

Article ID: 1004-4213(2011)01-0005-4

可见/红外宽光谱分色片偏振调控的设计*

李大琪, 刘定权, 张凤山

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要:针对光学系统中可见/红外宽光谱分色片的偏振特性, 采用诱导透射法设计了满足偏振遥感光学系统能量要求的可见/红外宽光谱分色片, 并对其偏振特性进行了分析. 通过计算获得了透射带 400~900 nm 可见/红外宽光谱分色片的偏振情况, 采用等效层理论在其基底背面设计了偏振调控膜系, 对分色片透射带的偏振度加以调控. 使用 needle 优化算法, 设定了不同优化目标, 得到了三种不同的设计结果, 在可见光波段的偏振度范围分别为 0.013~0.0376、0.068~0.108 和 0.098~0.147. 设计结果显示分色片透射带偏振特性在一定程度上可调, 调控后可以满足系统对透射光在不同偏振度下的要求.

关键词:薄膜; 可见/红外宽光谱分色片; 对称等效层; 偏振调控

中图分类号: O484

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114001.0005

0 引言

偏振遥感在云和大气气溶胶的探测、地质勘探、土壤分析、环境监测、资源调查、农作物估产、农牧业发展、海洋开发利用等方面具有重要应用价值^[1]. 美国研制的地球观测扫描偏振计 (Earth Observing Scanning Polarimeter, EOSP) 在 12 个光谱波段里 (410~2 250 nm) 同时测量辐射率和偏振度. 法国研制的 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 仪器主要任务是以不同的视角测量由地球-大气系统反射的太阳辐射的光谱双向反射比和偏振度.

可见/红外宽光谱分色片具有透射可见近红外波段、反射中远红外波段的性质, 被广泛应用在航空航天多光谱遥感仪器中. 在 0.4~1.2 μm 的可见近红外波段, 根据诱导透射原理, 利用介质层降低金属层的反射, 增加入射光波的透射率; 在 2~15 μm 的中远红外波段, 利用金属高反射的性质反射入射光波, 从而在宽光谱范围内实现可见近红外与中远红外光谱的分离. 这种介质/金属/介质型分色片结构简单, 制备容易, 是目前遥感仪器中宽光谱分色片的主要形式.

目前对可见/红外宽光谱分色片的研究工作主要集中在元件的光学能量及元件制备的工艺控制上^[2-4]. 而如何对元件的偏振度进行控制, 从而改善整个系统的偏振灵敏度等方向的研究工作甚少, 本

文的设计工作就是围绕这点而展开.

1 理论依据

1.1 主膜系设计依据

为保证分色片具有透射可见近红外波段、反射中远红外波段的性质, 其主膜系仍然采用了介质/金属/介质型诱导透射的设计思想. 其理论依据为: 势透射率 Ψ 定义为透过薄膜系统的光能量 (透射率 T) 与进入薄膜系统的光能量 $(1-R)$ 的比值, 即

$$\Psi = T / (1 - R) \quad (1)$$

关于势透射率的结论^[5]有: 势透射率不仅和金属层的光学常量有关, 而且和基片以及后置膜堆的光学导纳也有关. 当合理的匹配基片以及后置膜堆的各项参量后, 可以实现最大的势透射率 Ψ_{max} . 最大势透射率和周围的介质无关, 只和金属层的光学常量和厚度有关. 当金属层的厚度和光学常量被确定后, 整个膜系的最大势透射率已经确定了.

1.2 偏振调控膜系的设计依据

在主膜系的背面设计偏振度调控膜系, 从而达到对元件偏振度调控的目的. 设计是采用了对称等效层的设计思想.

