

## 薄膜的光学特性分析

田来科

(西北大学物理系 710069)

**摘要** 通过 CAD, 对高反膜、增透膜和干涉滤光片的光学特性进行了研究和分析, 指出设计和使用中应注意的问题。

**关键词** 光学薄膜; 反射; 透射

## 1 薄膜的特征矩阵

对于单层介质薄膜的反射, 如图 1, 薄膜镀在基片 S 上, 根据 Maxwell 方程组及  $E$  和  $H$  的切分量在界面两侧连续的边界条件, 把入射面的  $E_0, H_0$  与透过最后界面的  $E_s, H_s$  两者切向分量联系得

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & i \sin \delta_1 / \eta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s \\ H_s \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E_s \\ H_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

又  $H_0 = Y E_0, H_s = \eta_s E_s$ , 则式(1)成为

$$E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ Y \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} \quad (2)$$

令

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix}$$

而矩阵

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & i \sin \delta_1 / \eta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

称为薄膜的特征矩阵, 它包含了薄膜的全部有用参数.  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1$  为膜的位相厚度,  $\Delta = n_1 d_1 \cos \theta_1$

为其光学厚度,  $i = \sqrt{-1}$ , 矩阵  $\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix}$  定义为基片和薄膜组合的系统(称为膜系)的特征矩阵, 而

$$Y = C/B = \frac{\eta_s \cos \delta_1 + i \eta_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + i (\eta_1 / \eta_s) \sin \delta_1} \quad (5)$$

称为膜系的光纳, 利用光纳, 光在单层薄膜上的反射可简化成光纳  $\eta_0$  和  $Y$  形成的单一界面上的反射

$$r_Q = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad R_Q = r_Q \cdot r_Q^* \quad (6)$$

由此可推对多层介质膜系的特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_k \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

