

用于气象卫星的光学涂层

许步云 朱翠媛 朱炳生

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——本文介绍几种用于气象卫星的光学薄膜器件的基本设计原理、结构及用途。文中列出各器件的膜系、膜料及实测的光谱曲线。这些器件都已成功地获得应用。

关键词——分色片, 组合滤光片, 带通滤光片。

1. 引 言

通常, 气象卫星借助于多通道扫描辐射计获得地球表面及大气层的各种资料, 我国发射的气象卫星, 其中主要的遥感仪器就是一台具有五通道的光学扫描辐射计。该仪器的五个通道是通过多种光学涂层构成的光学薄膜器件而实现的。在辐射计光学系统中, 除具有高效的反射膜、增透膜外, 尚需设置一些具有特定功能的光学薄膜器件, 例如宽带分色片、可见通道滤光片、红外通道滤光片等。这些薄膜器件在设计与制造上不仅要有好的光学性能, 还必须保证有高的可靠性。以下就我国已成功地运用于气象卫星工程中的一些光学薄膜器件作一概略介绍。

2. 宽带分色片

宽带分色片可将来自地球的光辐射分离成几路, 例如透可见、反红外分色片; 反可见、透近红外分色片等等。宽带分色片的设计可以采用金属-介质膜组合及全介质膜两种方式来实现。

2.1 透可见、反红外宽带分色片

气象卫星中实际使用的一种透可见、反红外宽带分色片如图 1 所示, 它是一种金属-介质膜组合结构。它依据文献[1]提出的势透射率概念设计而成。图 1 中, 透过界面 b 的光能量 T 与透过界面 a 的光能量 $1-R$ 之比定义为势透射率 ψ , 即

$$\psi = \frac{T}{1-R};$$

对于透射光束来说,为提高 T , 必须提高 ψ , 减少 R , 势透射率 ψ 决定于金属膜的光学常数和

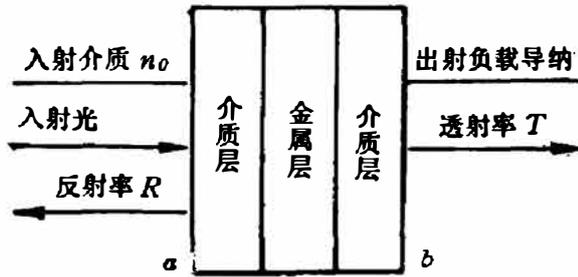


图1 金属-介质组合膜分色片结构

Fig. 1 The assembly of beam splitter with metal-dielectric layers.

出射负载导纳, 而与入射介质无关. 为提高 ψ , 既要设计最佳出射负载导纳. 膜系的实际透射率 T 不仅与势透射率有关, 还和入射介质有关. 把金属层和出射的负载导纳组合成为新的基板, 设计一个减反膜, 使入射介质与此新的基板匹配, 即能减少 R , 从而提高透射率 T . 在红外部分, 由于明显偏离最佳匹配条件将呈现高的金属反射特性. 经计算表明, 膜系结构为

$$n_s | 13-30\text{nmZnS} | 11-18\text{nmAg} | 25-40\text{nmZnS} | n_0,$$

可以得到满意的透可见、反红外的宽带分色效果. 其中 n_s , n_0 分别是基片和入射介质的折射率, 此处 $n_s=1.47$ (石英), $n_0=1.0$ (空气). 在实际制作中, 对各层膜用不同的基板温度, 既可得到理想的分色曲线, 又能提高膜层的牢固度, 从而提高了可靠性. 图 2 是实测的透可见、反红外分色曲线.

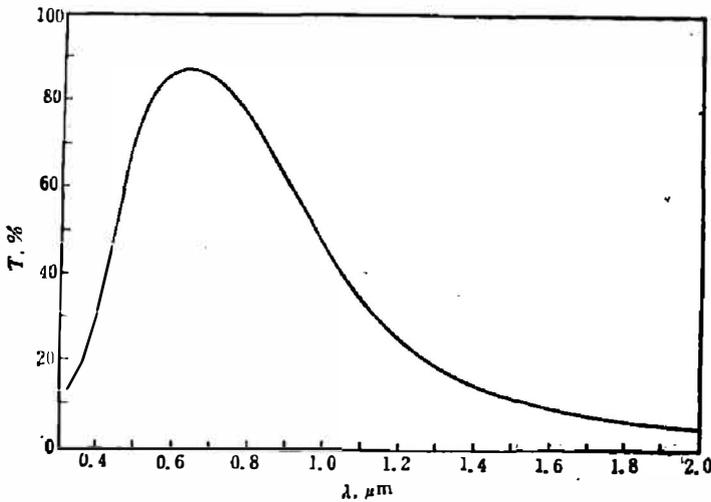


图 2 透可见、反红外分色片实测曲线

Fig. 2 The measured curve of the beam splitter of transmitting in visible and reflecting in infrared region.