以最简单的对称膜系 (pqp) 为例, 来说明周期性对称膜系在数学上存在一个等效折射率概念^[5]. 这个膜系的特征矩阵为

基金项目: 中国科学院上海技术物理所三期创新 (No. C2-48) 资助

第一作者: 李大琪 (1980-), 女, 助理研究员, 主要研究方向为光学薄膜. Email: lidaiqi@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2010-06-24; 修回日期: 2010-08-12

$$M_{\text{pqp}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_p & \frac{i}{\eta_p} \sin \delta_p \\ i\eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_q & \frac{i}{\eta_q} \sin \delta_q \\ i\eta_q \sin \delta_q & \cos \delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_p & \frac{i}{\eta_p} \sin \delta_p \\ i\eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于对称膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵

具有相同的特性,可以假定以相似的形式来表示

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & \frac{i}{E} \sin \Gamma \\ iE \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此,可以用一层特殊的等效单层膜来代替对称膜系. 这层等效膜的折射率 E (等效折射率) 和位相厚度 Γ (等效位相厚度) 可由式(4)决定.

$$E_{\text{pqp}} = \left\{ \left\{ \eta_p^2 \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \left(\frac{\eta_p + \eta_q}{\eta_q} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p - \eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] \right\} / \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p + \eta_q}{\eta_q} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p - \eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] \right\}^{1/2}$$

$$\Gamma_{\text{pqp}} = \arccos M_{11} = \cos^{-1} \left[\cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q + \eta_p}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \sin \delta_q \right] \quad (4)$$

1.3 设计方法

本文使用 needle 法进行设计. 根据最优控制的原理, 寻找到膜系最适合插入新层的位置, 同时与局部优化的方法相结合, 可以不断地增加总的物理厚度来优化设计, 对各种类型的膜系都取得了良好的效果.

采用了 TFCALC 设计软件来完成设计, 优化的评价函数为^[6-7]

$$F = \left[\left(\frac{1}{m} \right) \sum_{j=1}^m \left| I_j D_j \left(\frac{C_j - T_j}{N_j \text{ Tol}_j} \right) \right|^k \right]^{1/k} \quad (5)$$

式中: m 为目标的数目; k 为 method 的乘方; I 为光源的强度; D 为探测器的效率; T 为连续目标值; C 为反射率, 透射率等目标波长和偏振条件下的计算值; Tol_j 为目标的公差; N 为目标的标准化因子.

2 设计结果

以 XX 系统为例, 光学系统要求可见/红外分色片的指标为: $T \geq 75\%$, $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$; $R \geq 90\%$, $10 \sim 13 \mu\text{m}$.

设计采用的膜系结构为: $\text{Ta}_2\text{O}_5 \backslash \text{Ag} \backslash \text{Ta}_2\text{O}_5$, 其中 Ta_2O_5 的光学常量为 2.05, Ag 采用理论的光学常量(图 1).

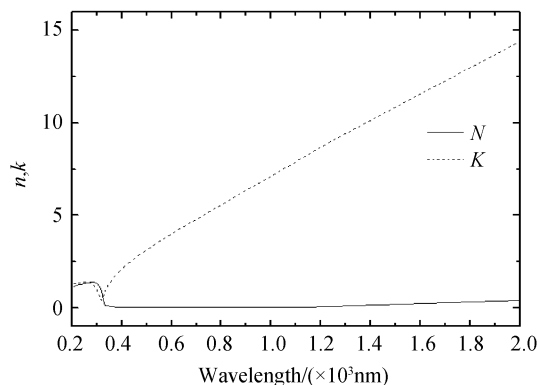


图 1 Ag 的光学常量
Fig. 1 Optical indexes of Ag

图 2 为本文设计结果, 可以看出, 设计完全满足系统的光学能量要求. 通过对诱导透射理论分析可知, 可见/红外宽光谱分色片的反射带特性主要由金属 Ag 的特性而决定, 若想通过背面膜系对反射带的偏振特性进行调控效果不明显. 这一特性对 $(0.5\text{HL}0.5\text{H})^m$ 和 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^m$ 结构的分色片也是一样的^[8]. 因此对分色片的偏振调控主要集中在分色片的透射通道.