而膜系的光纳和反射率分别为

$$Y = C/B \quad (8)$$

$$r_Q = (\eta_0 - Y) / (\eta_0 + Y) \quad R_Q = r_Q \cdot r_Q^* \quad (9)$$

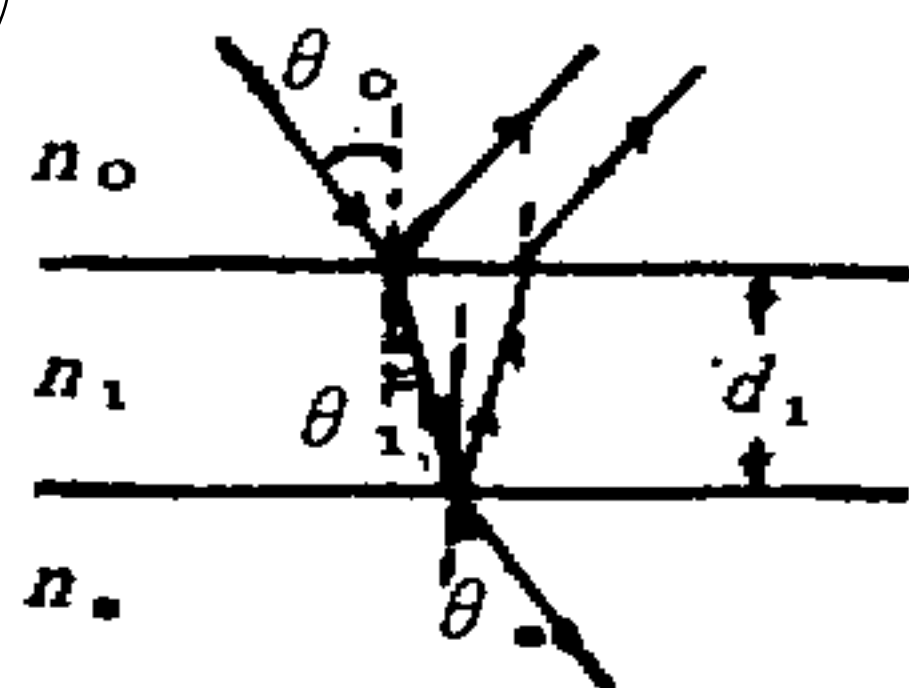


图 1 单层薄膜的反射

(3) Fig. 1 Reflection of a single-layer film

式中  $r_Q, R_Q, \eta_0$  和  $Y$  均与偏振态有关.  $Q$  表示 s 或 p 态, 自然光的反射率

$$R = \frac{1}{2} (R_s + R_p) \quad (10)$$

## 2 薄膜的光学特性分析

如果单层膜的光学厚度

$$\Delta = m \cdot \lambda / 2 \quad (m=0, 1, 2, 3, \dots)$$

则特征矩阵

$$M = \pm \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

为一单位阵, 对膜系的反射率无影响.

当单层膜的光学厚度

$$\Delta = (2m+1)\lambda/4$$

时, 特征矩阵

$$M = \pm \begin{pmatrix} 0 & i/\eta \\ i\eta & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

对应的反射率为极值. 当膜的折射率大于基底折射率时, 反射率为极大, 即高反. 小于时为极小, 即增透. 根据上述原理, 利用 CAD 对薄膜的光学特性(主要为可见区)进行计算分析如下.

### 2.1 高反膜

膜系公式  $G|(HL)^kH|A$ , 取折射率: 空气(A)  $n_0=1.0$ , 基底 G(玻璃)  $n_t=1.52$ , H 层(ZnS)  $n_H=2.35$ , L 层(MgF<sub>2</sub>)  $n_L=1.38$ , 波长范围 400~800nm, 波长间隔  $\Delta\lambda=10\text{nm}$ , 中心波长  $\lambda_0=600\text{nm}$ , 每层膜光学厚度为  $\lambda_0/4$ . 1) 当入射角  $\theta_0=0.0^\circ$  时, 计算不同层数( $k$ )的膜其反射率如表 1.

由此可见, 随着膜层数  $k$  增加, 对应中心波长的最大反射率提高, 且  $R$  大于等于 99% 的高反射的光谱范围增大,  $R=R_s=R_p$ , 最大反射率  $R_{\max}$  对应波长  $\lambda_m=\lambda_0$ .

2) 当入射角  $\theta_0 \neq 0^\circ$  时, 以  $k=23$  的膜为例, 计算结果如图 2 和表 2. 由此可见随着光波入射角的增加, 当  $\theta_0 \geq 30.0^\circ$  后,  $R$  减小, 且在许多波长处  $R \neq R_p \neq R_s$ ,  $R_p$  变化较大,  $R_s$  变化较小; 且  $\lambda_m \neq \lambda_0$ , 逐渐向短波移动,  $\Delta\lambda_m$ 、 $\Delta\lambda_{sm}$ 、 $\Delta\lambda_{pm}$  明显变小, 这就提示人们在设计环型腔激光器时必须考虑谐振腔反射率的变化, 因为环型腔腔片是工作在  $\theta_0 \geq 30^\circ$  条件下(三环腔  $\theta_0=30^\circ$ , 四环腔  $\theta_0=45^\circ$ , ...). 故此, 环型腔最好使腔内振荡的光波为 s 态(TE 波)且应在设计膜系时使  $\lambda_m$  正好等于振荡光波中心波长.

