

# 渐变滤光片与焦平面探测器阵列的配合特性\*

程实平 张凤山 严义埏

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要:** 利用渐变特性对覆盖阵列探测器光敏元区域的渐变滤光片的透射率进行了数值模拟, 并对探测某一波段光谱信息的多通道渐变滤光片进行了分析和设计.

**关键词:** 渐变滤光片, 探测器阵列, 透射率.

## 引言

近年来光谱仪器广泛采用阵列器件, 多光谱遥感仪在设计上逐渐趋向于小型化和组件化, 用线性渐变滤光片或微型组合滤光片阵列与线性阵列探测器配合, 可以构成多光谱信息探测组件, 使成像光谱仪实现结构小型化, 并提高信噪比与可靠性能, 这对航天和航空遥感领域的发展具有较大意义. 本文对线性渐变滤光片与焦平面阵列探测器配合时的透射率特性进行了数值模拟, 并对探测 8~14  $\mu\text{m}$  大气窗口的 12 通道渐变滤光片进行了分析和设计.

## 1 基本原理

当滤光片在渐变方向上的最大渐变率非常小, 总膜层厚度与器件光敏元尺寸相比非常小, 以及滤光片的镀膜面与器件光敏面紧密结合时, 在指定区域  $[a, b]$  内的光谱透射率  $T_{a,b}(\lambda)$  可用滤光片在该区域内各点透射率的积分平均描述<sup>[1]</sup>, 即

$$T_{a,b}(\lambda) = \frac{1}{b-a} \int_a^b T(x, \lambda) dx, \quad (1)$$

式(1)中  $a$  和  $b$  是渐变方向上某指定区域的两个边界的坐标, 即积分上下限,  $x$  是该区域内某位置点的坐标,  $T(x, \lambda)$  是该位置点的透射率. 由于渐变滤光片在任意一点的膜系结构都是相同的, 所不同的仅是参考波长, 在作数值模拟时, 我们用级数求和的方式计算, 并将积分变量换为  $x$  点对应的参考波长  $\lambda x$ , 同时将积分上下限变为区域边界对应的参考

本文 1993 年 5 月 4 日收到, 修改稿 1993 年 6 月 11 日收到.

\* 国家自然科学基金资助项目.

波长  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$ , 这样得到线性渐变滤光片在区域  $[a, b]$  中的表征透射率的计算式为

$$T_{a,b}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} T \left[ \lambda_a + \frac{1}{N}(\lambda_b - \lambda_a), \lambda \right], \quad (2)$$

式 (2) 中  $N$  是求和的点数, 其数值越大计算精度越高. 探测器参数与滤光片参考波长存在一定关系, 对于在波长范围  $[\lambda_S, \lambda_E]$  内安排  $N$  元占空比为  $\rho$  的列阵探测器, 滤光片与列阵器件配合时在第  $i$  个光敏元区域的两个边界所对应的参考波长为

$$\lambda_{i1} = \lambda_S + \frac{(i-1)(\lambda_E - \lambda_S)}{(N + \rho - 1)}, \quad (3)$$

$$\lambda_{i2} = \lambda_{i1} + \frac{\rho(\lambda_E - \lambda_S)}{(N - \rho - 1)}, \quad (4)$$

在航空和航天遥感领域中,  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  是一个长波大气窗口, 在这个波长范围内用渐变滤光片实现多光谱信息探测具有较大实用意义. 表 1 列出了占空比  $\rho$  为 0.5 的 12 元列阵在相应探测区域的参考波长范围.

表 1 滤光片在 12 个通道探测元区域的参考波长的范围  
Table 1 Reference wavelength ranges of the wedge filter in  
detective element areas of 12 channels

通道	参考波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	通道	参考波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	通道	参考波长范围 ( $\mu\text{m}$ )
1	8.000~8.261	5	10.087~10.348	9	12.174~12.434
2	8.522~8.783	6	10.618~10.869	10	12.696~12.965
3	9.043~9.304	7	11.130~11.391	11	13.217~13.478
4	9.565~9.822	8	11.652~11.913	12	13.739~14.000

