

# 诱导透射滤光片的特性分析与制备

姜贞子 姜凤文

**摘要:** 采用金属和介质膜组合的诱导透射滤光片, 具有高透射和宽截止的优良特性。本文介绍了用于可见区和近红外区的二种诱导透射滤光片的理论分析、制备工艺及其实验结果。

## 一、前言

以透射率概念设计的金属和介质组合的诱导透射滤光膜, 具有峰值透射率高和宽截止区的优越特性, 因此它不仅适合于带通滤光片和峰值透射率高、截止区宽的滤光片, 还可以用来抑制全介质窄带滤光片的长波旁通带。这种诱导透射滤光片广泛用于各种高精度的光谱特性测量分析仪。

本文结合多年工作的实践, 介绍用于可见区和近红外区两种诱导透射滤光片的特性分析及其制备方法。

## 二、膜系选择和理论分析

用于高精度光谱特性测量分析仪等的两种带通滤光片的技术指标归纳为:

可见区:

$$\lambda_0 = 550\text{nm}, W_{0.5} \leq 10\text{nm}, T_{\text{max}} \geq 60\%,$$

次峰  $\Delta T \leq 1\%$ , 次峰截止  $0.3 \sim 1.5\mu\text{m}$  以上, 波形系数尽量小。

近红外区:

$$\lambda_0 = 90\text{nm}, W_{0.5} = 50 \sim 60\text{nm}, T_{\text{max}} \geq 60\%,$$

次峰  $\Delta T \leq 1\%$ , 次峰截止  $0.3 \sim 1.5\mu\text{m}$  以上。

根据上述技术指标选用主膜系为19层双半波膜和两个14层非  $\lambda/4$  短波通子膜系组合的滤光片, 则需要三块玻璃胶合, 它不仅制备工艺较复杂, 且光学特性的次峰透过率  $\Delta T \leq 1\%$  和长波截止区  $1.5\mu\text{m}$  以上指标均难以达到。(图1)是按上述方案实做的光谱特性曲线。

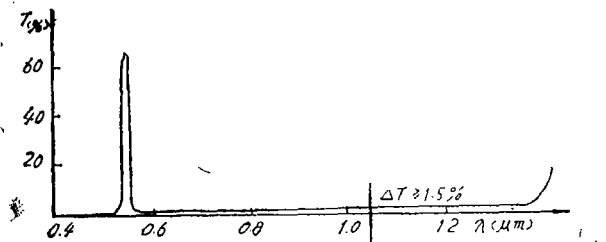


图1 实做的由19层双半波与两个14层短波通组合成的滤光片光谱特性曲线

$$n_H = 2.35, n_L = 1.38, \lambda_0 = 550\text{nm}, T_{\text{max}} = 63\%,$$

从图 1 可知, 上述组合滤光片的次峰透过率  $\Delta T > 1.5\%$ , 长波截止只能达到  $1.4\mu\text{m}$  左右, 所以满足不了所提出的指标要求。

金属膜对长波有良好的抑制作用, 如果选用诱导透射滤光膜代替两个短波通滤光膜, 则可以取得较理想的结果。

诱导透射滤光片的基本结构为:

| 介质反射膜 | 间隔层 | 金属膜 | 间隔层 | 介质反射膜 |。

金属膜的透过不仅取决于金属膜本身的光学常数 (折射率  $n$ , 消光系数  $k$ , 厚度  $d$ ), 而且和相邻介质的导纳密切相关。只要正确选择基片侧匹配膜堆的导纳, 就能使整个膜系的势透射率变为最大。如果同时在入射侧设计适当的减反射膜堆, 使整个膜系的反射减小至接近于零, 此时就能诱发金属膜的最大透射率。

金属膜两侧的介质膜系不仅增进了对中心波长的透射率, 而且由于每个膜系包含了相当多的层数, 所以对一个有限的波段也增进了透射率。在这个波段之外, 便从增加透射率 (或诱导透射) 迅速过渡为增加反射率, 这样就产生了一个带通滤光片, 如果诱导透射的膜系是一级干涉的, 那么在比透射率峰值波长更长的区域里, 滤光片的特性接近于它自身包含的纯金属膜特性, 所以只要金属膜足够厚, 就可以没有长波旁通带。

金属膜的复折射率为  $N = n - ik$ , 金属膜的减反射膜系的设计方法与介质的减反射膜不同之处, 在于首先要在金属表面迭加一层折射率  $n_r$  的膜层, 它的作用是使金属膜与它组合后的等效导纳  $y$  为实数, 然后迭加一组高、低折射率交替的  $\lambda/4$  膜堆, 以消除这个实数等效导纳的反射。