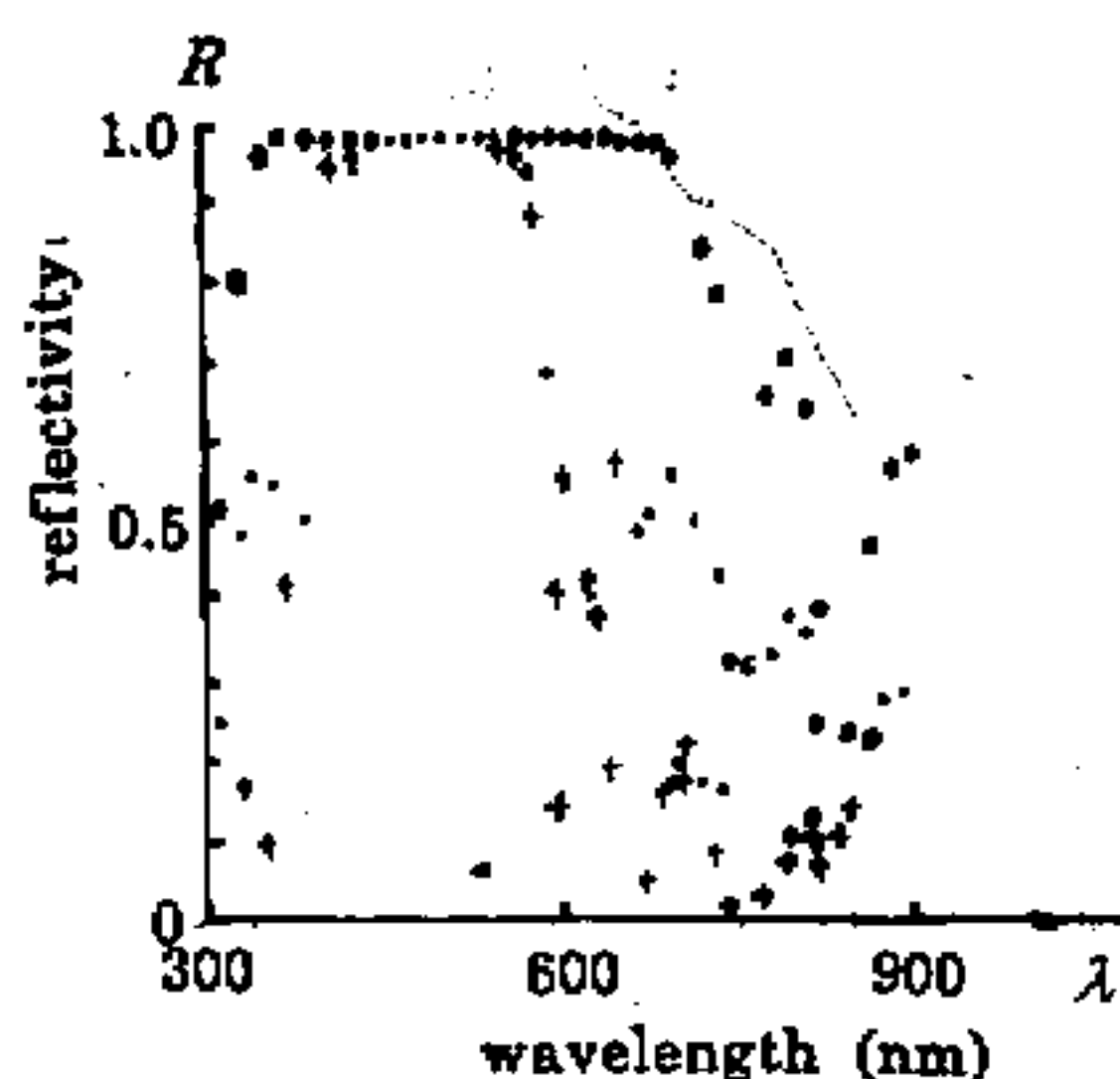


图 2 高反膜  $k=12$  入射角  $\theta_0=0.0^\circ$

$\cdot - R$   $+ - R_p$   $0 - R_s$

Fig. 2 High-reflectance film  $k=23$  incident angle  $\theta_0=0.0^\circ$

$\cdot - R$   $+ - R_p$   $0 - R_s$

表 1 不同层数反射膜的光学特性

| $k$ | $R_{\max}=R_{s\max}=R_{p\max}$ | $\lambda_m(\text{nm})$ | $R \geq 0.99$ 对应的 $\Delta\lambda(\text{nm})$ |
|-----|--------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| 13  | 0.99815                        | 600                    | 685—535=150                                  |
| 15  | 0.99936                        | 600                    | 695—530=165                                  |
| 17  | 0.99978                        | 600                    | 700—525=175                                  |
| 19  | 0.99992                        | 600                    | 710—520=190                                  |
| 21  | 0.99997                        | 600                    | 710—520=190                                  |
| 23  | 0.99999                        | 600                    | 710—520=190                                  |

