

透透射宽带通滤光片研究

杨 树 梅

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文介绍了在 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 区的新型透透射宽带通滤光片。文中指出了它的优点和用途,并且研究了透透射宽带通滤光片和 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 与 $0.7\sim 1.1\mu\text{m}$ 可变透透射宽带通滤光片膜系设计方法,总结了匹配层和金属层的线性变化规律;计算了 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 区的匹配系数和金属层物理厚度;最后给出了典型设计的主要参数分析,实验结果及其应用实例。

一、前 言

透透射宽带通滤光片是某波长的一种金属-介质型的宽带通滤光片。圆形可变透透射宽带通滤光片是对某波段的一种峰值波长随基片角度呈连续线性变化的、由金属-介质的圆楔形膜构成的宽带通滤光片。它们都具有较高的峰值透射率,宽而深的截止度,尤其是长波无旁通带的优点。它们可作为截除长波旁通带(次峰)的辅助滤光片,容易实现超倍频程范围旁通带的截除(或主通带以上的无限截止范围),大大提高全介质滤光片的性能。

国内外对透透射滤光片进行了研究,并报道了窄带型透透射滤光片的设计和制造^[1~3,8,10]。本文利用最小二乘方多项式近似值方法^[7]计算了 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 线性分布的金属层物理厚度和匹配系数,给出了 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 和 $0.68\sim 1.1\mu\text{m}$ 的透透射宽带通滤光片和可变透透射宽带通滤光片典型膜系设计;主要参数分析,膜系中各层膜的相对允许误差,最后给出实验结果及它们的应用实例。

二、设 计

利用透透射概念,在不同波长上,对给定反射率的金属膜两侧加上介质膜层(两三层),则在所期望的波长或波段内可降低金属膜的反射率,得到最大可能的透射率,在此波长或波段外,反射率增加,于是形成一个透射通带。只要金属膜在设计波长或波段有适当的厚度,便无长波旁通带。

在设计中,考虑了银层实用的物理厚度(而不是无限厚), $(2/4)$ 层数与文献[8]取不同值。

1. 透透射宽带通膜及设计

根据透透射概念^[8],可设计出不同波长的各种透透射宽带通膜系,在 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$,给出下面两个典型设计

$$GLHMLAgMLHLA, \quad (1)$$

$$GHMLAgMLHA. \quad (2)$$

在 $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 设计为

$$GHLMHAgMHLHA, \quad (3)$$

G 表示基底, A 表示空气, H 和 L 表示 $(\lambda_0/4)$ 厚度的高和低折射率层, MH 和 ML 为高和低折射率匹配层, M 为匹配系数(图 1 中曲线 M 表示 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围中的一组值), Ag 表示银层(图 1 中曲线 D 表示在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 中的一组值), λ_0 为设计或监控波长。

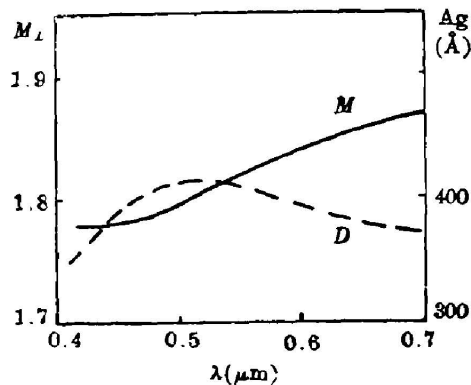


Fig. 1 Calculated values of the matching coefficient (M) and physical thickness (D) of the silver-layer on an IT-broad-bandpass filter

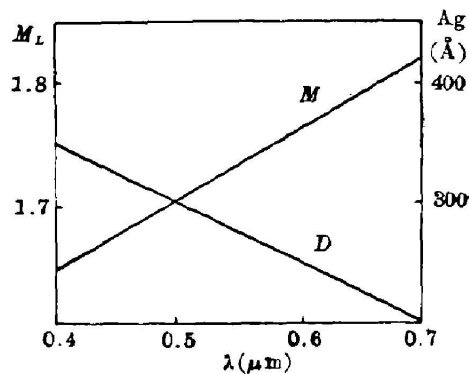


Fig. 2 Calculated values of the matching coefficient (M) and physical thickness (D) of the silver-layer on a variable IT-broad-bandpass filter in the visible region

