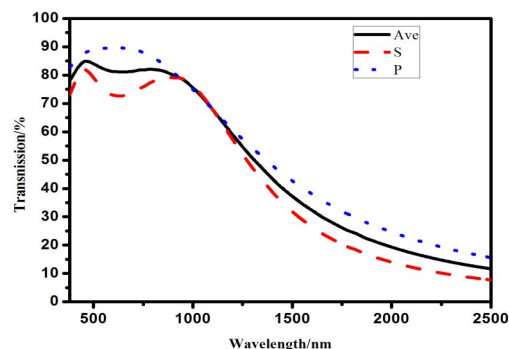


图5 ZnS光学常数拟合结果

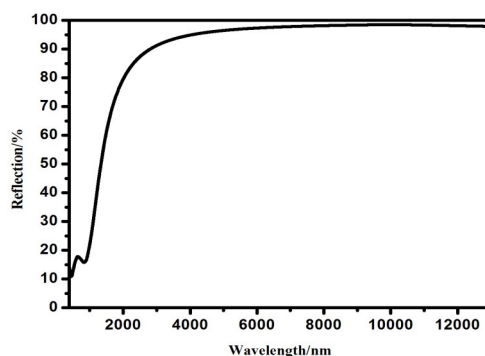
Fig. 5 The fitted optical constants of ZnS film

据1.1节的分析,金属膜出射侧增加低折射率匹配层 MgF_2 , 标为L, 获得实现最大透射率的出射导纳的同时展宽透射带宽, 代入上述拟合光学常数优化后膜系为 $12.31\text{D}/8.93\text{Ag}/40.22\text{D}/103.01\text{L}$, 系数为物理厚度(nm)。图6为诱导透射膜系在 45° 入射角的设计光谱。从图中可以看出, 该设计透、反射区过渡缓慢, 无法满足系统对 $1.35\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 的高反射率要求, 同时可见近红外波段P、S光分离较大, 偏振度达不到系统要求。

由于透射率取决于金属膜的参数和出射导纳, 而与入射侧的膜堆及导纳无关^[8]。因此采取在金属膜入射侧叠加由 SiO_2 (A)、 Ta_2O_5 (B) 组成的非对称等效层 $(k_1A\ k_2B\ k_3A)^n$ (其中 k 为厚度系数, n 为周期数), 对已有诱导透射膜系在可见近红外波段进行光谱调控, 使 $1.35\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 波段迅速过渡为反射区, 满足系统对该波段的高反射率要求。同时根据式(15), 通过对非对称等效层厚度优化, 实现与诱导透射膜系入射侧的导纳匹配, 实现可见近红外波段的透射率提升。同时背面设计以 SiO_2 、 Ta_2O_5 为膜层材料的消偏振控制减反射膜, 实现 $0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 波段的高效增透, 减小P、S光偏离量, 获得该波段的低偏振灵敏度。完整膜系设计结果如图7所示。



(a)



(b)

图6 (a)诱导透射膜系透射光谱图;(b)诱导透射膜系反射光谱图

Fig.6 (a) The transmission spectra of the induced film structure;(b) The reflection spectra of the induced film structure

$0.4\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 波段偏振灵敏度计算结果如图8所示。

3 分色片的制备与性能测试

分色片样品制备是在莱宝光学 ARES 1110 高真空镀膜系统上完成的。膜层沉积在厚度为 $2.5\ \text{mm}$ 的JGS1熔石英基底上。考虑到光谱调控氧化物匹配层沉积为高基板温度, 而诱导透射金属层需要低基板温度, 因此整个膜系的制备分两步进行。首先是在基底保持 250°C 温度下沉积由 SiO_2 、 Ta_2O_5 构成的背面减反射膜以及分色膜的氧化物匹配层, 采用离子辅助电子束蒸发沉积, 沉积速率分别为 $0.8\ \text{nm/S}$ 、 $0.13\ \text{nm/S}$, 初始真空为 $2\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ 。分色膜的氧化物膜层沉积结束, 真空室梯度降温至

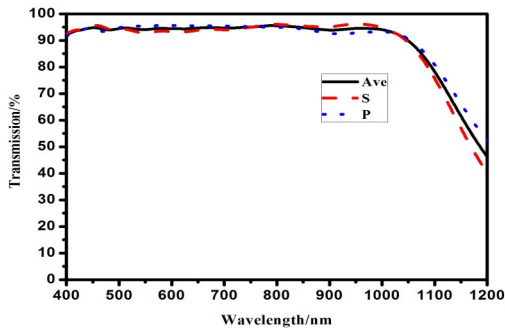
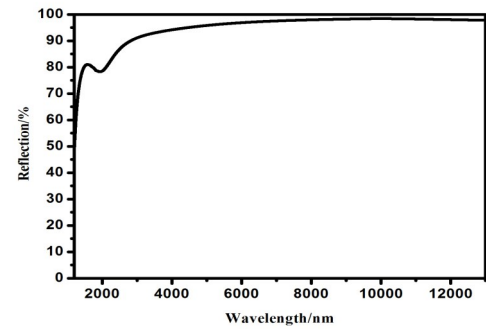