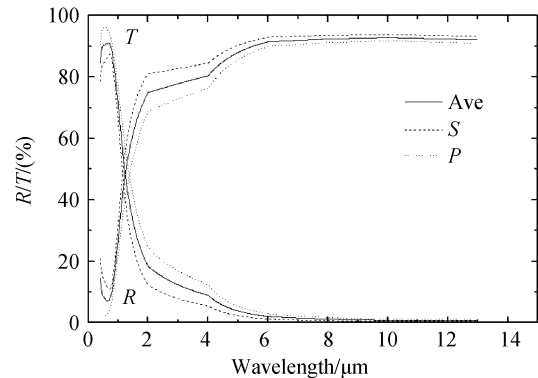


图 2 分色片设计 1 曲线
Fig. 2 Calculated transmittance of the broadband filter

偏振度 P 计算公式为

$$P = \left| \frac{T_P - T_S}{T_P + T_S} \right| \quad (6)$$

式中 T_P 、 T_S 分别为在 P 偏振光和 S 偏振光状态下测得的实测透过率;

计算后得出, 分色片设计 1 在 $400 \sim 900 \text{ nm}$ 范围内的偏振度变化为 $0.0324 \sim 0.07$.

利用等效层理论在设计 1 的基底背面设计偏振调控膜系. 设计中采用的材料为: $\text{H-Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{M-Al}_2\text{O}_3$ 、 L-SiO_2 , 入射角为 45° . 膜系初始结构为: 基底 $|d_1\text{L}d_2\text{H}d_3\text{M}d_4\text{H}d_5\text{M}d_6\text{L}|$ 空气, 其中 d 为膜层厚度. 设定不同的优化目标值, 采用 needle 法, 其优化结果为设计 2~4, 设计结果详见图 3~5. 从图

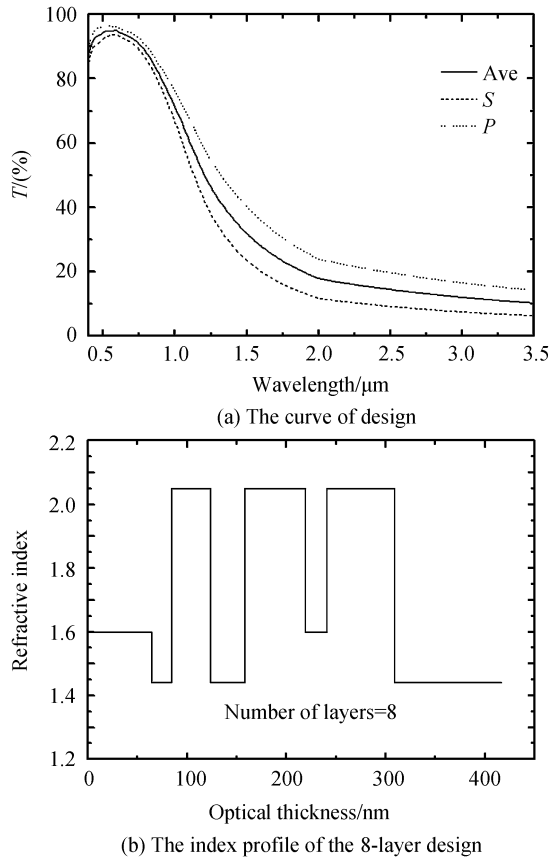


图3 分色片设计2的偏振度 P 变化范围为 $0.013 \sim 0.0376$
 Fig. 3 The polarization range of the design 2 is $0.013 \sim 0.0376$

