

# 依势透射率的概念设计诱导透射滤光片

孙 平

(北京师范大学物理系, 北京 100875)

齐 钰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

**摘要** 依势透射率的概念从理上确定了诱导透射滤光片金属膜层的厚度, 免去了传统方法中繁琐的修正工作。再根据特征矩阵的概念进行诱导透射滤光片的精确设计。该方法的间隔层适合任意材料。文中还对带宽的压缩和背景的抑制进行了讨论。

**关键词:** 诱导透射滤光片; 势透射率; 间隔层; 多层减反膜

## 1 引 言

光学薄膜是现代光学的重要组成部分, 在激光、空间技术、光谱技术、化工以及军工产品中均有广泛的应用, 可以说没有光学薄膜就没有现代的光学仪器。金属和介质组合的诱导透射滤光片有着很高的峰值透射率和宽广的截止区, 因此很受欢迎。诱导透射滤光片性能的优劣关键在于金属膜层的厚度, 即要抑制旁通带, 又要有极高的透射率, 这就要求金属膜层的厚度最优。传统的方法从经验出发, 在某一值进行整体膜系的修正。本文先依势透射率的概念确定金属膜层的厚度, 然后再进行整体膜系的设计。

## 2 诱导透射的概念

金属的折射率表示成  $N = n - ik$ ,  $n, k$  是实数,  $n < k$ , 常常又有  $n \ll k$ ,  $k$  为吸收系数, 所以金属膜表现出很强的吸收。1957年伯宁 (Berning) 和特纳 (Turner) 首次提出势透射率 (Potential transmittance) 的概念, 提供了吸收膜系的一种设计方法。在金属膜表面迭加一介质膜使其组合后的导纳为实数, 然后在此基础上迭加一多层减反膜消除这个等效导纳的反射, 此时便可诱发金属膜最大可能的透射率, 这便是诱导透射的概念。

## 3 势透射率的概念

图1表示包含有金属膜的  $r$  层吸收膜系。定义势透射率为

收稿日期: 1994年7月27日

$$\Psi = T/(1 - R)$$

式中  $T$  和  $R$  是整个膜系的透射率和反射率。膜系的吸收率

$$A = 1 - R - T = (1 - R)(1 - \Psi) \quad (2)$$

由此可见,对于给定的反射率  $R$ , 透射率愈大, 则膜系吸收率愈小, 实际的透射率愈高。

吸收膜系的势透射率等于各层势透射率的乘积,

$$\Psi = \prod_{j=1}^r \Psi_j \quad (3)$$

势透射率也为入射界面 1 和出射界面  $r$  的能流密度之比, 即玻印廷 (Poynting) 矢量模之比<sup>①</sup>。

$$S_1 = \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re}(\hat{E}_1 \hat{E}_1^*) \quad (4)$$

$$S_r = \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re}(\hat{E}_r \hat{E}_r^*) \quad (5)$$

$$\Psi = S_r/S_1 \quad (6)$$

$E_1, H_1, E_r, H_r$  分别为界面 1 和  $r$  的电场和磁场。

由平面电磁波的性质可以推导出下列关系式:

$$\begin{pmatrix} \hat{E}_1 \\ \hat{H}_1 \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^r \begin{pmatrix} \cos \delta r & i \sin \delta r / Nr \\ iNr \sin \delta r & \cos \delta r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}_r \\ \hat{H}_r \end{pmatrix} \quad (7)$$

令

$$\begin{pmatrix} \hat{m}_1 & \hat{m}_3 \\ \hat{m}_2 & \hat{m}_4 \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^r \begin{pmatrix} \cos \delta r & i \sin \delta r / Nr \\ iNr \sin \delta r & \cos \delta r \end{pmatrix} \quad (8)$$

则

$$\begin{pmatrix} \hat{E}_1 \\ \hat{H}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{m}_1 & \hat{m}_3 \\ \hat{m}_2 & \hat{m}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}_r \\ \hat{H}_r \end{pmatrix} \quad (9)$$