2. 可变透透射宽带通膜系设计

在任一波段内, 银层物理厚度和匹配系数随波长变化是非线性的, 因此需要把它们设计

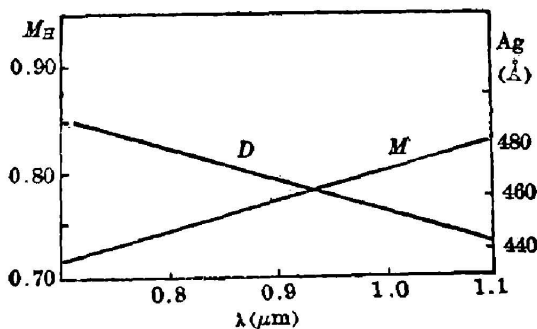


Fig. 3 Calculated values of the matching coefficient M and physical thickness (D) of the silver-layer on a variable IT-broad-bandpass filter at $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$

为线性分布, 且使设计后的误差最小。按照最小二乘方多项式近似值方法计算后, 银层物理厚度在可见区分布如图 2 中直线 D 所示, 这是一组典型计算值。计算银层厚度相对误差为 15%。计算匹配系数 (ML) 在可见区分布如图 2 中直线 M 所示, 它的相对误差不大于 $\pm 1.9\%$ 。图 3 给出 $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 匹配系数计算值(图中直线 M 表示), 它们的最大相对误差小于 $\pm 1.5\%$, 其峰值透射率影响为 $\pm 0.5\%$ 。

按照上面设计参数, 给出可见区一个典型透透射宽带通膜系为

$$GLH1.715LAg1.715LHLA, \quad (4)$$

其中 $n_H = 2.3$, $n_L = 1.35$, $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 。在 $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的一个典型透透射宽带通滤光片膜系为

$$GHL0.75HAg0.75HLHA, \quad (5)$$

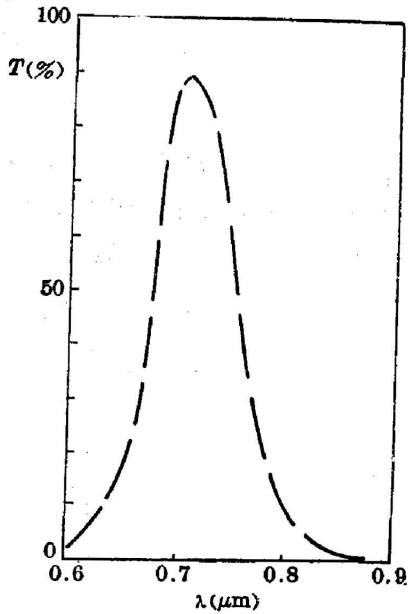


Fig. 4 Calculated spectral curve of an IT-broad-bandpass filter
Design parameters:

$GHL\ 0.75\ HAg\ 0.75\ HLHA$
($n_H=2.6, n_L=1.35,$
 $\Lambda_g=470\ \text{\AA}, \lambda_0=0.7\ \mu\text{m}$)

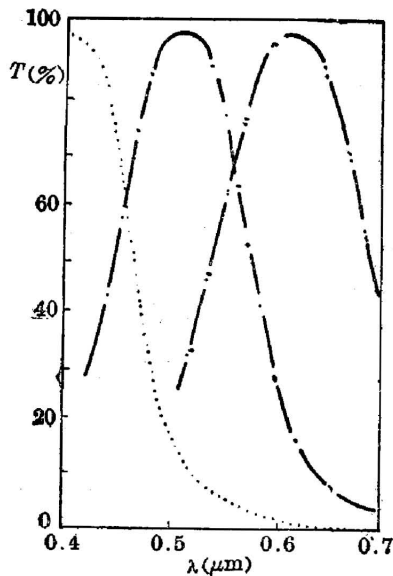


Fig. 5 Calculated spectral characteristics of a variable IT-broad-bandpass filter in the visible region at several typical wavelengths
($n_H=2.3, n_L=1.35$)