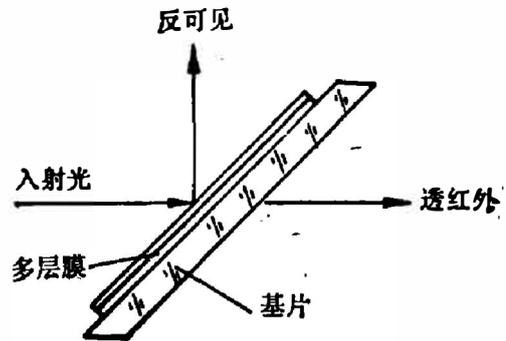


图 3 反可见、透近红外分色方式

Fig. 3 The splitting way of reflecting in visible and transmitting in near-infrared region.

2.2 反可见、透近红外宽带分色片

图 3 所示的反可见、透近红外分色片是由全介质多层膜镀在一块平板玻璃上形成的. 由于星用的光学涂层要求具有高的可靠性, 在不胶合的情况下, 通常在可见区使用的软膜 (ZnS , MgF_2 等) 已不适用, 因为欲得到整个可见区的高反射, 膜层层数相当多, 这样的多层膜的牢固度及长期的稳定性可靠性都很差. 据此, 设计时选取硬膜 (ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 等) 较为合适. 在膜料的实际选用上, 采用 ZrO_2 为高折射率材料; SiO_2 为低折射率材料, 由此两种材料组成多层膜. 膜系设计的理论基础是基于光学薄膜设计的长波通设计方法^[2].

在可见区通常长波通的基本膜系是

$$n_s | (0.5HL0.5H)^s | n_0;$$

其中, n_s, n_0 分别是基板折射率和入射介质折射率; H 是光学厚度为 $1/4$ 设计波长的高折射率层; L 是光学厚度为 $1/4$ 设计波长的低折射率层; S 为基本周期数. 仅上述一个基本膜系所得的反射带窄, 为保证宽的可见区中都有较高的反射率, 需要用几个这样的基本堆连接. 经计算, 下述膜系

$$n_s | 0.77(0.5HL0.5H)^{11} 0.84(0.5HL0.5H)^{10} (0.5HL0.5H)^{11} | n_0$$

能满足要求. 上式中 $n_s=1.47$ (石英), $n_H=1.9$ (ZrO_2), $n_L=1.44$ (SiO_2), $n_0=1.0$ (空气), 设计波长取 $\lambda=0.96\mu m$. 上述多层硬膜都是在带电子枪设备中进行制备的. 三个膜堆由三个控制波长分三次镀完. 膜系实验曲线如图 4 所示.

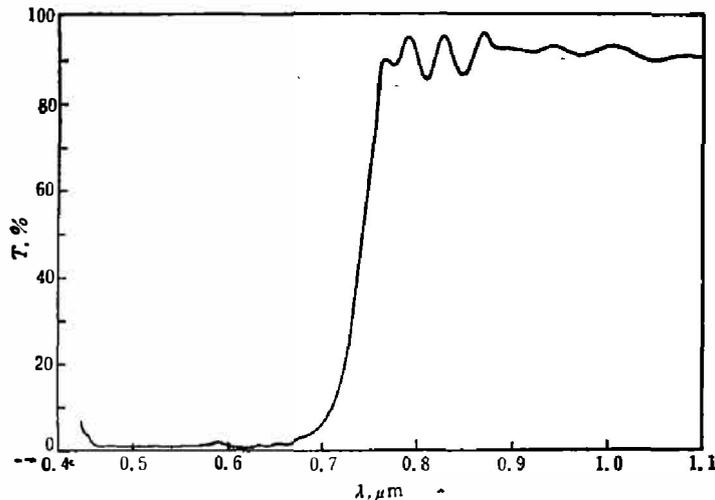


图 4 反可见、透近红外实验曲线

Fig. 4 The measured curve of the beam splitter of reflecting in visible and transmitting in near infrared region.

