

# 含滤光片的成像系统在像面探测区域内的光谱辐射功率

程实平 张凤山 严义坝

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要:** 分析了滤光片在光学系统不同位置安置下的特性, 导出了含滤光片的光学系统对理想朗伯辐射物面、在像面探测区域内的光谱辐射功率和滤光片所表征的透射率.

**关键词:** 成像系统, 光谱, 滤光片, 透射率.

## 引言

目前, 用于各种成像仪器的滤光片由于角色散所引起的光谱探测误差一般都被忽略, 这除了因为滤光片在设计时选用了角色散较小的膜系之外, 还因为大多数滤光片是放置在准平行光路中使用的. 随着探测器向列阵化发展, 采用与器件紧密结合的滤光片列阵可以简化系统结构, 提高仪器的信噪比和可靠性, 然而滤光片被安置在像平面上的方式与传统的安置方式不一致, 在光学系统中所表现的特性也不一样, 滤光片角色散对像面探测区域内的光谱辐射功率的影响通常不能忽略. 本文将分析不同位置平面上的滤光片在成像系统中的特性, 并导出计算朗伯辐射物面的像在探测器光敏元内的光谱辐射功率积分式.

## 1 滤光片作为衰减器时的特性

滤光片作为衰减器时的特点是入射光的光束的孔径角为零, 会聚于像面(或发源于物面)某一视场点  $P(x, y)$  的光入射在滤光片时为一束平行光, 光束对滤光片的入射角等于对应的视场角  $\omega$  (参见图 1), 若滤光片在  $\omega$  入射角的光谱透射率为  $T(\omega, \lambda)$ , 这束平行光将被衰减为原来的  $T(\omega, \lambda)$  倍. 对于望远系统, 像面与像方焦平面重合, 若滤光片放入前和放入后在像面上的光谱照度分别为  $E(P, \lambda)$  和  $E'(P, \lambda)$ , 则有

$$E'(P, \lambda) = T(\omega, \lambda) E(P, \lambda). \quad (1)$$

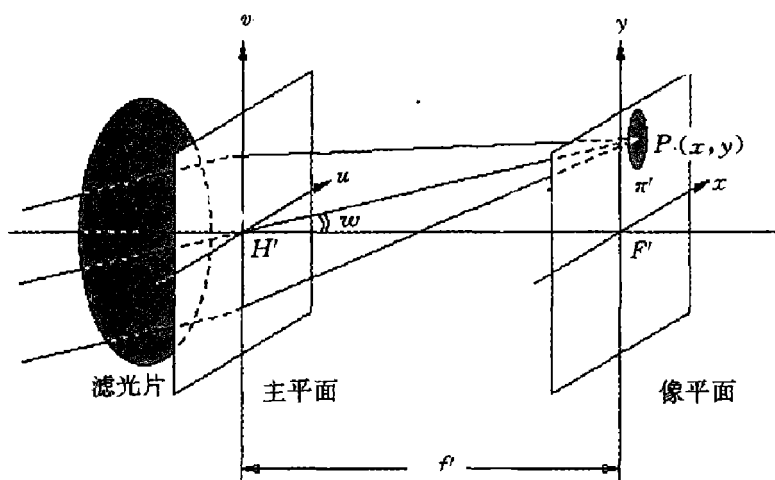


图1 滤光片置于平行光束中

Fig. 1 The filter is mounted in the parallel beam

式(1)的物理意义是:滤光片在系统中的作用相当于在像面上放置了一个非均匀衰减器,衰减系数为视场位置的函数.对像给定区域 $\Pi$ 内作面积分可得到该区域内的光谱辐射功率 $P_{\Pi}(\lambda)$ ,在像面上的小区域 $\Pi$ 内,视场角变化很小,可认为 $T(\omega, \lambda)$ 和 $E(P, \lambda)$ 在此小区域内皆为常数,这时得到<sup>[1]</sup>

$$P_{\Pi}(\lambda) = S_{\Pi} T(\omega, \lambda) E(P, \lambda) = \varepsilon_{\lambda} R_{\lambda} \cos^4 \omega \sin^2 U', \quad (2)$$

式中 $S_{\Pi}$ 为区域 $\Pi$ 的面积, $R_{\lambda}$ 和 $\varepsilon_{\lambda}$ 分别为均匀理想朗伯辐射物面的光谱辐射发射量和单色比辐射率, $U'$ 为系统的像方孔径角.