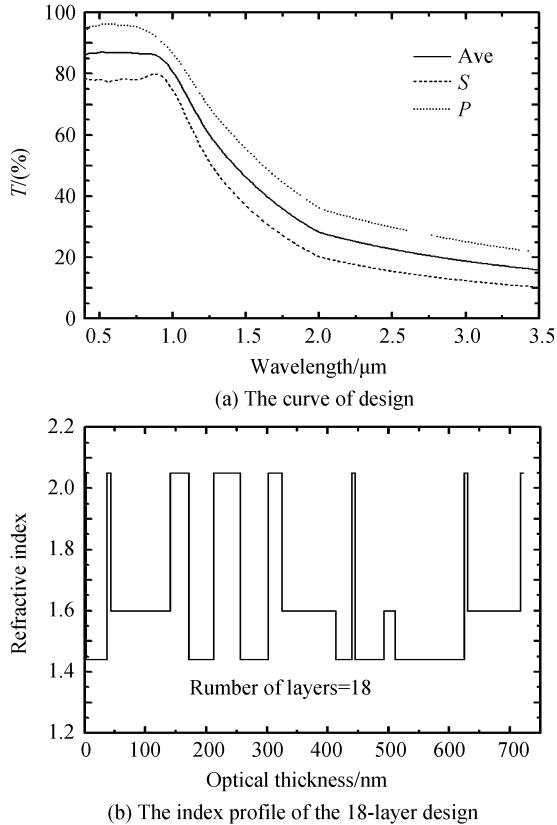


图4 分色片设计3的偏振度 P 变化范围为 $0.068 \sim 0.108$
 Fig. 4 The polarization range of the design 3 is $0.068 \sim 0.108$

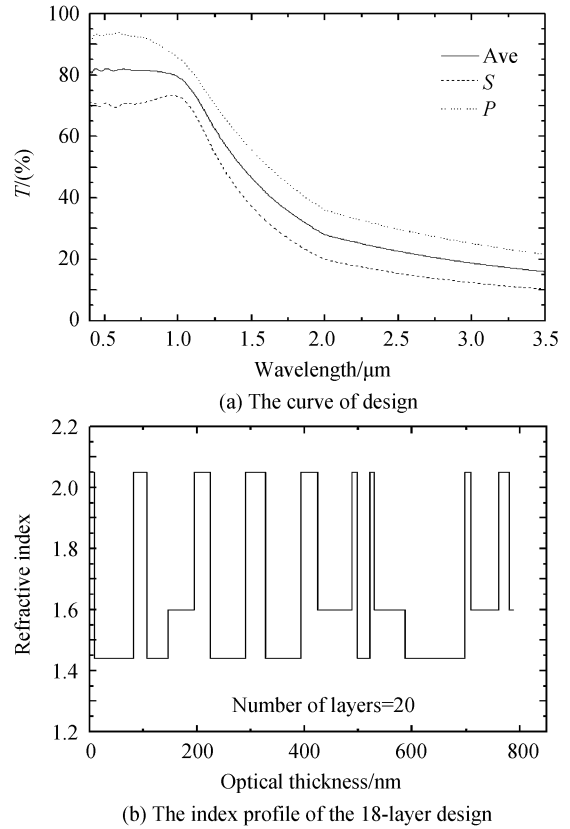


图5 分色片设计4的偏振度 P 变化范围为 $0.098 \sim 0.147$
 Fig. 5 The polarization range of the design 4 is $0.098 \sim 0.147$
 3~5可以发现,可见/红外宽光谱分色片的透射带具有不同的偏振特性,其偏振状态在一定程度上可以调控。

为了更好地进行偏振调控情况对比,在分色片的透射通道内(400~900 nm)选取以下波长进行计算:400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm、900 nm,具体情况见表1。

表1 分色片偏振变化情况对比
 Table 1 Comparison of the polarization in different wavelengths between difference designs

The polarization of different wavelengths/nm	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4
400	0.07	0.029	0.086	0.119
500	0.06	0.021	0.103	0.136
600	0.056	0.013	0.105	0.144
700	0.039 8	0.017	0.101	0.135
800	0.032 7	0.022 8	0.09	0.124
900	0.045 5	0.037	0.068	0.098
The range of the polarization	$0.032 4 \sim 0.07$	$0.013 \sim 0.037 6$	$0.068 \sim 0.108$	$0.098 \sim 0.147$