利用特征矩阵法可以方便地得到金属表面迭加第一层膜 (其折射率为  $n_r$ , 相位厚度为  $\delta$ ) 后的组合导纳  $y$

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \frac{i}{n} \sin \delta \\ i n_r \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n - i k \end{pmatrix}$$

$$y = \frac{C}{B} = \frac{n \cos \delta + i(n_r \sin \delta - k \cos \delta)}{\cos \delta + (k/n_r) \sin \delta + i(n/n_r) \sin \delta}$$

$$\text{势透射率 } \Psi_0 = \frac{T}{1 - R}$$

在上式中  $T$  为整个膜系的透射率,  $R$  为整个膜系的反射率。

吸收膜系的  $l$  层势透射率等于各层势透射率的乘积

$$\text{即 } \psi_0 = \prod_{j=1}^l \psi_j$$

膜系的最大透射率仅取决于金属膜的光学常数, 根据对波长  $\lambda_0$  处峰值透射率的特定要求, 选择在  $\lambda_0$  处具有尽可能大的  $k/n$  值的金属材料。我们选用中间金属层为银, 间隔层为冰晶石和由 ZnS、冰晶石高、低折射率材料交替组成的  $\lambda/4$  反射膜堆。其理论计算结果如图 2 所示。

从图 2 透射率曲线可知, 这种诱导透射滤光片结构, 由于在金属膜两侧介质膜系有合理匹配, 只要金属膜足够厚就可以得到没有长波旁通带, 同时取得很高的透射率。

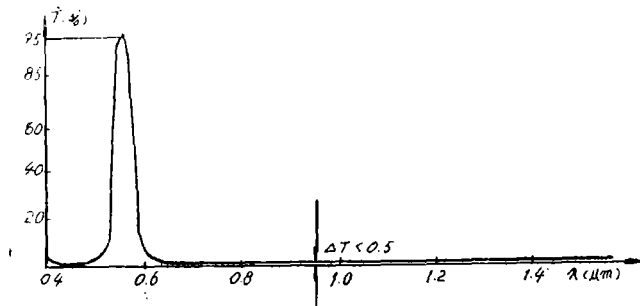


图2 计算的诱导透射滤光片的透射率。膜系为  $G | HLH 1.75L Ag 1.75 LHLH | A$ 。

$\lambda_0 = 550\text{nm}$ ,  $Ag$  层膜的几何厚度  $35\text{nm}$ ,  $N_{Ag} = 0.053 - i3.32$ ,  $n'_L = 1.35$ ,  $n_G = 1.52$ ,  $n_A = 1.0$ ,  $n_H = 2.35$ ,  $n_L = 1.35$ 。

### 三、滤光片的制备及其结果

此种滤光片在北京仪器厂生产的 DMD—450 型真空镀膜机上镀制，膜系的基本形式为  $GHL \dots HM_L Ag M_L H \dots LHA$ 。镀膜材料是硫化锌 ( $n_H = 2.35$ ) 和冰晶石 ( $n_L = 1.35$ ) 的热压材料，金属层材料系用纯度为 99.99% 的银颗粒。

每层膜厚度用极值法控制，由一个或两个监控片完成。镀制完的滤光膜胶合之后进行封边处理。

图 3 和图 4 为实做的诱导透射滤光片光谱特性曲线。由曲线可见，其光谱特性满足技术指标要求，所取得的结果是：

可见区：最大透射率  $T_{max} \geq 68\%$ ，半宽度  $W_{0.5} = 9\text{nm}$ ，次峰透射率  $\Delta T \leq 0.5\%$ ，次峰截止  $> 2.0\mu\text{m}$ ，波形系数  $W_{0.1}/W_{0.5} = 1.7$ 。

近红外区：最大透射率  $T_{max} \geq 70\%$ ，半宽度  $W_{0.5} = 55\text{nm}$ ，次峰透射率  $\Delta T \leq 0.5\%$ ，次峰截止  $> 2.0\mu\text{m}$ 。

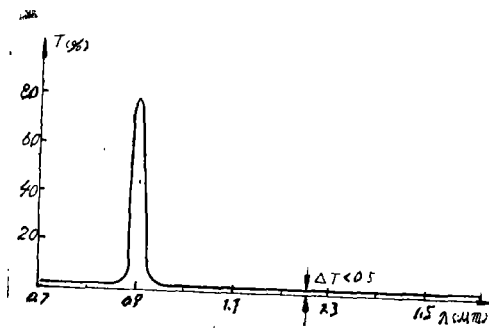


图3 实做的19层双半膜与9层诱导透射膜组合的滤光片光谱特性测量曲线。

膜系为  $G | HLHL 2HLHLHL'HLHL 2HLHLH | A$  和  $G | HLH 1.75L Ag 1.75LHLH | A$ 。  $\lambda_0 = 550\text{nm}$ ,  $n_H = 2.35$ ,  $n_L = 1.35$ ,  $n_G = 1.52$ ,  $n_A = 1.0$ 。