## 2 滤光片在成像光束中的特性

在光学系统中,从物方焦平面上某一点发出的球面波经系统变换之后在像方空间成为平面波,它经过滤光片后受到的衰减参见图2,因而滤光片安置在成像光束中时,其作用相当于在系统物方焦平面上放入了一只非均匀衰减器,衰减率为孔径角的函数.设物方焦平面上某点 $Q(\zeta, \eta)$ 的光谱照度为 $E_f(Q)$ ,则在微面积元 $\Delta S'$ 内的光谱辐射功率为 $\Delta P(\lambda) = E_f(Q) \Delta S'$ ,它在像方空间为一束准平行光,当 $\Delta S'$ 的最大线度趋于零时成为一束严格平行光,滤光片对这束平行光的衰减率为 $T(U', \lambda)$ ,若忽略系统的衍射效应,它将在像面上形成一个照度均匀的光斑,这样对物方区域 $\Pi$ 内发出并通过物方焦平面上有效区域 $\Sigma$ 内的光谱辐射功率求和,即得到像方区域 $\Pi'$ 内的光谱辐射功率为

$$P_{\Pi}(\lambda) = \sum T(U', \lambda) E_f(Q) \Delta S' = \iint_{\Sigma} T(U', \lambda) E_f(Q) dS', \quad (3)$$

式(3)中 $\Sigma$ 的大小和位置与系统的入瞳和视场的性质有关.对均匀的理想朗伯辐射物面,

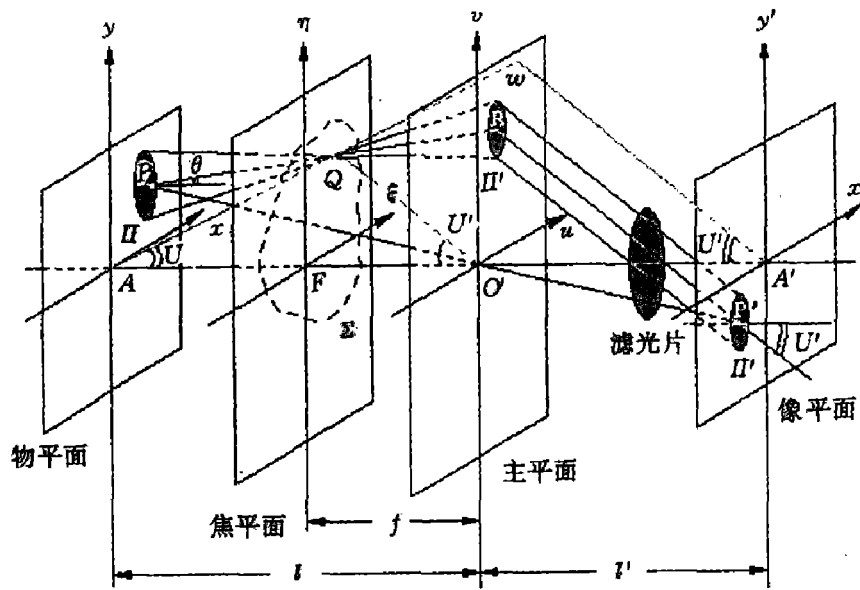


图 2 滤光片置于成像光束中

Fig. 2 The filter is mounted in the image beam

区域 II 在物方焦平面上点  $Q(\zeta, \eta)$  产生的光照度可以表示为<sup>[1,2]</sup>

$$E_f(Q) = \frac{R_\lambda \epsilon_\lambda}{\pi} \iint_{\Pi} \frac{\cos^2 \gamma}{l_{PQ}^2} dS, \quad (4)$$

