

# 红外/可见光宽带分色片设计与制备

林炳, 于天燕, 刘定权, 张凤山

(中国科学院上海技术物理研究所 光学薄膜与材料研究室, 上海 200083)

**摘要:** 红外、可见光分色片对成像光谱技术起着至关重要的作用, 应用诱导增透概念设计宽光谱分色片, 并在薄膜制备过程中, 采用了光学控制结合晶体振荡控制的方法获得了符合实用要求的红外/可见分色片, 其 400nm ~ 900nm 范围 45 度入射光透过率大于 80%, 在 1325nm ~ 13000nm 平均反射率大于 90%, 其光谱特性在已报道过的同类分色片中位于前沿。

**关键词:** 光学薄膜; 分色片; 诱导增透  
**中图分类号:** TB443 **文献标识码:** A

## DESIGN AND DEPOSITION OF INFRARED/VISIBLE WIDE-BAND COLOR SEPARATION FILTERS

LIN Bing, YU Tian-Yan, LIU Ding-Quan, ZHANG Feng-Shang

(Optical Films and Material Lab, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Infrared/visible color separation filters take an important role in imaging spectrum technique. We applied the concept of induced transmission to design the filter, and combined optical distinguish method and quartz crystal monitor XTC-2 technique to control the thickness of each coating accurately. Finally the satisfied wide bandwidth filter was obtained. Its spectrum result is in the front of the same kind of filters reported before.

**Key words:** optical thin film; color separation filter; induced transmission

### 引言

成像光谱仪能够在连续光谱段上对同一目标同时成像, 并能直接反映出被观测对象的光谱特征。

其中部分光学系统结构如图 1, 主光学系统为双抛物面反射式望远镜结构。从主光学系统出来的平行光束经红外/可见光分色片 D1 分成两束。D1 称为第一分色片, 它将地球辐射的光能量分成红外与可见光两部分。D1 分光性能的优劣对于后级的成像光谱质量起着重要的作用, 优良的分色片能有效降低对光谱仪后级光学系统的技术压力。先前也有人<sup>[1]</sup>也做过类似的工作, 其性能指标还不够理想。

根据光机系统的要求, 作为第一分色片的具体指标如下(其中  $T_{ave}$  与  $R_{ave}$  分别表示平均透射率与平均反射率 45° 测量):

i) 透射率要求:  $0.42\mu\text{m} \sim 0.70\mu\text{m}$   $T_{ave} \geq 75\%$ ; 0.

$80\mu\text{m} \sim 0.90\mu\text{m}$   $T_{ave} \geq 70\%$ ;

ii) 反射率要求:  $1.30\mu\text{m} \sim 1.65\mu\text{m}$   $R_{ave} \geq 75\%$ ; 3.

$50\mu\text{m} \sim 13.00\mu\text{m}$   $R_{ave} \geq 90\%$ 。

### 1 设计

#### 1.1 膜系的确定

选择在可见区有尽量高透射率的基底材料, 如二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ), K9 玻璃等就可以满足要求。

制备这样的滤光片应用金属膜的诱导增透滤光片膜系比用介质膜堆的组合来得更容易一些, 而且在长波处没有烦人的透射次峰<sup>[2]</sup>。

根据金属透射率定义式:

$$\psi_a = \frac{T}{1-R} \quad (1)$$

金属膜的透过特性不仅取决于金属膜本身的光学常数(折射率  $n$ , 消光系数  $k$ ) 和厚度  $d$ , 而且和相邻介质的导纳密切相关。我们利用诱导透射概念仔细设计金属膜出射的负载导纳可以开发出金属的最大透

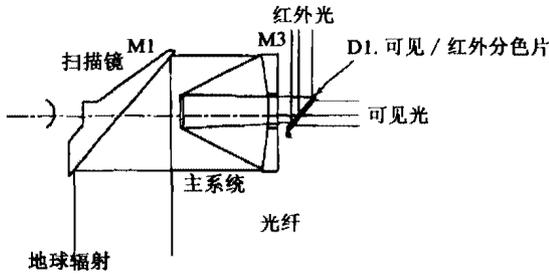


图1 卫星成像光学系统的一种前级光学结构  
Fig.1 The front part of a satellite imaging optical system

射率<sup>[3]</sup>.

由诱导透射的理论可知,吸收膜系的势透射率等于各层膜势透射率乘积,即:

$$\psi_a = \prod_{j=1}^l \psi_j, \quad (2)$$

考虑到如果将金属膜层细分得太薄会给制备带来很大的困难,我们只用两层金属膜,而不用更多层.鉴于透射带宽而且中远红外的反射率要求高的特点,我们选用2层金属膜间隔3层介质膜的结构.