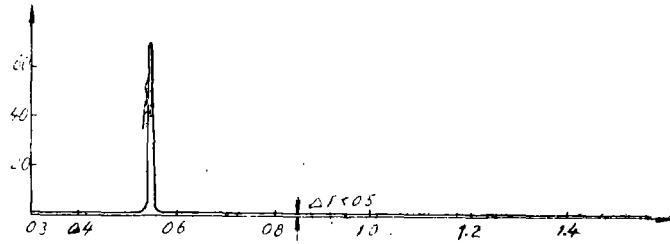


图4 实做的15层前截止膜与11层诱导透射膜组合的滤光片光谱特性曲线。

膜系为  $G(H/2 LH/2)^7 A$  与  $G | LHLH1.87L Ag 1.87LHL$   
 $HL | A$ 。  $\lambda_0 = 900\text{nm}$ ,  $n_H = 2.35$ ,  $n_L = 1.35$ ,  $n_G = 1.52$ ,  $n_A = 1.0$ 。

### 四、讨 论

1. 实验结果表明, 不同层数的诱导透射膜滤光片相对应波段的最佳银层厚度是随着介质反射膜堆层数的增加而增加, 但其半宽度却相应的减小见图5。

2. 银层的厚度变化主要影响峰值透射率、半宽度和背景透射率, 但对中心波长位置的影响甚小。在图6中可看出当银层厚度由20nm增加到25nm时, 其峰值透射率由95%降到86%左右, 半宽度由140nm缩小到100nm; 当银层厚度由20nm减小到19nm时, 峰值透射率变化不大, 但半宽度增加到160nm, 同时通带形状开始变形; 当银层厚度减小到15nm时, 透射率曲线变化显著出现分裂的双峰。由此可见银层厚度的偏差最好不大于 $\pm 10\%$ 。

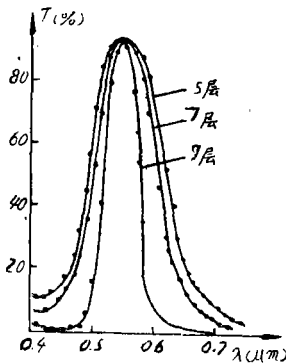


图5 5、7、9层诱导透射膜光谱特性曲线。

$\lambda_0 = 550\text{nm}$ , 5层时银层厚度为20nm, 半宽度为140nm; 7层时银层厚度为25nm, 半宽度为100nm; 9层时银层厚度为35nm, 半宽度为50nm。

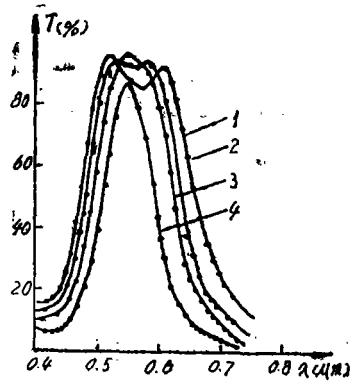


图6 不同银层厚度对滤光片特性的影响。

$\lambda_0 = 550\text{nm}$ ; 曲线1为  $d_{Ag} = 15\text{nm}$ , 2为  $d_{Ag} = 19\text{nm}$ , 3为  $d_{Ag} = 20\text{nm}$ , 4为  $d_{Ag} = 25\text{nm}$ 。

3. 滤光片中心波长的位置主要取决于两间隔层的厚度。当两间隔层的厚度一致地偏薄或偏厚时, 其中心波长相应地短移或长移, 如图7所示。

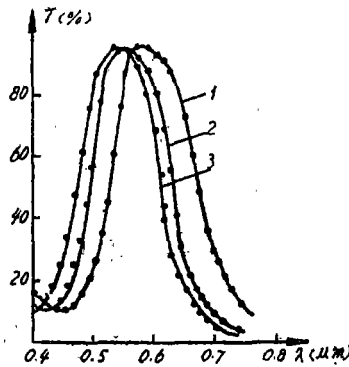


图7 不同间隔层厚度对滤光片性能的影响。  
 $\lambda_0 = 550\text{nm}$ ; 曲线1为…… $1.9L\text{Ag}1.9L$ ……,  
 2为…… $1.75L\text{Ag}1.75L$ ……, 3为…… $1.65L\text{Ag}1.65L$ ……。

但在实际控制过程中很难做到两间隔层完全一致, 这一偏差不仅影响中心波长的位置, 更主要是使峰值透射率下降, 半宽度增加和通带形状变坏。因此尽可能做到准确的控制膜厚是非常必要的。

本项工作得到齐钰同志的指导和帮助, 在本文中的光谱特性曲线由李秀玉同志测量, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 周九林、尹树百译,《光学薄膜技术》,国防工业出版社,1974年12月。
- [2] 唐晋发等编著,《应用薄膜光学》,上海科学技术出版社,1984年10月。
- [3] 张云润,《光学工程》,1980年2期,22~28页。
- [4] 郁德明,《激光与红外》,1980年9期,56~60页。
- [5] 藤原史郎编,《光学薄膜》,共立出版株式会社,1985年2月。

Characteristic Analysis and Preparation of Induced Transmission Filters

Jiang Zhenzi Jiang Fengwen

Abstract

The induced transmission filter with the combination of metallic and dielectrical coatings has good characteristics of high transmission and wide throughput band. This paper reports the fabrication of induced transmission filters that operates in the visible and infrared region respectively. The theory analysis, fabrication technologe and experiment result are also given in the paper.