## 2 透射率数值模拟

三半波带通滤光片常用于中窄带光谱探测. 下面我们对相对带宽不同的两种三半波带通滤光片进行数值模拟, 第一种结构的半波层厚度为一级次半波层, 第二种结构的半波层

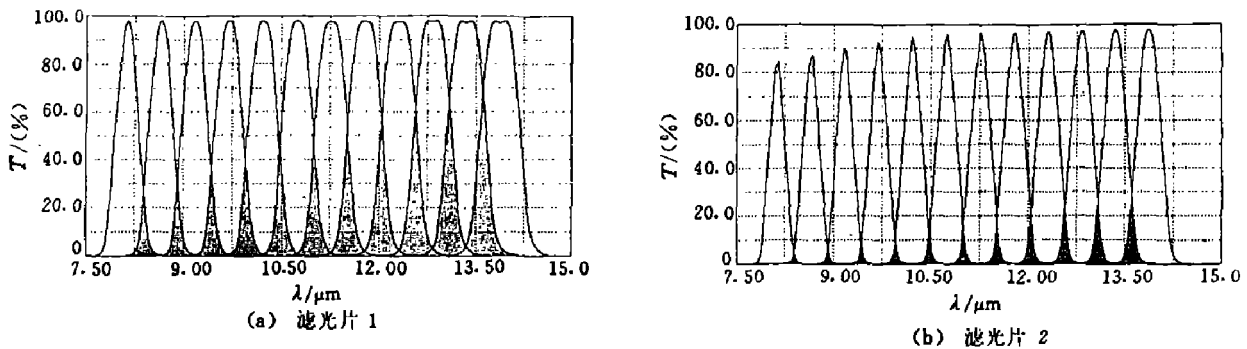


图 1 渐变滤光片 1 和 2 在 12 个通道的主通带透射率模拟曲线  
Fig. 1 Simulated transmissive curves of the main pass band  
of wedge filters 1 and 2 in the 12 channels

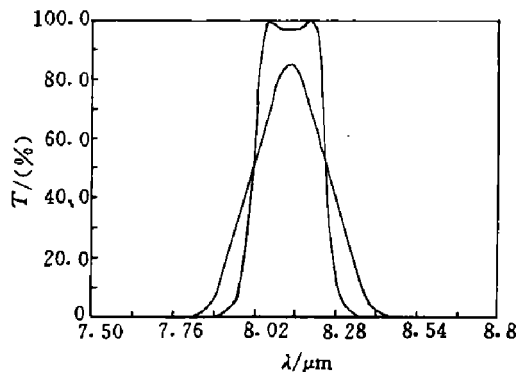


图 2 滤光片 2 在通道 1 区域中点的透射率模拟曲线

Fig. 2 Simulated transmissive curves of filter 2 in the mid point of the area of channel 1

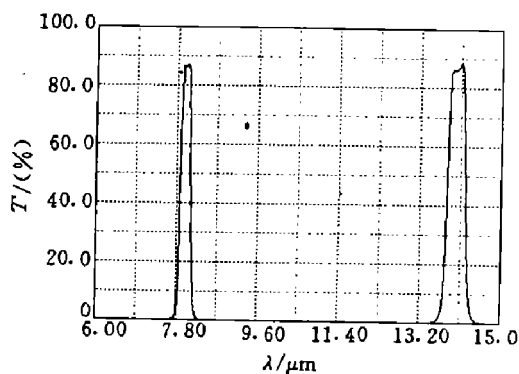


图 3 截次峰后滤光片在短波区和长波区的透射率模拟曲线

Fig. 3 Simulated transmissive curves of the filter in short wave and long wave areas after cutting off the sub-pass band

厚度为二级次半波层, 两种膜系的结构分别为: 滤光片 1: 空气/2LHL(LHLHLHL)<sup>2</sup>LHL/Ge ( $N_s=4$ ) 基片; 滤光片 2: 空气/2LH2L(2LHLHLH2L)<sup>2</sup>2LHL/Ge ( $N_s=4$ ) 基片; H 为 PbTe,  $n_H=5.5$ ; L 为 ZnS,  $n_L=2.4$ . 图 1 为两种滤光片与列阵探测器配合时, 各通道的主通带在 50 个求和点下的透射率模拟曲线, 图 2 为滤光片 2 分别在渐变滤光片和均匀滤光片在通道 1 区域中点对应的透射率模拟曲线.

从透射率曲线可发现: (1) 渐变滤光片在主通带出现的波形畸变表现在波形系数变差, 波形畸变的程度与膜系结构有关, 如滤光片 2 的波形畸变较大; (2) 在短波探测元上波形畸变较为严重; 在长波探测元上光敏元之间的串色较为严重.

### 3 滤光片设计

渐变滤光片的膜系一般由主通带膜系和截止次峰膜系两部分组成, 主通带膜系的形式要结合仪器的技术指标确定, 同时还要求工艺上可行, 通常采用三半波形式.