式中  $l_{PQ}$  为无穷小面积元  $dS$  内某一点  $P(x, y)$  与物方焦平面上点  $Q(\zeta, \eta)$  之间的距离,  $\gamma$  为直线  $PQ$  与光轴的夹角, 将式 (4) 代入式 (3) 可得

$$P_{\Pi}(\lambda) = \frac{R_\lambda \epsilon_\lambda}{\pi} \iint_{\Sigma} \iint_{\Pi} \frac{\cos^2 \gamma}{l_{PQ}^2} T(U', \lambda) dS dS'. \quad (5)$$

对于一般成像系统和任意区域 II 作上述积分是比较困难的, 现在我们对两种特殊情况进行近似处理, 设光瞳为圆形并且所讨论的物面限于非渐晕区.

### 2.1 望远系统

对于望远系统, 有近似关系  $\gamma \approx \omega$ , 从而有  $l_{PQ} = \frac{1-f}{\cos \gamma} \approx \frac{1-f}{\cos \omega}$ , 另外,  $dS' = \frac{2\pi(1-f)^2 \sin U}{\cos^3 U} dU$ , 其中  $U$  为物方孔径角, 将它们代入式 (8), 得

$$\begin{aligned} P_{\Pi} &= R_\lambda \epsilon_\lambda \cos^4 \omega \iint_{\Pi} \left[ \int_0^{U_m} \frac{\sin U}{\cos^3 U} T(U', \lambda) dU \right] dS' \\ &= R_\lambda \epsilon_\lambda S_{\Pi} \cos^4 \omega \int_0^{U_m} \frac{\sin U}{\cos^3 U} T(U', \lambda) dU, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $U_m$  为最大物方孔径角. 因系统成完善像的条件为  $\sin U = \beta \sin U'^{[1]}$ , 另外有  $S_{\Pi} = S_{\Pi'}/\beta^2$  ( $\beta$  为系统的横向放大率) 和  $\beta \approx 0$ , 故得  $S_{\Pi'}$  内的辐射功率为

$$P_{\Pi}(\lambda) = S_{\Pi'} \varepsilon_{\lambda} R_{\lambda} \cos^4 \omega \int_0^{U_m} \sin(2U') T(U', \lambda) dU', \quad (7)$$

其中  $U_{m'}$  为最大像方孔径角即  $D/2f$ .

## 2.2 有限物距系统

对有限物距系统, 我们只考虑光轴附近微小区域  $\Pi$ , 并设区域  $\Pi$  远小于区域  $\Sigma$ , 这时有近似关系  $\gamma \approx U$ , 与前类似, 可求得  $S_{\Pi'}$  内的辐射功率为

$$P_{\Pi}(\lambda) = S_{\Pi'} \varepsilon_{\lambda} R_{\lambda} \int_0^{U_{m'}} \frac{\sin(2U')}{(1 - \beta^2 \sin^2 U')^2} T(U', \lambda) dU'. \quad (8)$$

从式 (7) 和 (8) 可看出, 像方孔径角对滤光片产生的角色散一般不可忽略, 尤其是作窄光谱探测时更应考虑孔径角对探测光谱的定位和扩展的影响. 在滤光片的设计中, 我们关心的是光谱透射率, 这只要将式 (7) 和式 (8) 除以  $T(U', \lambda) = 1$  时的值即可得到. 故望远系统透射率

$$T_{\Pi}(\lambda) = \frac{1}{\sin^2 U'_m} \int_0^{U'_m} \sin(2U') T(U', \lambda) dU', \quad (9)$$

有限物距系统的透射率为

$$T_{\Pi}(\lambda) = \frac{1}{\sin^2 U'_m} \int_0^{U'_m} \frac{\sin(2U')}{(1 - \beta^2 \sin^2 U')^2} T(U', \lambda) dU'. \quad (10)$$

当系统的有效孔径不是从零开始时, 以上积分式的积分限要换成相应的有效孔径范围  $[U'_1, U'_2]$ , 式中的  $\sin^2 U'_m$  也相应地换为  $\sin^2 U'_2 - \sin^2 U'_1$ .