其中 $n_H=2.6, n_L=1.35, \lambda_0=0.7\ \mu\text{m}$ 。

3. 几个设计实例

图 4 给出在 $0.7\ \mu\text{m}$ 的透透射宽带通滤光片计算的光谱特性, 主通带的长波旁通带透射率为 $1\% \sim 0.5\%$ 。

图 5 和图 6 分别给出可变透透射宽带通滤光片在几个波长上的计算光谱特性。图 5 中的长波旁通带透射率小于 3% 。图 6 中的长波旁通带透射率小于 0.5% 。它们的短波旁通带均由截止膜系 $G\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^P A$ (其中 P 为周期数) 以及适当的色玻璃截除。

以上设计中没有考虑薄膜中的散射和吸收等损失。

4. 透透射宽带通滤光片主要参数分析及它们与窄带型透透射滤光片参数比较

透透射宽带通滤光片膜系中选定膜料和金属层物理厚度后, 匹配系数大小主要影响峰值波长位置。在允许的相对误差范围内, 匹配系数的一致偏大或减小, 对通带透射率影响是次要的, 图 7 给出计算的透透射宽带通滤光片光谱特性随匹配系数的变化。

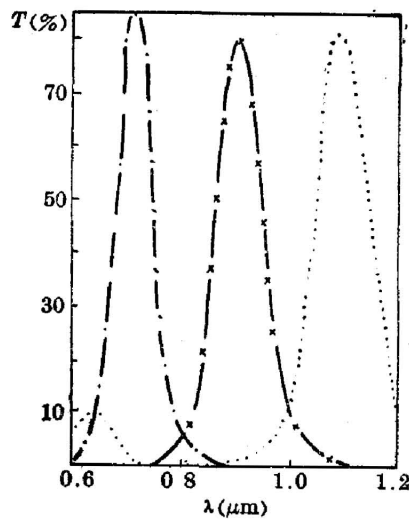


Fig. 6 Calculated spectral characteristics of a variable $0.7 \sim 1.1\ \mu\text{m}$ IT-broad-bandpass filter at several typical wavelengths
($n_H=2.3, n_L=1.35$)

匹配系数不一致的相对误差影响主要使峰值透射率下降, 带宽增加和通带形状变坏。若匹配系数不一致的相对误差为 15% 时, 则峰值透射率由 94% 降到 75%, 带宽由 1000 Å 增加到 1200 Å 左右, 通带形状变坏(双峰开始分裂)。但匹配系数不一致的相对误差对窄带型透射滤光片和透射宽带通滤光片的影响是不同的, 对峰值透射率的影响见表 1。

Table 1

IT filter type	relative error with unequal matching coefficient	effects on peak transmission (decrease)
17-layer narrow-band	1%	10%
	2%	27%
5-layer broad-band	4.6%	4.8%
	15%	19%

匹配系数不一致的相对误差“临界值”是指开始出现双峰时的匹配系数不一致的相对误差值, 即两峰值透射率与中心波长透射率差值等于或大于 0.2% 时, 匹配系数不一致的相对误差值(用百分数表示)。此值对窄带型为 3%^[10], 宽带型为 15%。

匹配系数不一致的相对误差对峰值波长的影响分两种情况, 当匹配系数不一致的相对误差小于临界值(15%)时, 峰值波长位置不受影响, 当大于或等于临界值时, 开始影响波长

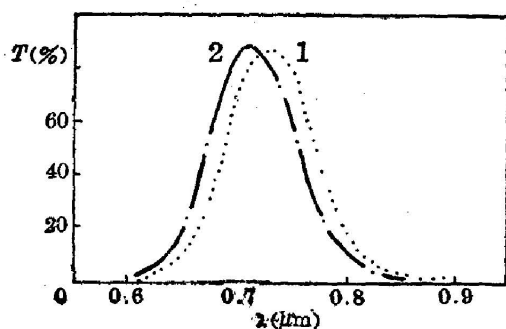


Fig. 7 Calculated characteristics of an IT-broad-bandpass filter as a function of matching coefficient (other parameters unchanged)

1—Matching Coefficient 0.75,
2—Matching Coefficient 0.75(1~2.6%)