3. 可见三通道组合滤光片

该滤光片是风云一号气象卫星中使用的一个关键性光学薄膜器件, 使用时置于三元硅探测器的窗口. 探测器的敏感元面积为 1 mm^2 , 两个敏感元间间隔为 0.57 mm . 为此, 将该滤光片三个可见通道组合为一体, 其实际结构的设计见图 5.

3.1 三个可见通道的设计

对于图 5 中通道 1 和通道 2 的设计采取带通膜系加滤色玻璃胶合方式. 为使可见通道曲线更接近矩形, 多层膜系采用三半波结构:

$$\begin{aligned} & \text{石英基片} | HLH(HLHLHLH)^3 \\ & HLH | \text{空气} \end{aligned}$$

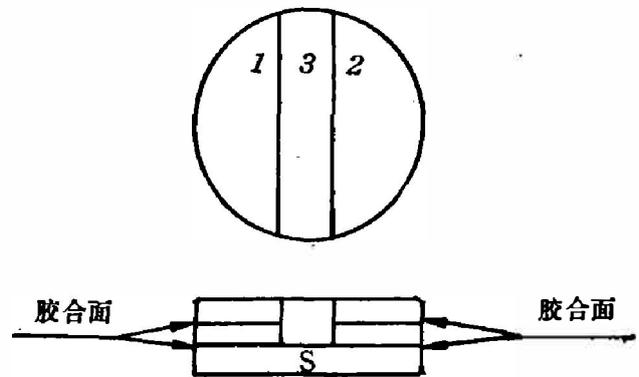


图 5 可见三通道组合滤光片结构图

Fig. 5 The structure of the combined filter with three channels in visible region.

其中, H 、 L 为通常的含义, 根据文献[2]西利带宽公式

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{2 \left(\frac{n_H}{n_L} - 1 \right)}{\left(\frac{n_H}{n_L} \right)^4} \right]$$

取 $n_H = 2.38$ (ZnS), $n_L = 1.38$ (MgF₂); λ_0 分别为 1 和 2 通道的中心波长; 求得上述膜系的相对带宽为 10.7%, 稍大于所需带宽. 用适当的滤色片与其胶合即能实现 1 与 2 所需的带宽. 滤色片尚可截除短波侧的次通带. 图 5 中的通道 3 可用 S 托片上的短波通膜系与适当的滤色片胶合而形成. S 托片上的长波通膜系还截除了通道 1 与 2 的长波侧次通带.

3.2 短波通膜系设计

图 5 中的 S 托片上短波通膜系设计 requirements 是: 在 $0.48 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 应有波纹小、透过率较高的通道; 在 $0.7 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 应有较好的截止特性. 设计中考虑到可靠性的要求, 在 S 托片胶合面上镀上经稍加修正的软膜短波通膜系

石英基片 | 1.2H1.1L(HL)⁶H1.1L1.2H | 空气;

式中, 取 n_H 为 2.35 (ZnS); n_L 为 1.38 (MgF₂). 修正的目的是使 $0.48 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 波长范围内透射带有较小的波纹. 在 S 托片非胶合面上镀以硬膜短波通膜系

石英基片 | (0.5LH0.5L)⁶ | 空气;

式中, $n_H = 1.9$ (ZrO₂), $n_L = 1.44$ (SiO₂). 该膜系使其截止带与上面软膜截止带连接, 实现 $0.7 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 范围的截止特性. 图 6 显示了可见三通道组合滤光片的三个通道实验曲线. 滤光片的胶合层都是光学环氧胶, 该胶层经高低温 ($+40^\circ \sim -40^\circ\text{C}$) 多次冲击不会改变其光谱特性.