根据导纳  $Y$  的定义:  $\hat{Y} = \hat{H}_r / \hat{E}_r$ , 有

$$\hat{E}_1 = (\hat{m}_1 + \hat{m}_3 \hat{Y}) \hat{E}_r \quad (10)$$

$$\hat{H}_1^* = (\hat{m}_2 + \hat{m}_4 \hat{Y}^*)^* \hat{E}_r^* \quad (11)$$

令  $\hat{Y} = X + iZ$ , 那么

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{\operatorname{Re}(\hat{E}_r \hat{H}_1^*)}{\operatorname{Re}(\hat{E}_1 \hat{H}_1^*)} \\ &= \frac{x |\hat{E}_r|^2}{\operatorname{Re}[(\hat{m}_1 + \hat{m}_3 \hat{Y})(\hat{m}_2 + \hat{m}_4 \hat{Y}^*)] |\hat{E}_r|^2} \\ &= \frac{x}{\operatorname{Re}[(\hat{m}_1 + \hat{m}_3 \hat{Y})(\hat{m}_2 + \hat{m}_4 \hat{Y}^*)]} \quad (12) \end{aligned}$$

设  $\hat{m}_1 = a_1 + b_1, \hat{m}_2 = a_2 + b_2, \hat{m}_3 = a_3 + b_3, \hat{m}_4 = a_4 + b_4, \hat{Y}, \hat{m}_1, \hat{m}_2, \hat{m}_3, \hat{m}_4$  都变成两个实数组成的复数, 全部代入 (12) 式, 最终得到  $\Psi$  的表达式:

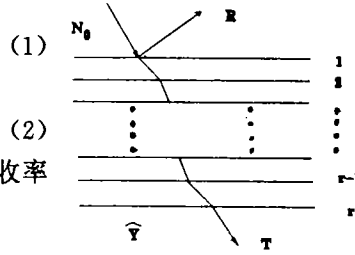


图 1 包含金属膜的  $r$  层吸收膜系

$$\Psi = \frac{x}{C_0 + C_1x + C_2Z + C_3(x^2 + Z^2)} \quad (13)$$

其中

$$C_0 = a_1a_2 + b_1b_2$$

$$C_1 = a_2a_3 + a_1^2 + b_2b_3 + b_1^2$$

$$C_2 = a_3b_2 - b_3a_2$$

$$C_3 = a_3a_1 + b_3b_1$$

由 (13) 式不难看出  $\Psi$  与出射导纳有关系, 对于介质薄膜  $K=0$ , 势透射率为 1。因此, 吸收膜系的势透射率即为各层金属膜势透射率的乘积。对 (13) 式求导并令其为零,

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{C_0 + C_2Z + C_3(z^2 - x^2)}{[C_0 + C_1x + C_2Z + C_3(x^2 + z^2)]^2} = 0;$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{-x(C_2 + 2C_3z)}{[C_0 + C_1x + C_2Z + C_3(x^2 + z^2)]^2} = 0;$$

$$X_{\max} = \sqrt{C_0C_3 - C_2^2/4C_3}$$

$$Z_{\max} = -C_2/2C_3$$

得到最大势透射率的表达式

$$\Psi_{\max} = \frac{1}{C_1 + 2\sqrt{C_0C_3 - C_2^2/4}} \quad (14)$$

### 3.1 确定金属膜的厚度 $d$

当金属膜仅有一层时, 整个膜系的最大势透射率仅仅和这层金属膜的光学常数有关。设金属膜的折射率、吸收率、位相厚度及几何厚度分别为  $n, k, \delta, d$ , 复折射率写成  $N = n - ik$ , 那么金属膜特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} \hat{m}_1 & \hat{m}_3 \\ \hat{m}_2 & \hat{m}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta & i\sin\delta/N \\ iN\sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \quad (15)$$