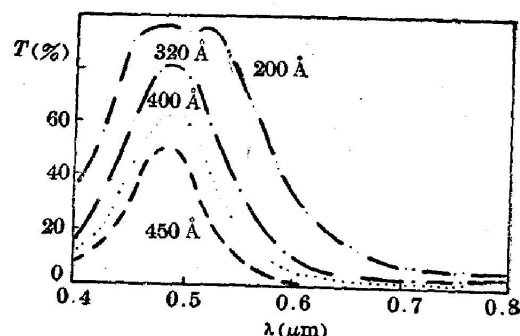


Fig. 8 Calculated characteristics of an IT-broad-bandpass filter as a function of the physical thickness of the silver-layer
Design parameters: $GH\ 1.78\ L\ Ag\ 1.78\ L\ HG$
($n_H = 2.3$, $n_L = 1.35$, $\lambda_0 = 0.47\ \mu m$)

位置。这与窄带型透射滤光片情况不同。

在理想匹配和其它参数不变的情况下, 金属层物理厚度主要影响透射宽带通滤光片的峰值透射率, 带宽、截止度和通带形状, 对峰值波长也有一定的影响。图 8 给出计算的透射宽带通滤光片光谱性能随银层物理厚度的变化, 表明银层厚度由 200 Å 变到 450 Å 时, 长波截止度由 4% 变到 0.4%, 带宽由 1600 Å 变到 800 Å, 从中可以看出峰值透射率的变化。当银层物理厚度小于 200 Å 时开始出现双峰, 故称 200 Å 为银层厚度的“临界值”。对 13 层

窄带型透射滤光片来说,银层物理厚度(在 $\lambda_0=0.57\mu\text{m}$)改变 100\AA ,峰值波长有 30\AA 左右的变化。

表 2 给出一个典型透射宽带通滤光片膜系中各层膜厚的相对允许误差,供设计与制造此类滤光片参考。

Table 2

Stack	GGH ML Ag ML H A				
serial number	1	2	3	4	5
Sign	H	ML	Ag	ML	H
relative allowance	$\pm 5\%$	$0\sim\pm 2\%$	$0\sim 15\%$	$0\sim\pm 2\%$	$\pm 5\%$

Note: Serial numbers are referred to the incident direction

窄带型透射滤光片膜系中包含有较多的膜层数,它对波长的变化很敏感,各膜层允许的相对误差精度要求较高。透射宽带通滤光片膜系中包含较少的层数,它对波长变化没有前者敏感,各膜层允许的相对误差精度要求较低,因此工艺简化,较易制造。

三、实验与结果

按照上述设计,制备了透射宽带通滤光片,利用自行设计与制造的遮蔽机构^[9],在圆形基片上制备圆楔形的可变透射宽带通滤光片。在实验中采用一次直控光电法监控膜厚。用 UV-340 型分光光度计测量滤光片光谱特性。

测量结果如图 9、图 10 和图 11 所示。图 9 给出透射宽带通滤光片实测光谱特性,旁通带透射率 $\leq 1\%$ 。图 10 和图 11 给出在半圆形基片上所做的可见区和近红外区可变透透

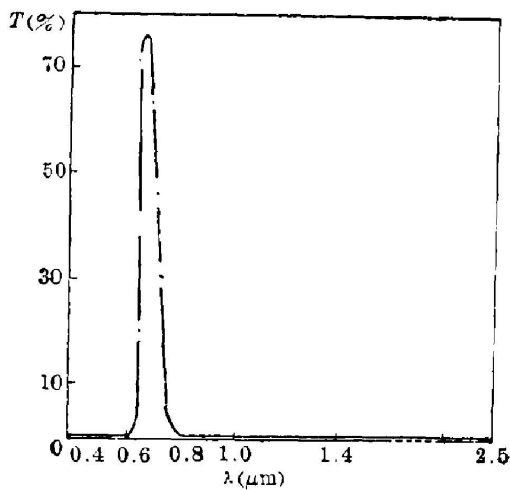


Fig. 9 Measured characteristics of an IT-broad-bandpass filter
($n_H=2.6, n_L=1.35, \text{Ag}=490\text{\AA}, \lambda_0=0.68\mu\text{m}$)