图7 低偏振超宽光谱分色片透、反射率设计曲线
Fig. 7 The calculated transmission and reflection curves of the ultra-broadband dichroic beam-splitter with low polarization



而对于Ag膜,要获得良好的光学性能,需要快速蒸发。但是由于Ag膜厚度较薄,且厚度误差对于最终分色片性能又有明显影响,因此为了能够准确沉积所需厚度的Ag层同时又能保证沉积的Ag层性能,经过反复试验,最终确定Ag层的沉积速率为1 nm/S。制备的样品分别在Perkin Elmer公司的Lambda 900分光光度计和Spectrum GX傅里叶红外光谱仪上进行透射和反射光谱测试,入射角度为45°。结果如图9所示。图10为根据实测结果计算的0.4~1.05 μm的偏振灵敏度。

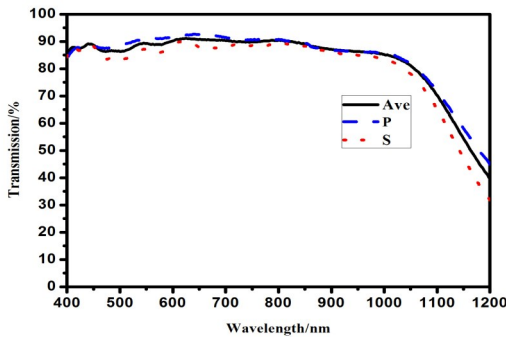


图9 分色片实测透/反射光谱曲线
Fig. 9 The measured transmission and reflection curves of the dichroic beam-splitter

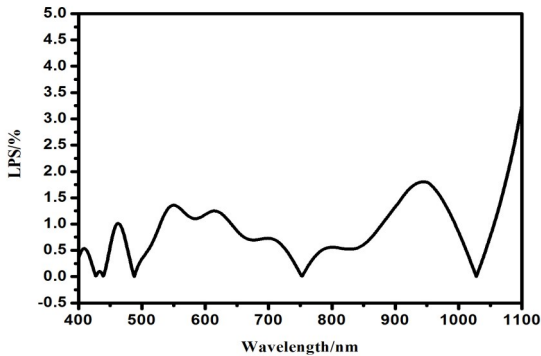


图8 可见近红外波段偏振灵敏度设计值
Fig. 8 The calculated LPS of dichroic beam-splitter in visible/ near infrared region

50 °C,开始诱导透射膜系 12. 31D/8. 93Ag/40. 22D/ 103. 01L 的沉积。ZnS、Ag采用电阻加热蒸发沉积, MgF₂采用电子束蒸发,ZnS 沉积速率为 1. 4 nm/S。

从图中可以看出,所研制分色片样品光学性能满足系统要求。但是无论是可见近红外波段的透射率还是短波至长波波段的反射率都与理论设计值存在一定的差异。根据赵培的研究结果,不同厚度的超薄Ag膜,其光学常数不同^[13]。因此,分析认为研制结果与设计值的偏差主要是由于膜系理论设计所用的Ag膜光学常数拟合值与实际的光学常

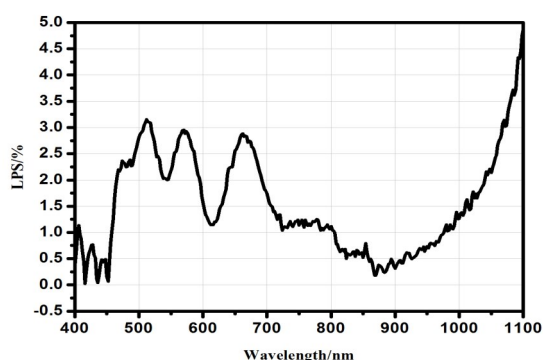


图10 可见近红外波段偏振灵敏度曲线

Fig. 10 The LPS curve of the dichroic beam-splitter

数不一致导致的。

对于航天用光学薄膜元件,空间环境可靠性是影响其空间使用寿命的重要因素,因此需要进行相关的空间环境可靠性模拟试验。附着力测试是评估光学薄膜牢固度的一个重要手段,K. L. Mittal对不同附着力测试方法做了详细介绍^[14]。在本文的研究工作中,采用最简单的附着力测试方法即胶带快速撕拉法进行附着力测试:采用标准聚酯胶带进行附着力试验,试验时,把胶带的胶面牢牢地贴在分色膜和减反射膜膜层表面,排出气泡,迅速拉起胶带的一端,观察膜层是否被拉脱。按照使用要求还需要对分色片样品进行如下的环境可靠性试验^[15]:(1)浸泡试验:45 °C水中浸泡8小时,观察膜层无脱落;(2)湿度试验:在45 °C,相对湿度不小于95%的环境中,保持24小时,膜层无脱落。(3)温度交变试验:在45 °C环境中保持30 min,再自然降温,在-100 °C环境中保持30 min,后自然升温到45 °C。完成一个循环。进行3个循环后,膜层无脱落。试验结果证明所研制的分色片样品能够经受住要求的可靠性检验,满足航天产品使用要求。