1.2 材料的选择

金属膜,如银、铝和金等对红外光都有良好的反射作用,因为金属在红外波段的消光系数远大于折射系数( $k \gg n$ ).考虑到银膜的在中远红外的反射率比较高,且在可见区最大势透射率(相同的厚度下)也比常用的铝和金较高<sup>[4]</sup>,我们选取银作为这一分色片的金属膜.对于获得波长  $\lambda_0$  最大反射率的所需膜厚条件有如下的公式<sup>[5]</sup>:

$$h > \lambda_0 / 4\pi nk = d, \quad (3)$$

即只要金属膜层的厚度  $h > d$  就可以获得最大的反射率.对于  $\lambda_0 = 4.0\mu\text{m}$  处的银膜  $nk = 35.1$ ,则满足最大反射率的最小金属膜的厚度  $d \approx 10.5\text{nm}$ .

同时,在可见光区及近红外区,银的消光系数不是很大,其最大透射率可利用介质膜将其诱导出来.这里我们选取的介质膜材料是 ZnS,其折射率约为 2.3,可以近似认为其消光系数为零.

据此,我们就确立了这样的初始膜系:用 H 代表 ZnS,用 A 代表 Ag,用物理厚度表示(单位:nm):  
空气 | 50H | 5.0A | 100H | 5.0A | 50H | 基底.

1.3 膜系优化设计

确定了初始膜系及材料之后,再进一步优化膜层厚度,使用从美国购买的膜系优化设计软件——FilmWazard32 程序进行优化设计.两种材料的光学常数是从实验中获得的,其保持不变,以各层膜的厚度作为变量进行搜索;选择程序中的全局优化方法

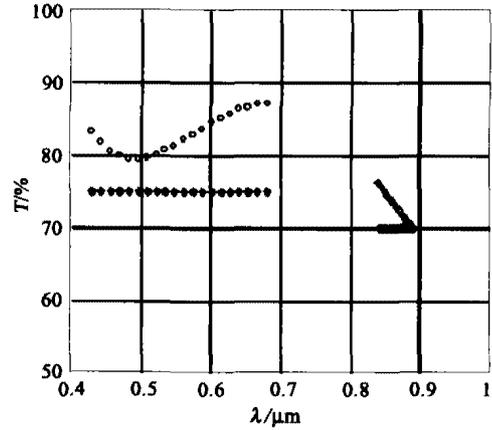


图2 透射率目标曲线与设计曲线  
Fig.2 Transmissivity target and design curve

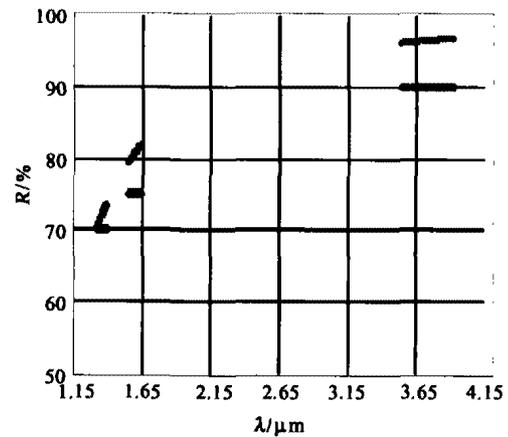


图3 反射率目标曲线与设计曲线  
Fig.3 Reflectivity target and design curve

(Global Modified Levenberg - Marquardt)作优化.

如图2、图3所示,其中菱形曲线为目标值,圆形曲线表示优化值,在这些目标点位置理论能够达到设计要求.

表1为优化后的结果,根据表1所优化得到的各层厚度值,利用多层膜计算公式(4)和(5)计算出反射率与透射率曲线,如图4所示.

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \cdot \sin\delta_j \\ i\eta_j \cdot \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中第j膜的位相  $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j$

$$\begin{cases} R = \left( \frac{\eta_0 \cdot B - C}{\eta_0 \cdot B + C} \right) \cdot \left( \frac{\eta_0 \cdot B - C}{\eta_0 \cdot B + C} \right) \\ T = \frac{4\eta_0 \cdot \eta_g}{(\eta_0 \cdot B + C) \cdot (\eta_0 \cdot B + C)^*} \end{cases}, \quad (5)$$