设光线垂直入射,  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n - ik)d$ 。

对于一确定的波长,  $n, k$  亦确定,  $\Psi_{\max}$  仅仅是厚度  $d$  的函数。公式 (14) 难以写成  $d$  的显式函数, 由  $\Psi_{\max} \sim d$  的对应关系不妨选择合适的  $d$  进行扫描。金属膜超薄不符合连续介质的假设, 而过厚对透射率的损失太大。  $\Psi_{\max}$  当然是可能的最大透射率, 它大于或等于整个膜系的透射率。

现举例说明。选 Ag 作为透射的金属材料。根据表 1 中 Ag 的参数, 对 Ag 做  $300\text{\AA} \sim 1000\text{\AA}$  扫描。图 2 给出扫描结果。次希望整个膜系的透射率在  $5000\text{\AA}$  为  $T = 82.2\%$ , 选  $d = 700\text{\AA}$ 。

由图 2 不难看出, 对于一给定的势透射率, 波长越大, 选取的  $d$  应越小。

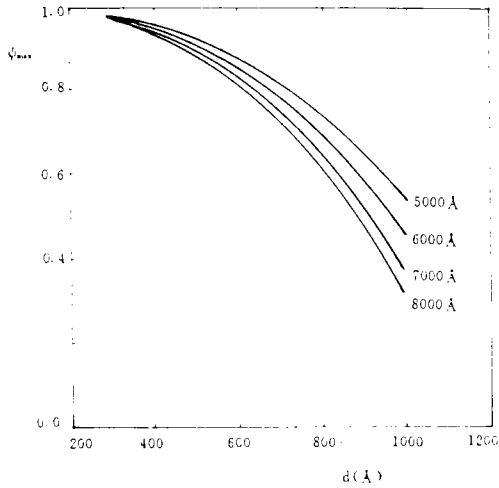


图2 最大透射率与金属膜层厚度的关系

表1. Ag 的光学常数<sup>[2]</sup>

$\lambda$ (Å)	$n$	$k$
5000	0.050	2.87
6000	0.060	3.75
7000	0.075	4.62
8000	0.090	5.45

## 4 透射滤光片的设计

### 4.1 膜系设计的方法

许多文献<sup>[2-4]</sup>都详细地描述了设计透射滤光片的方法, 其中麦克劳德先生的特征矩阵方法最直观简便。现仍采用特征矩阵方法来设计, 所不同的是这里不存在  $n \ll k$  假设, 故解是精确的。

在金属膜上加一层折射率为  $n_F$  的介质膜层, 使其与金属膜组合后的导纳为实数  $\mu$ 。将金属膜与  $n_F$  膜的组合视为新的基底, 在新基底上迭加高低折射率交替的  $\lambda/4$  多层减反膜, 以消除新基底上的反射。假设金属膜无限厚。

在金属膜上迭加  $n_F$  膜层, 设  $n_F$  层的位相厚度为  $\delta_F$ 。光学导纳  $\mu$  可由导纳矩阵求出。设光线垂直入射。

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_F & i\sin\delta_F/n_F \\ in_F\sin\delta_F & \cos\delta_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n - ik \end{pmatrix}$$

$$\mu = \frac{C}{B} = \frac{in_F\sin\delta_F + (n - ik)\cos\delta_F}{\cos\delta_F + (n - ik)i\sin\delta_F/n_F}$$

整理, 令实部、虚部分别相等, 且  $\cos\delta_F \neq 0$ 。

$$n - \mu = \mu k \cdot \text{tg}\delta_F/n_F \quad (16)$$

$$-k = (\mu n/n_F - n_F)\text{tg}\delta_F \quad (17)$$

消去  $\delta$  得到  $\mu$  的方程:

$$n\mu^2 - (n^2 + k^2 + n_F^2)\mu + n_0 \quad n_F^2 = 0$$

$$\mu = \frac{(n^2 + k^2 + n_F^2) \pm \sqrt{(n^2 + k^2 + n_F^2)^2 - 4nn_F^2}}{2n} \quad (18)$$

那么

$$\operatorname{tg} \delta_F = (n - \mu)n_F/\mu_F; \quad \delta_F = \operatorname{arctg} \delta_F \quad (19)$$