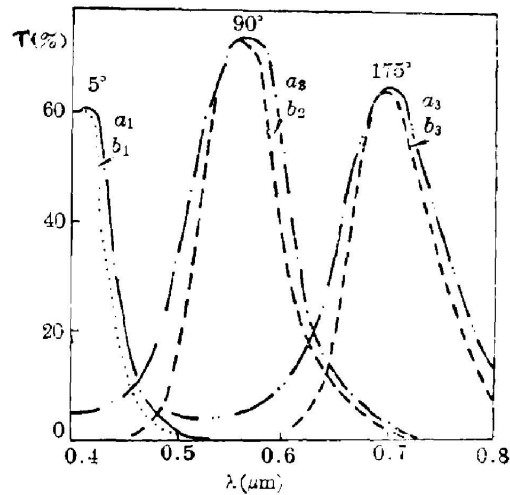


Fig. 10 Measured characteristics of a CV-IT-broad-bandpass filter
Sidebands not suppressed for curves a_1, a_2 and a_3 ; suppressed for b_1, b_2 and b_3
($n_H=2.3, n_L=1.35$)

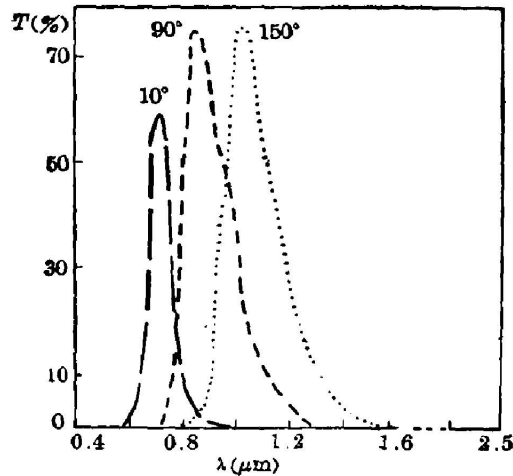


Fig. 11 Measured characteristics of a CV-IT-broad-bandpass filter in the near-infrared region
($n_H=2.6$, $n_L=1.35$)

射宽带通滤光片实测曲线。图 10 给出基片上三个角度分别为 5° 、 90° 和 175° 的光谱测量曲线，在主透射带两侧的波段范围内，旁通带透射率为 $0.1\% \sim 0.3\%$ ，图中只给出 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的测量结果。图 11 给出 $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 可变透透射宽带通滤光片的光谱实测曲线，并给出基片上 10° 、 90° 和 150° 三种情况，主透射带两侧，旁通带最大透射率为 $0.5\% \sim 2\%$ 。

四、透透射宽带通滤光片应用实例

透透射宽带通滤光片作为全介质窄带型和全介质宽带型带通滤光片的辅助滤光片截除旁通带是很方便的。例如，利用可变透透射宽带通滤光片截除旁通带的圆形可变窄带滤光片的实测结果是：峰值波长范围为 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ；峰值(平均)透射率为 $>17\%$ ；相对半宽度为 $0.4\% \sim 0.9\%$ (或 $2\% \sim 3\%$)；旁通带透射率为 $\leq 0.1\%$ 。

对曾参加这项实验工作的卢昌义、赵永华等同志及其他给予帮助的同志在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] P. H. Berning, A. F. Turner; *J. O. S. A.*, 1957, **47**, No. 3 (Mar), 230.
- [2] B. J. Holloway *et al.*; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 3 (Mar), 653.
- [3] B. V. Landau *et al.*; *J. O. S. A.*, 1972, **62**, No. 11 (Nov), 1258.
- [4] 唐晋发, 颜培夫; 《浙江大学学报》, 1979, No. 1, 1.
- [5] 私人通讯。
- [6] D. J. Hemingway *et al.*; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, No. 3 (Mar), 471.
- [7] W. E. 密伦; 《数值计算》, (科学出版社, 北京, 1959), 288.
- [8] H. A. Macleod; 《Thin Film Optical Filters》, (Adam Hilger, London, 1969), 184.
- [9] 私人通讯。
- [10] 唐晋发, 郑权; 《应用薄膜光学》, (上海科学技术出版社, 1984), 270.

Study of broad-bandpass filters with induced transmission

YANG SHUMEI

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 3 December 1985; revised 14 January 1986)

Abstract

A new type of broad-bandpass filter with induced transmission in the region of $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ is described together with its advantages and applications. It is also presented that the design method of these filters and filters of variable broad-bandpasses with induced-transmission in the region of $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ as well as $0.7\sim 1.1\mu\text{m}$. The rules of linear variations of the matching layer and metal layer on the filter are summed up. The matching coefficient and physical thickness of the metal layer in the region of $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ have been calculated. Finally, parametric analyses of typical designs are presented together with the experimental demonstration and an example of application.