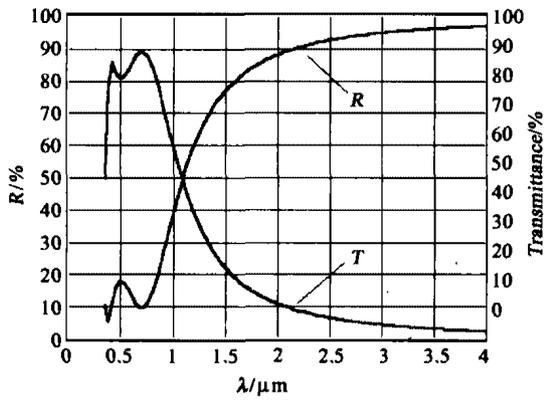


图4 理论设计透射率/反射率曲线  
Fig. 4 Calculated transmissivity/reflectivity curve

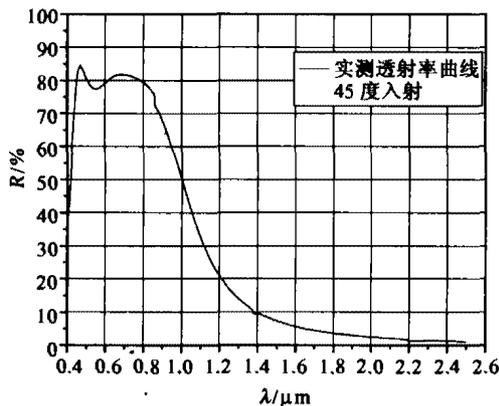


图5 实测样品透射率曲线(45度入射)  
Fig. 5 Measured transmissivity at 45deg. incidence

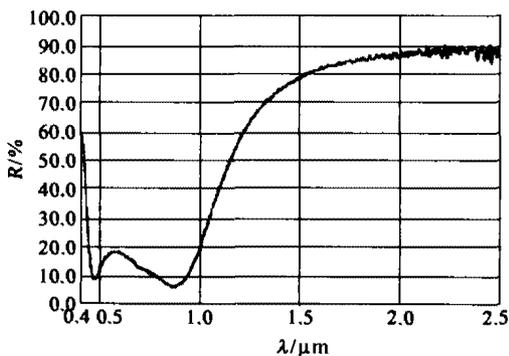


图6 实测样品反射率曲线(45度入射)  
Fig. 6 Measured reflectivity at 45deg. incidence

式中  $B, C$  分别代表总膜系的特征矩阵;  $T$  和  $R$  分别为膜系透射率与反射率;  $\eta_j, \eta_0$  和  $\eta_k$  分别为第  $j$  层膜, 入射介质和基片的复折射率。

理论上透过率在可见及近红外区达到 80% 以上, 反射率在 2 微米之后便可达到 90%, 对于如此要求的光谱特性的分色片, 其制备是可能的。

表1 优化设计后的膜系结构  
Table 1 Film system after optimized

膜系	ZnS	Ag	ZnS	Ag	ZnS
初始值	50.0	5.0	100.0	5.0	50.0
优化值	18.15	3.29	31.28	6.57	17.59

## 2 制备

利用光学监控方法确定了 ZnS 膜的物理厚度与光学厚度之间的比例关系后, 再用晶振仪直接控制其物理厚度。由多次的材料实验获知, 银的吸收率要小才能保证其高诱导透射率, 就必须保证银的高蒸发速率, 对本实验而言, 银的蒸发速率应在 1nm/s 以上, 否则银的光学常数就偏离设计所使用的光学常数很大。

但是大速率又使得 3 ~ 5nm 厚的银膜要精确控制尤其困难。对此, 我们通过加快档板切换的速度, 同时使用晶体振荡控制器 XTC-2 实现了误差在 0.5nm 以内 Ag 厚度的精确控制。

样品的实验结果如图 5 与图 6 所示, 在 400nm ~ 900nm 实测透射率平均达到 80%, 而 1.3μm 波长处的反射率到达 70%, 长波反射率根据银的光学特性, 必定高于 2.5μm 处的 89%。

## 3 结语

根据诱导增透原理设计了宽带分色片基本的膜系, 然后运用 FilmWizard32 优化设计程序对制作分色片的两种材料的膜厚进行了优化, 并于制备过程中攻克了超薄银膜的控制的关键技术。经过多次的实验, 制备出了光谱特性满足要求的第一分色片。

## REFERENCES

- [1] LI Heng-Yi, LI Qiong-Rui. Design of wide-band color separation filter with 0.4-1.1μm high transmission and 3-15μm high reflection[J]. *Laser & Infrared*, (李恒义, 李琼瑞, 0.4-1.1 微米高透, 3-15 微米高反的宽带光谱分色片的设计, *激光与红外*), 1979, 10: 1-11.
- [2] TAN Jin-Fa, ZHENG Quan. *Applied Thin Film Optics*[M]. Shanghai: Science Press Shanghai (唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学*, 上海: 上海科学出版社), 1980, 270-285.
- [3] JIANG Zhen-Zi, JIANG Feng-Wen. Characteristic analysis and preparation of induced transmission filters[J]. *Optics & Mechanics*, (姜贞子, 姜凤文, 诱导透射滤光片特性分析与制备, *光学机械*), 1990, 113(2): 28-32.
- [4] MI Qian, LIU Wei-Guo. Realization and base process of color separation filter[J]. *Journal of XiAn University of Technology*, (弥谦, 李卫国, 分色滤光片的实现及基本工艺, *西安工业学院学报*), 1997, 17(2): 117-120.
- [5] Carli B. Reflectivity of metallic films in the infrared[J]. *Journal of Optical Society of America.*, 1977, 67(7): 908-910.