若  $\operatorname{tg} \delta_F \geq 0$ , 取  $\delta_F$  为 I 象限角,  $\operatorname{tg} \delta_F < 0$ , 取  $\delta_F$  为 III 象限角, 这样保证了  $\delta_F$  对应的光学厚度为最薄。

现有导纳为  $\mu$  的新基底, 减反膜应该设计得简单而又易于实现。厚度为  $\lambda/4$  高低折射率交替的多层膜最为简便易行。

周期膜系  $(M_H M_L)^P$  或  $(M_H M_L)^P M_H$ , 在中心波长处的组合导纳分别为<sup>[2]</sup>

$$Y_{2P} = (n_H/n_L)^{2P} \cdot \mu \quad (20)$$

$$Y_{2P+1} = (n_H/n_L)^{2P} \cdot (n_H^2/\mu) \quad (21)$$

现设入射媒质为  $n_g$ , 那么有  $Y_{2P} = n_g$  或  $Y_{2P+1} = n_g$

当减反膜堆为偶数层时, 层数  $P$  为

$$P = 0.51g(n_g/\mu)/\lg(n_H/n_L) \quad (22)$$

当减反膜堆为奇数层时, 层数  $P$  为

$$P = 0.51g(n_g \cdot \mu/n_H^2)/\lg(n_H/n_L) \quad (23)$$

根据膜系的透射定理, 膜系的透射率与光的入射方向无关。入射媒质、减反膜堆和间隔层 ( $n_F$  层) 关于金属膜镜象对称。

至此, 透射滤光片膜系设计全部完成, 归纳如下。

- (1) 选定中心波长, 选定金属材料及其中心波长处的光学参数  $n, k$ 。
- (2) 对金属膜层的适当  $d$  进行扫描, 使  $\Psi$  等于或大于所期望的整个膜系的透射率, 确定  $d$ 。
- (3) 选定作间隔层的材料  $n_F$ , 由 (18)、(19) 式计算  $\delta_F$ 。
- (4) 选定高低折射率材料  $n_H, n_L$ , 由 (18)、(22) 或 (23) 计算减反膜层数  $P$ 。由于实际的金属膜层非无限厚, 所以  $P$  可适当减少。

### 4.2 设计实例

(1) 金属膜选定 Ag, 当  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  时,  $n = 0.05, k = 2.87$ , 期望滤光片的透射率为 80.0% 左右, 确定  $d = 700 \text{ \AA}$ , 选定间隔层为  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $n_F = 1.35, n_g = 1.52$ , 选定  $n_H = 2.35$  (ZnS)  $n_L = 1.35$  ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), 最终膜系为  $G/(HL)^2H1.72 \text{ LAg}1.72 \text{ LH}(\text{LH})^2/G$ 。基片上镀完透射膜后要用盖片胶合, 盖片同基片, 图3中  $a$  给出该膜系的理论曲线。

(2) 取  $n_F = 2.35$  (ZnS), 减反膜堆为偶数, 其它同前。最终设计结果为  $G/(HL)^30.56\text{HAg}0.56\text{H}(\text{LH})^3/G$ 。图3中  $b$  给出该膜系的理论曲线。

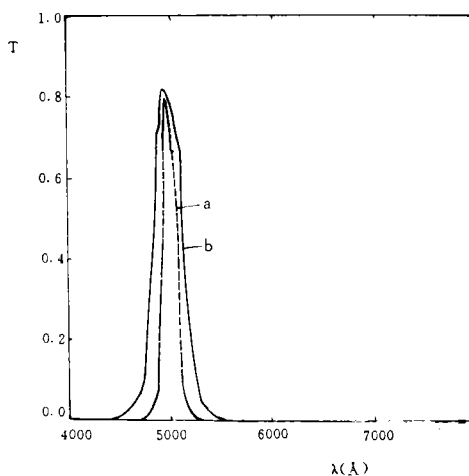


图3. a: 膜系  $G(HL)^2G$  理论曲线。  
b: 膜系  $G/(HL)^30.56\text{HAg}0.56\text{H}(\text{LH})^3/G$  理论曲线。