4 结论

采用在金属膜入射侧叠加非对称等效层对诱导透射膜系在可见近红外波段进行光谱调控的设计方法,使1.35~2.2 μm 波段迅速过渡为反射区,实现了0.4~1.05 μm 可见近红外波段高效透射,1.35~13 μm 高效反射,且透射波长(0.4~1.05 μm)光谱区偏振灵敏度优于4%。所研制的分色片光谱性能和可靠性均满足系统要求,解决了星载红外遥感仪器光学系统中大角度入射窄过渡区超宽光谱分光的关键技术。

References

- [1] Hu Xiu-Qing, Niu Xin-Hua, Xu Na, *et al.* The improvement and application ability enhancement of the Medium-Resolution Spectral Imager II onboard FY-3D [C]. The 35th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (胡秀清, 钮新华, 徐娜, 等. FY-3D 中分辨率光谱成像仪 II 型仪器改进及应用能力提升. 第 35 届中国气象学会年会 S21 卫星气象与生态遥感), 2018; 92-100.
- [2] Niu Xin-Hua, Chen Shuai-Shuai. The design and application of spaceborne Medium-Resolution Spectral Imager II [C]. 2018 Optical Technology and Application Symposium and Interdisciplinary Forum (钮新华, 陈帅帅. 星载中分辨率光谱成像仪 II 型设计及应用 [C]. 2018 年光学技术与应用研讨会暨交叉学科论坛论文集), 2018; 356-363.
- [3] Tan Yu, Zhao Xing-Mei. Coating of Beam-splitting Film System Working in a Ultra Wide Spectral Range [J]. *J. Applied Optics* (谭宇, 赵兴梅. 特宽光谱分光膜的镀制 [J]. 应用光学), 2005, 26(4): 53-55.
- [4] Lin Bing, Yu Tian-Yan, Liu Ding-quan, *et al.* Design and deposition of infrared/visible wideband color separation filters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林炳, 于天燕, 刘定权, 等. 红外/可见光宽带分色片设计与制备 [J]. 红外与毫米波学报), 2004, 23(5): 393-395.
- [5] Li Da-Qi, Liu Ding-Quan, Zhang Feng-Shan. Control of polarization for the visible infrared broadband dichroic beamsplitter at oblique incidence [J]. *ACTA PHOTONICA SINICA* (李大琪, 刘定权, 张凤山. 可见/红外宽光谱分色片偏振调控的设计 [J]. 光子学报), 2011, 40(1): 5-8.
- [6] Liu Yong-Qiang, Yang Yi-Min, Yang Chong-Min, *et al.* Spectrum filter for transmitting in 0.45~1.6 μm (and reflecting in 8~12 μm) [J]. *Journal of Applied Optics* (刘永强, 杨益民, 杨崇民, 等. 透 0.45~1.6 μm 反 8~12 μm 宽光谱分色滤光片的制备 [J]. 应用光学), 2009, 30(4): 666-668.
- [7] BERNING P H, TURNER A F. Induced transmission in absorbing films applied to band pass filter design [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, 47(3): 230-239.
- [8] Tang Jin-Fa, Gu Pei-Fu, Liu Xu, *et al.* Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University press (唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社), 2006: 154-160.
- [9] Lissberger P H. Coatings with induced transmission [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(1): 95-104.
- [10] Macleod H A. Thin Film Optical Filters [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, Third Edition, 2001: 348-377.
- [11] Sytchkova A. Reliable deposition of induced transmission filters with a single metal layer [J]. *APPLIED OPTICS*, 2011, 50(9): C90-C92.
- [12] Yu Tian-Yan, Qin Yang, Liu Ding-Quan. Investigation of the crystal and optical properties of ZnS films deposited at different temperature [J]. *Acta Physica Sinica*. (于天燕, 秦杨, 刘定权. 沉积温度对硫化锌 (ZnS) 薄膜的结晶和光学特性影响研究, 物理学报), 2013, 62(21).
- [13] Zhao Pei. Research on Ultra-thin Silver Film and Broadband Dichroic Filter [D]. Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, 2008. (赵培. 超薄 Ag 膜特性和宽光谱分色片研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2008.)
- [14] Mittal K L. Adhesion measurement of thin films [J]. *Elec-*

-
- trocompon. Sci. Technol.* 1976, **3**(1): 21-42.
- [15] Yu Tian-Yan. Research on Broadband Infared Beam Splitter and Related Technologies[D]. Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, 2011.(于天燕. 红外宽光谱分束器及相关技术研究[D]. 中国科学院研究生院, 2011.)