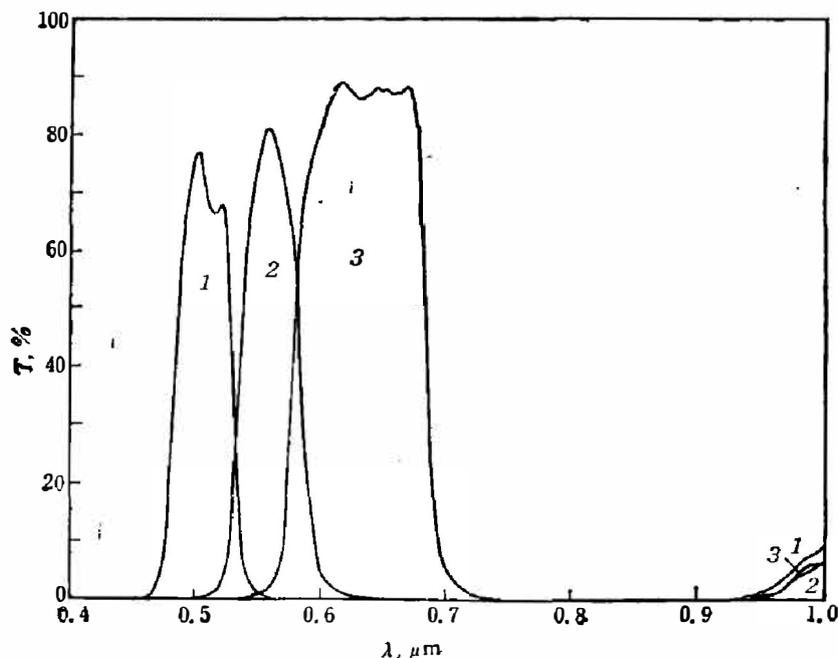


图 6 可见三通道实验曲线

Fig. 6 The measured curve of the combined filter with three channels in visible region.

4. 10.5~12.5 μm 红外通道滤光片

在气象卫星扫描辐射计中设置这一红外通道是为了获得红外辐射的气象资料。10.5~12.5 μm 通道形成方式有两种,其一是:设置一块 10.5 μm 的长波通滤光片,使其透射特性与碲镉汞探测器的长波下降特性结合,得到近似 10.5~12.5 μm 的通道;其二是:用 10.5 μm 长波通滤光片加长波边缘为 12.5 μm 的宽带通滤光片组合,用于碲镉汞探测器长波响应较高的场合。

4.1 10.5 μm 长波通滤光片

长波红外滤光片一般是用 Ge 作为基片材料,镀以 PbTe 及 ZnSe 或 ZnS 高低折射率多层膜,根据文献[2、3],长波通滤光片的基本膜堆为

$$(0.5LH0.5L)^4;$$

连接几个不同中心波长的基本膜堆可得到具有很宽截止区的红外长波通滤光片。经计算,下列膜系

$$\text{空气} \left| 1.5L0.32\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^3 0.56\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^5 \right| \text{Ge} \left| 0.88\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^2 \right. \\ \left. \left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right) \right|^7 1.5L \left| \text{空气} \right.$$

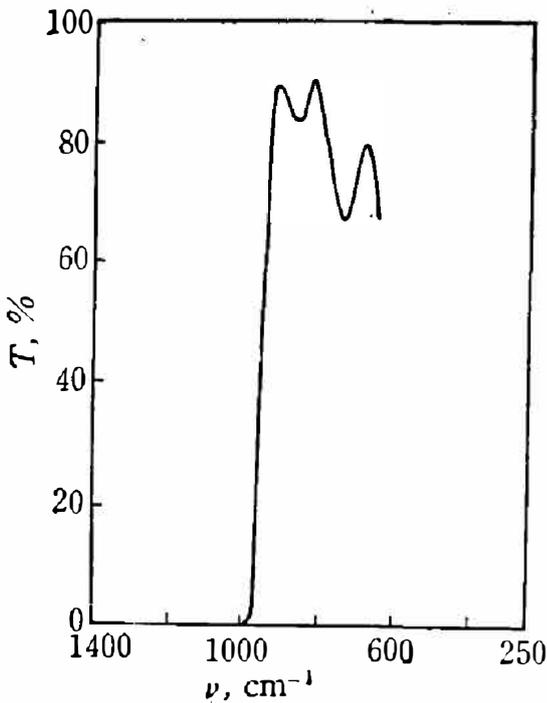


图7 10.5 μm 长波通滤光片实验曲线
Fig. 7 The measured curve of the long-pass band filter at 10.5 μm.