## 3 滤光片透射率计算实例

计算滤光片在成像光束中的光谱透射率时, 我们以两组带通滤光片为例来说明在大孔径系统中, 滤光片的透射率曲线变化. 两种膜系结构分别为硅基片/LH4LHLHLH4LHLHL/空气和石英基片/LHL4HLHLHL4HLH2L/空气, 两种膜层材料的折射率分别为  $n_H = 4$  和  $n_L = 1.7$ , 硅的折射率为 3.4, 石英的折射率为 1.46, 参考波长为  $2.10 \mu\text{m}$ . 图 3 和 4 为两种滤光片在孔径角范围为  $[0^\circ, 14^\circ]$  和  $[28^\circ, 42^\circ]$  (反射系统) 的透射率曲线.

从光谱特性曲线中可发现: (1) 滤光片在成像光谱中的透射带宽有所展宽, 透射峰值有所下降, 光束的孔径角范围越大, 透射带扩展得越宽, 透射峰值下降越大. (2) 透射中心波长向短波方向偏移, 偏移量随孔径角范围的扩大而变大. (3) 角色散的程度与膜系结构有关. 为了得到所需的透射特性, 一般除采用角色散较小的膜系之外, 同时参考波长还要作相应的调整.

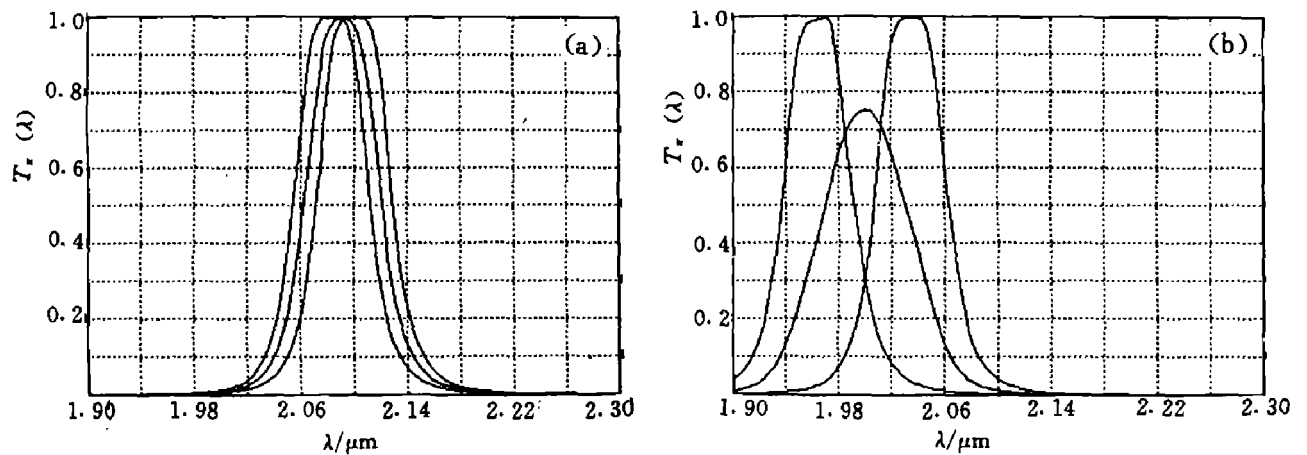


图 3 望远系统滤光片在成像光束中的透射率曲线

(a) 入射角度范围  $[0^\circ, 14^\circ]$ ; (b) 入射角度范围  $[28^\circ, 42^\circ]$

Fig. 3 Transmissivity curves of the filters of telescopic system in the image beam