对截止次峰膜的要求主要有两点: (1) 在渐变形式下要有足够宽的截止区和较好的边缘特性; (2) 要有较大的定位允差范围以保证两次镀膜时的定位误差不引起次峰泄漏. 使用在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  范围内的器件一般是碲镉汞量子阱探测器, 它在  $1\sim 13\ \mu\text{m}$  波段中的响应率具有缓慢上升的趋势,  $13\ \mu\text{m}$  之后呈指数下降趋势并在  $15\ \mu\text{m}$  左右下降到零, 故此截止次峰膜系的前截止带一直要延伸到  $1\ \mu\text{m}$  或更短的波长. 对上述两种结构的主通带膜系,  $3.2\ \mu\text{m}$  以前的次峰可用 PbTe 材料的本征吸收来截止;  $3\sim 6\ \mu\text{m}$  的次峰可制作一只前截止窗口滤光片来截除; 对于各个光敏元在  $6\ \mu\text{m}$  以后的短波次峰和长波次峰, 则可在主通带膜系基片背面镀制一个渐变宽带截止滤光片来截除.

图 3 是用 PbTe 和 ZnS 材料在滤光片背面镀制次峰截止膜系后, 滤光片在短波区和长波区的透射率曲线. 从图 3 中可见, 膜系在  $6\sim 15\ \mu\text{m}$  范围内已截除了短波探测元上的长波次峰和长波探测元上的短波次峰, 从膜系的渐变特性可知: 当滤光片在短波区探测元

上截除了长波次峰并在长波区探测元上截除了短波次峰之后, 即可保证在所有探测元上截除短波和长波次峰. 从图 4 和图 5 中还可看出该膜系具有较宽的定位允差范围.

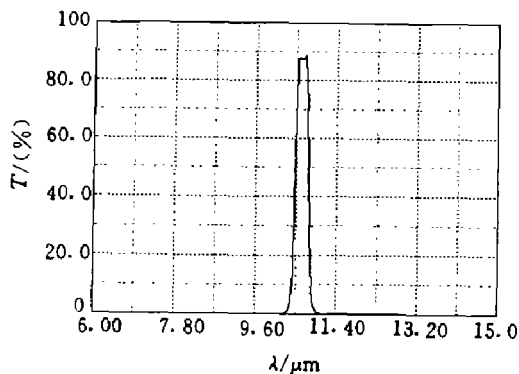


图 4 主膜系前移截次峰膜系一个光敏元的透射率模拟曲线

Fig. 4 Simulated transmissive curve of the filter when the main system misaligns with the sub-system by one detector element ahead

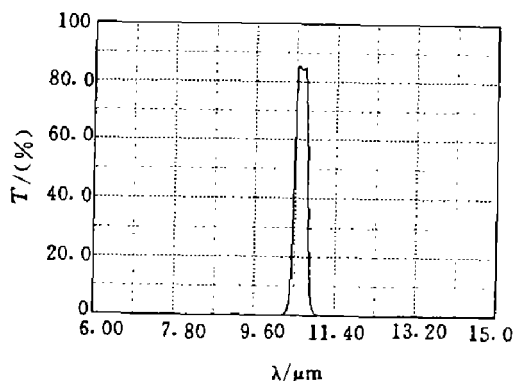


图 5 主膜系后移截次峰膜系一个光敏元的透射率模拟曲线

Fig. 5 Simulated transmissive curve of the filter when the main system misaligns with the sub-system by one detector element behind

渐变滤光片在与阵列探测器配合使用时, 要折中考虑仪器通道总数、滤光片膜系结构、以及仪器光谱分辨率之间关系来确定仪器通道总数. 对仪器来说, 增加通道数有利于提高光谱信息提取的效率, 但通道数太多就会加大探测器在长波区的串色效应; 通道数太少则会在一定的光谱范围内加大短波区波形畸变, 影响短波区的探测率. 因此要对仪器通道总数、滤光片膜系结构、以及仪器光谱分辨率之间作合理的协调, 以解决仪器技术指标与实现手段之间的矛盾. 另外, 本文对  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  大气窗口的 12 通道渐变滤光片的透射率的数值模拟和滤光片设计, 是开展微型渐变滤光片研究的基础工作, 对提高滤光片的性能具有一定实际意义.

### 参考文献

- 1 程实平等. 红外与毫米波学报, 1993;12(5):347-351
- 2 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学, 上海: 上海科学技术出版社, 1984, P.240~320
- 3 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filter*, New York: McMillan, 1986, P.234~312

## TRANSMISSIVE PROPERTIES OF WEDGE FILTER MATCH FOR DETECTOR ARRAY\*

CHENG SHIPING, ZHANG FENGSHAN, YAN YIXUN

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 200083, China)*

**Abstract:** The transmittance of the wedge filter covering the detective elements of the detector array is simulated via the gradient properties of the linear wedge filter. The wedge filter for multi-channel detector array is analyzed and designed.

**Key words:** wedge filter, detector array, transmittance.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.