表 2 不同入射角  $\theta_0$  膜片的光学特性 ( $k=23$ )

| $\theta_0$ (度) | $R_{\max}$ | $\lambda_m$ (nm) | $\Delta\lambda_m$ (nm) | $R_{\min}$ | $\Delta\lambda_{\min}$ (nm) | $R_{p\max}$ | $\Delta\lambda_{p\max}$ (nm) |
|----------------|------------|------------------|------------------------|------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|
| 0.0            | 0.99999    | 600.0            | 630—580=50             | 0.99999    | 630—580=50                  | 0.99999     | 630—580=50                   |
| 15.0           | 0.99999    | 600.0            | 620—570=50             | 0.99999    | 630—570=50                  | 0.99999     | 610—580=30                   |
| 30.0           | 0.99998    | 575.0            | 600—550=50             | 0.99999    | 540—530=10<br>630—620=10    | 0.99997     | 580—560=20                   |
| 45.0           | 0.99993    | 545.0            | 550—540=50             | 0.99999    | 490—490=0<br>610—610=0      | 0.99986     | 560—540=20                   |
| 60.0           | 0.99949    | 510.0            | 510—510=0              | 0.99999    | 610—610=0                   | 0.99898     | 510—510=0                    |
| 75.0           | 0.99549    | 490.0            | 490—490=0              | 0.99999    | 410—410=0                   | 0.99099     | 490—490=0                    |

注:  $\Delta\lambda_m-R_{\max}$  对应的波长范围;  $\Delta\lambda_{\min}$ 、 $\Delta\lambda_{p\max}$  分别为  $R_{\min}$  和  $R_{p\max}$  对应的波长范围

2.2 干涉滤光片

对于单半波干涉滤光片,其无间隔层膜系公式为  $G|(HL)^p(LH)^p|A$ ,取  $p=5(k=20)$ ,  $H-ZnS$ ,  $L-MgF_2$ , 计算如图 3(a); 有间隔层膜系公式  $G|(HL)^p2N(LH)^p|A$ ,取  $p=3,5$  计算如图 3(b)和表 3.

由此可见,在  $p$  相同情况下,有间隔层的滤光片的通带半宽度  $\Delta\lambda$  变窄,滤光的单色性提高; $k$  愈大,  $\Delta\lambda$  愈小; 相同层数滤光片,  $\theta_0 \neq 0$  时,  $\Delta\lambda$  变宽,且对应  $\lambda_m$  向短波方向偏移,对双半波滤光片,膜系公式为  $G|(HL)^p2H(LH)^pL(HL)^p2H(LH)^p|A$ ,取  $p=3$  计算之亦有类似结果.