从表1可以发现:通过本方法设计出的可见/红外宽光谱分色片,在其透射带内,偏振调控明显,可以满足不同偏振度要求情况下的使用。

3 结论

采用诱导透射理论设计了满足偏振遥感光学系统能量要求的可见/红外宽光谱分色片,并利用等效层理论在其基底背面设计了偏振调控膜系,对分色片透射带的偏振度加以调控.使用 needle 优化算法,设定了不同优化目标,得到了三种不同的设计结果.设计结果显示分色片透射带偏振特性在一定程度上可调,调控后可以满足系统对透射光在不同偏振度下的要求.

参考文献

- [1] ZHANG Chao-yang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, *et al.* The present research and developing trend of polarization remote sensing[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(12): 1237-1240.
张朝阳,程海峰,陈朝辉,等.偏振遥感的研究现状及发展趋势[J].*激光与红外*,2007,**37**(12):1237-1240.
- [2] LIU Yong-qiang, YAN Yi-ming, YAN Chong-ming, *et al.* Spectrum filter for transmitting in $0.45\ \mu\text{m}\sim 1.6\ \mu\text{m}$ and reflecting in $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(4): 666-668.
刘永强,杨益民,杨崇明,等.透 $0.45\ \mu\text{m}\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 反 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 宽光谱分色滤光片的制备[J].*应用光学*,2009,**30**(4): 666-668.
- [3] LIN Bing, YU Tian-yan, LIU Ding-quan, *et al.* Design and deposition of infrared/visibl widebrand color separation fliters[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2004, **23**(3): 293-395.
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**(3):293-395.
- [4] DIMA I, POPESCU B, IOVA F, *et al.* Influence of the silver layer on the optical properties of the $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ multilayer [J]. *Thin Solid Films*, 1991, 200(1): 11-18.
- [5] 唐晋发,顾培夫,刘旭.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006:154-158.
- [6] ZHOU Jian, LIN Yong-chang. New method of coating design-needle method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1445-1449.
周健,林永昌.一种新的膜系设计方法-Needle 法[J].*光学学报*,1997,**17**(10): 1445-1449.
- [7] 高大明. TFCALC Translation via JCOP Ltd. [EB/OL]. 2010-05-14 [2010-08-17]. <http://wenku.baidu.com/view/ab21edc789eb172ded63b70e.html>.
- [8] MA Xiao-feng, SHEN Yan-ming, SU Wei-tao, *et al.* Control of polarization for broadband dichroic filter at oblique incidence [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(30): 7513-7517.

Control of Polarization for the Visible Infrared Broadband Dichroic Beamsplitter at Oblique Incidence

LI Da-qi, LIU Ding-quan, ZHANG Feng-shan

(Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: A visible/infrared broadband dichroic beamsplitter which can meet the light energy boundary of polarization remote sensing optical system was designed with the induced-transmission method. The design was based on polarization characteristics of the visible/infrared broadband dichroic beamsplitter, and actual characteristics of the dichroic beamsplitter were analyzed. When the polarization characteristics at the transmission spectrum from 400 nm to 900 nm was calculated, the coating series was designed on the back of substrate with the equivalent layer theory to control the polarization character of the dichroic beamsplitter. A needle optimal algorithm was adopted to set various optimization objectives, and came out with three different designs which have respective polarization ranges of $0.013\sim 0.0376$, $0.068\sim 0.108$ and $0.098\sim 0.147$. The design result shows that the polarization characteristics of dichroic beamsplitter at transmission spectrum are controllable to some extent, and the design can meet the needs of different polarization characteristics in optical system.

Key words: Thin film; Visible infrared broadband dichroic beamsplitter; Symmetrical equivalent layers; Polarization control