## 5 带宽的压缩与背景的抑制

(1) 增加金属膜的厚度  $d$ , 可以压缩带宽, 加深背景, 但峰值透射率降低。

(2) 增加干涉级次可以压缩带宽。

(3) 在透射滤光片膜系中的一边或对称的两侧插入 F-P 滤光片, 可以压缩带宽、抑制背景。如膜系  $G/(HL)^2H$   
 $1.72LAg1.72LH(LH)^2/G$ 。改造成  $G/(HL)^3H2LH0.72LAg0.72LH2LH(LH)^3/G$  后带宽明显缩小、背景大大受到抑制, 而峰值透射率并不降低, 见图4中 B

(4) 采用多重滤光片。滤光片背景抑制取决于吸收膜厚度的总和, 而不管它细分成多少层。透射率是各吸收膜透射率的乘积。参照全介质多半波滤光片的设计, 把  $(L'AgL')$  看成一个中心对称的基本周期, 它可以重复多次, 从而形成多重透射滤光片。如将  $G/(HL)^2H1.72LAg1.72LH(LH)$  改造成  $G/HLH1.72LAg3.44LAg1.72LHLH/G$ ,  $Ag$  的厚度仍为  $700 \text{ \AA}$ 。见图4中 C。

在实际应用中应根据不同的需要选择不同的方法, 既要达到目的, 又要简便易行。

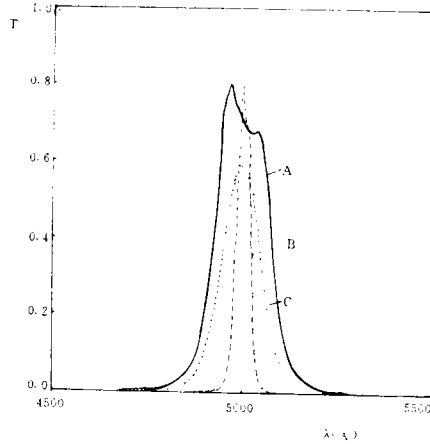


图4. 理论计算曲线

A:  $G/(HL)^2H1.72LAg1.72LH(LH)^2/G$ .

B:  $G/(HL)^3H2LH0.72LAg0.72LH(LH)^3/G$

C:  $G/HLH1.72LAg3.44LAg1.72LHLH/G$

## 6 结 语

(1) 本文提出的透射滤光片的设计方法给出严格的金属膜层厚度  $d$  和精确的间隔层位厚度  $\delta_F$ 。

(2) 本文概括的几种压缩带宽、抑制背景的方法可作参考。

(3) 实现透射膜系的工艺十分复杂, 许多人在这方面作了大量的工作并论述<sup>[5][6]</sup>。作者将在以后对工艺进行详细讨论。

### 参 考 文 献

- [1] Г. С. 兰斯别尔格著, 王鼎昌译, 光学. 北京: 高等教育出版社, 1956, 25-26
- [2] 唐晋发、郑权编著, 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984, 89, 350
- [3] H. A 麦克劳德著, 周九林、尹树百译, 光学薄膜技术. 北京: 国防工业出版社, 1974, 296-305
- [4] 林永昌、卢维强编著, 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990, 298-302
- [5] 张家戎, 光电工程, 1991, 18 (2): 58-62
- [6] 黄祥成, 应用光学, 1991, 12 (4): 41-45

## Design of Induced Transmission Filter According to Potential Transmission Concept

Sun Ping

*(Department of Physics, Beijing Normal University,  
Beijing 100875)*

Qi Yu

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanism,  
Chinese Academy of Sciences, 130021)*

### Abstract

The metal layer thickness of induced transmission filter is first determined according to potential transmittance concept. Then a correct design of induced transmission filter is obtained without complex correction. How to reduce band width and suppress background is also discussed.

**Key Words:** Induced transmission filter, Potential transmittance, Spacing layer, Multilayer anti-reflective films.