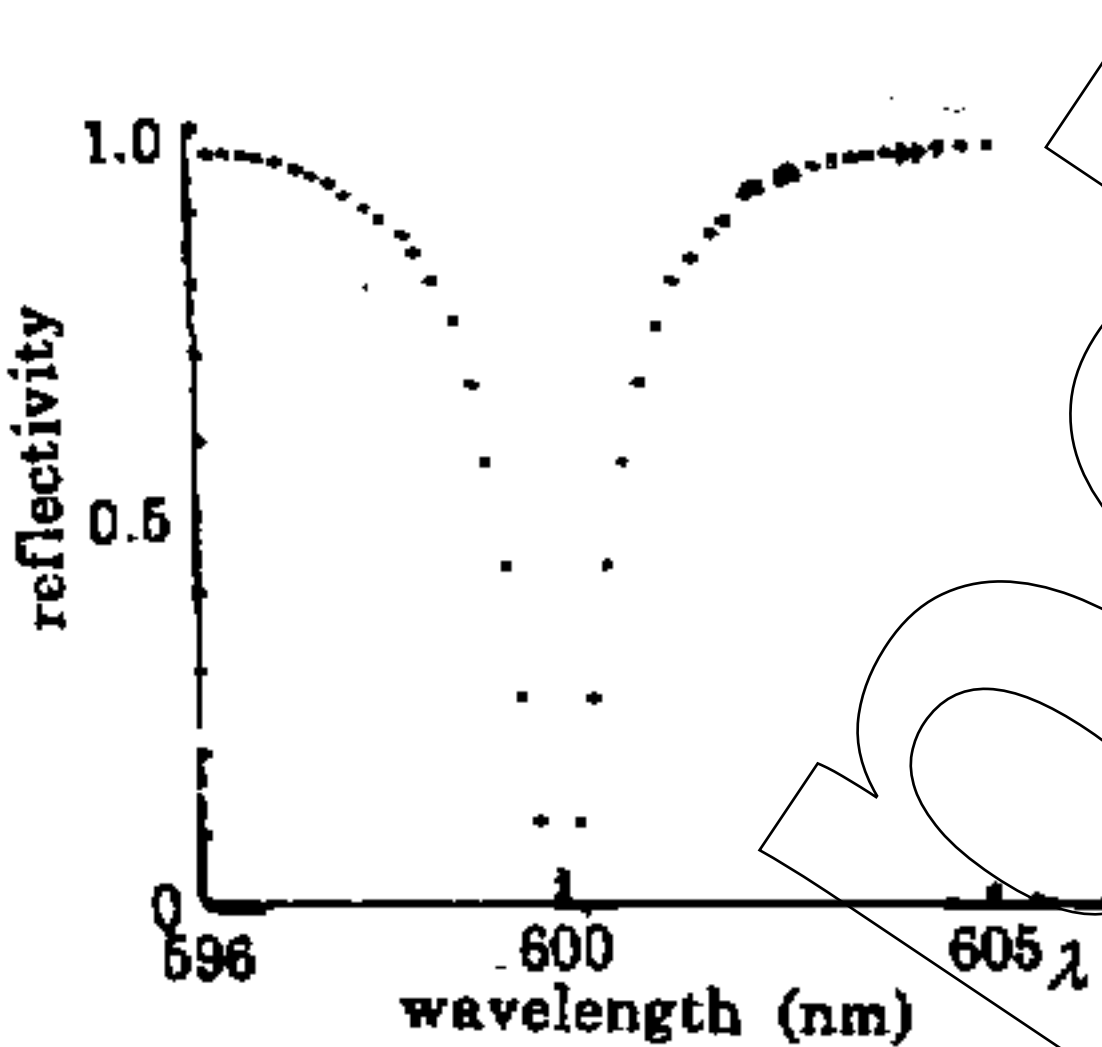


图 3(a) 干涉滤光片  $k=20, \theta_0=0.0^\circ$   
Fig. 3(a) Interference filter  $k=20, \theta_0=0.0^\circ$