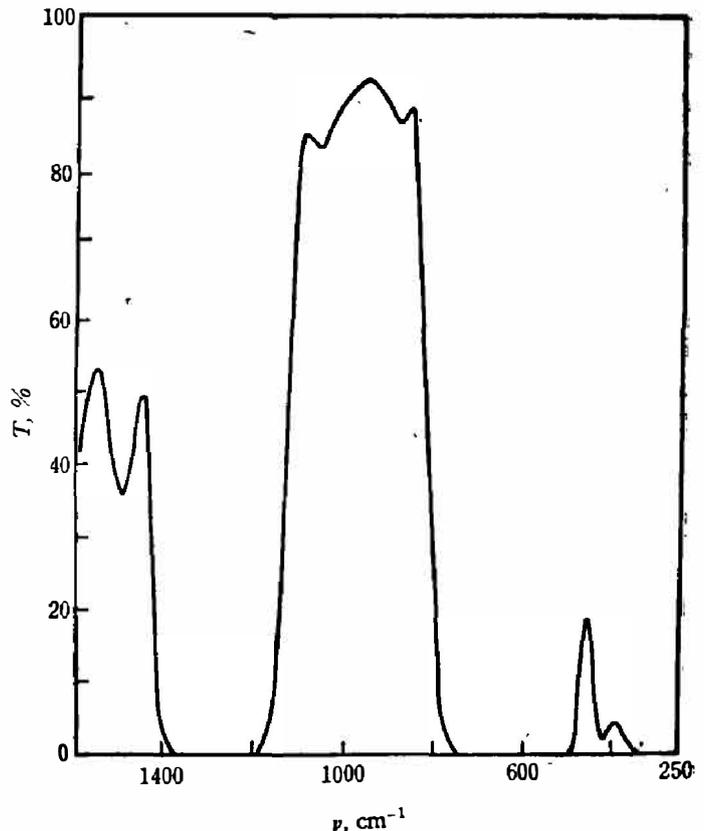


图8 红外宽带通滤光片(长波边缘为 12.5 μm) 实验曲线

Fig. 8 The measured curve of the broad-pass band filter in infrared region. (the edge of the long wavelength is 12.5 μm).

可以得到理想的 $10.5 \mu\text{m}$ 长波通滤光片。上式中, 高低折射率层的折射率分别是 5.5 (PbTe) 和 2.2 (ZnS), 设计波长取为 $7.2 \mu\text{m}$ 。实际制备的滤光片曲线如图 7 所示。

4.2 红外宽带通滤光片(透射带长波侧为 $12.5 \mu\text{m}$)

基本膜堆为 HLH 或 $(LHL)^s$, 能得到最宽的宽带滤光片。S 幂次越高, 透射带边缘越陡。实用的一种膜系是

$$\text{空气} | \text{Ge} | L(LHL)^4 | \text{空气},$$

使用的膜料也是 PbTe 和 ZnS。红外宽带滤光片实测曲线如图 8 所示。

本节中所述红外长波通滤光片及红外宽带通滤光片都使用了 PbTe 半导体材料, 因为该材料有很高的折射率, 对设计有利, 但镀制 PbTe 膜时应特别注意工艺, 尤其是控制基板温度及蒸发温度, 只有最佳工艺才能使 PbTe 膜有最小的吸收。我们制备红外滤光片用自己精心制备的具有“软”特性的 PbTe 镀膜料^[4], 为获得优质红外滤光片提供了必要的条件。

5. 结 语

气象卫星用的光学涂层除了要满足所需要的光谱特性外, 对膜系选择、结构设计、膜料的选择以及工艺的选择都要考虑实际使用的可靠性。对所制备的薄膜器件都要经过严格的环境模拟考验, 才能提供使用。文中介绍的几种器件都在卫星上获得成功的应用。气象卫星上的实测数据证明, 这些光学薄膜器件的性能都能满足气象卫星实用的要求。

参 考 文 献

- [1] Baumeister P. W., *Applied Optics*, **8**(1969), 2:423.
- [2] Macleod H. A., *THIN-FILM OPTICAL FILTERS*, LONDON: ADAM LTD, (1969), 246~251.
- [3] 严义坝, 红外物理与技术, (1973), 6:61.
- [4] Yen Yihsun et al., *Applied Optics*, **23**(1984), 20:3597.

OPTICAL COATINGS FOR METEOROLOGICAL SATELLITE

XU BUYUN, ZHU CUIYUAN, ZHU BINGSHENG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

This paper presents the basic design principle, the assembly and the application of several components of optical thin film used for meteorological satellite. The assemblies of these components and the used coating materials and their measured curves are given, respectively, in this paper. All these components have been used successfully.