(a) incident angle range  $[0^\circ, 14^\circ]$ ; (b) incident angle range  $[28^\circ, 42^\circ]$

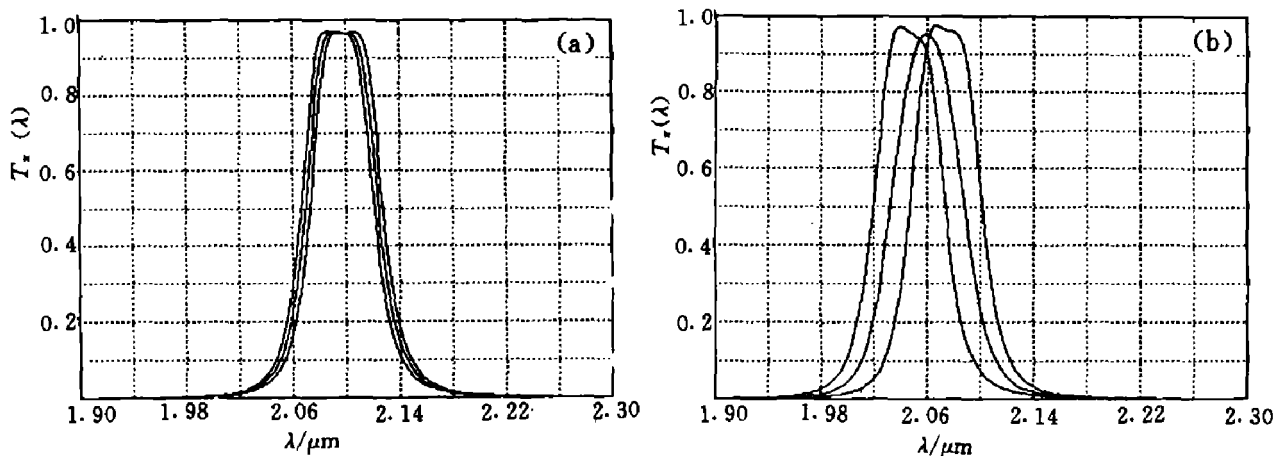


图 4 有限物距系统滤光片在成像光束中的透射率曲线

(a) 入射角度范围  $[0^\circ, 14^\circ]$ ; (b) 入射角度范围  $[28^\circ, 42^\circ]$

Fig. 4 Transmissivity curves of the filters of the limited object distanced system in the image beam

(a) incident angle range  $[0^\circ, 14^\circ]$ ; (b) incident angle range  $[28^\circ, 42^\circ]$

## 4 结语

滤光片在具有较大孔径的成像光束中的光谱透率与在平行光路中的透射率有一定差异. 在进行光谱的精细探测时, 由角色散所引起的透射带的展宽和中心波长的偏移所带来的误差一般不可忽略, 其中中心波长的偏离误差在滤光片设计时可通过对中心波长的预偏

离来校正.

### 参考文献

- 1 张幼文. 红外工程光学, 上海: 上海科学技术出版社, 1982
- 2 张以谟. 应用光学, 北京: 机械工业出版社, 1982
- 3 唐晋发, 郑权. 应用光学薄膜, 上海: 上海科学技术出版社, 1984

## SPECTRAL POWER IN DETECTED AREA OF IMAGE PLANE OF AN IMAGE SYSTEM CONSISTING OF A FILTER

CHENG SHIPING, ZHANG FENGSHAN, YAN YIXUN

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

**Abstract:** The properties of a filter mounted in various configurations are analyzed. The formulas to calculate the spectral incident power in the detected area of an image system consisting of a filter and the transmissivity of the filter for the ideal Lambertian radiant object plane are derived.

**Key words:** image system, spectrum, filter, transmissivity.