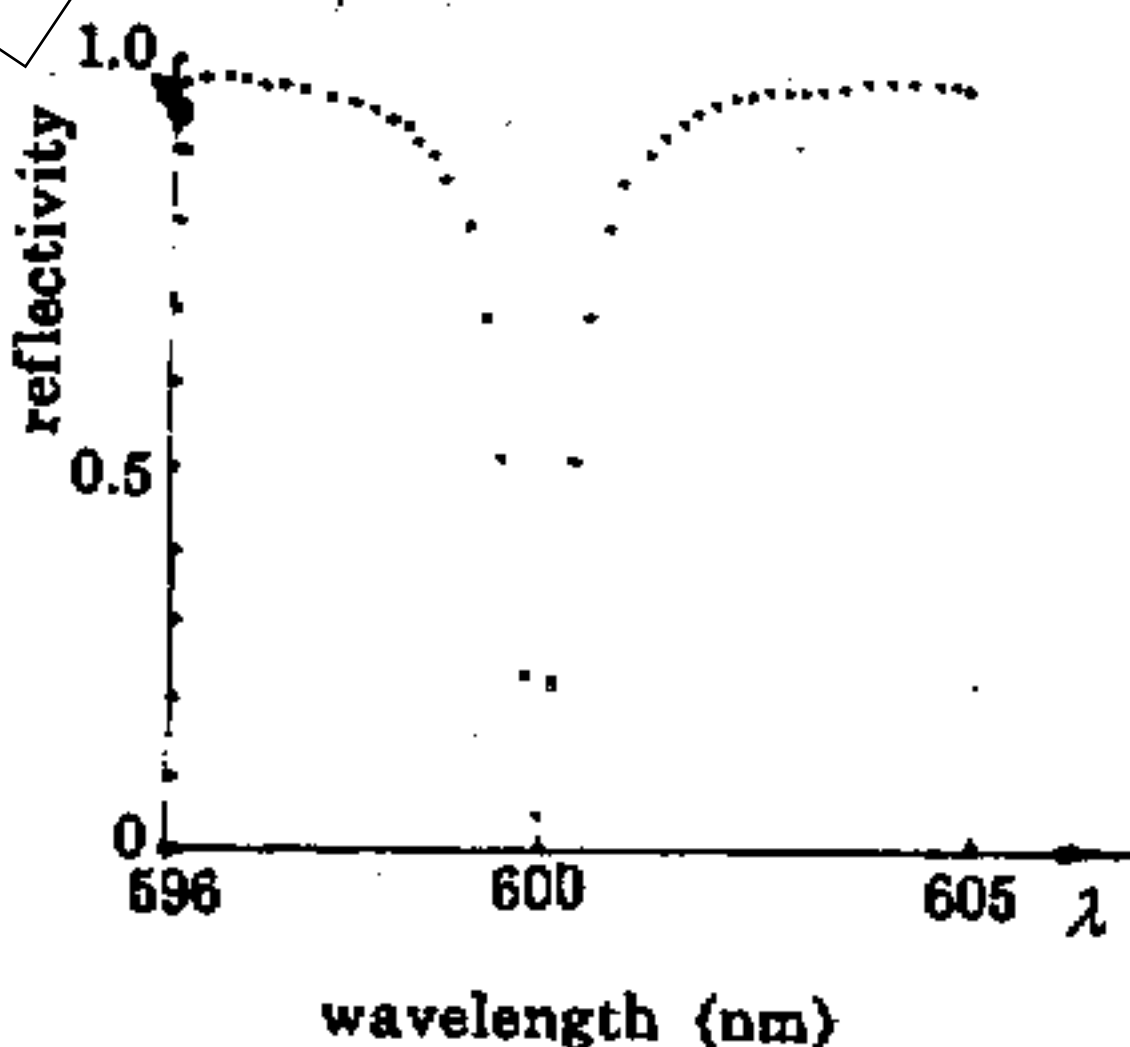


图 3(b) 干涉滤光片  $k=21, \theta_0=0.0^\circ$   
Fig. 3(b) Interference filter  $k=21, \theta_0=0.0^\circ$

表 3 干涉滤光片的光学特性

| 间隔层 | $\theta_0$ (度) | $k$ | $T_{\max}$ | $\lambda_m$ (nm) | $T \geq 0.8$ 时 $\Delta\lambda$ (nm) | $\Delta\lambda$ (nm) |
|-----|----------------|-----|------------|------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 无   | 0.0            | 20  | 0.95742    | 600.00           | 600.20—599.80=0.40                  | 600.70—599.30=1.40   |
|     |                | 21  | 0.95742    | 600.00           | 0                                   | 600.00—599.60=0.80   |
| 有   | 5.0            | 21  | 0.95730    | 599.30           | 599.40—599.20=0.20                  | 599.80—598.80=1.00   |
|     | 0.0            | 13  | 0.97122    | 600.00           | 601.60—598.50=3.10                  | 603.50—596.60=6.90   |

低通滤波器(长波通)  $G|\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^p|A$  取  $\lambda_0=440nm$ , 高通滤波器(短波通)  $G|\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^p|A$  取  $\lambda_0=760nm$ ,  $n_L=1.35$ (冰晶石),  $n_H=2.35$ (Zn. S), 波长范围 300~900nm,  $p=7,9$ , 余同前计算之, 结果如图 4 和表 4.

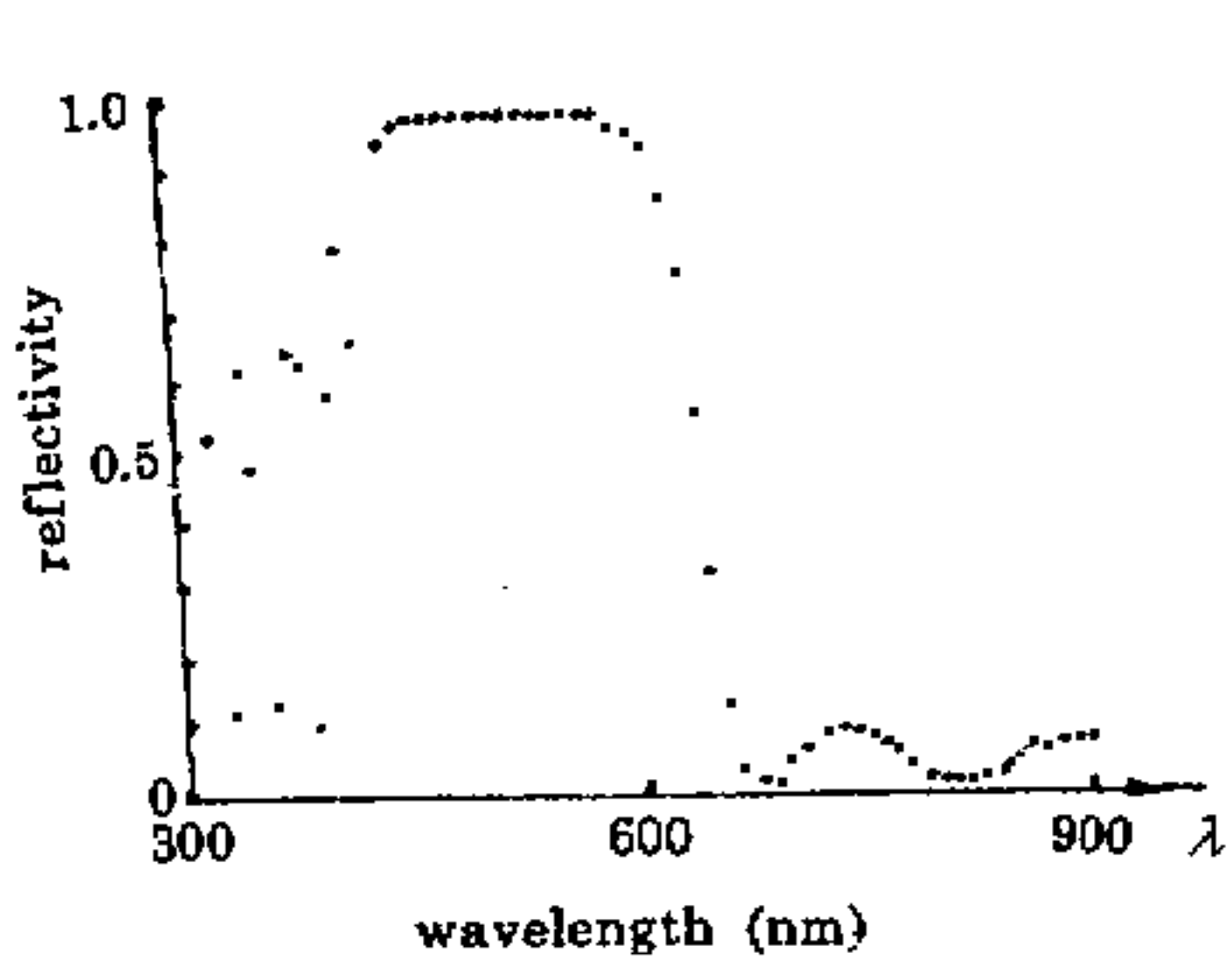


图 4(a) 低通滤波器,  $k=21$   $\theta_0=0.0^\circ$   
Fig. 4(a) Low pass filter,  $k=21$   $\theta_0=0.0^\circ$

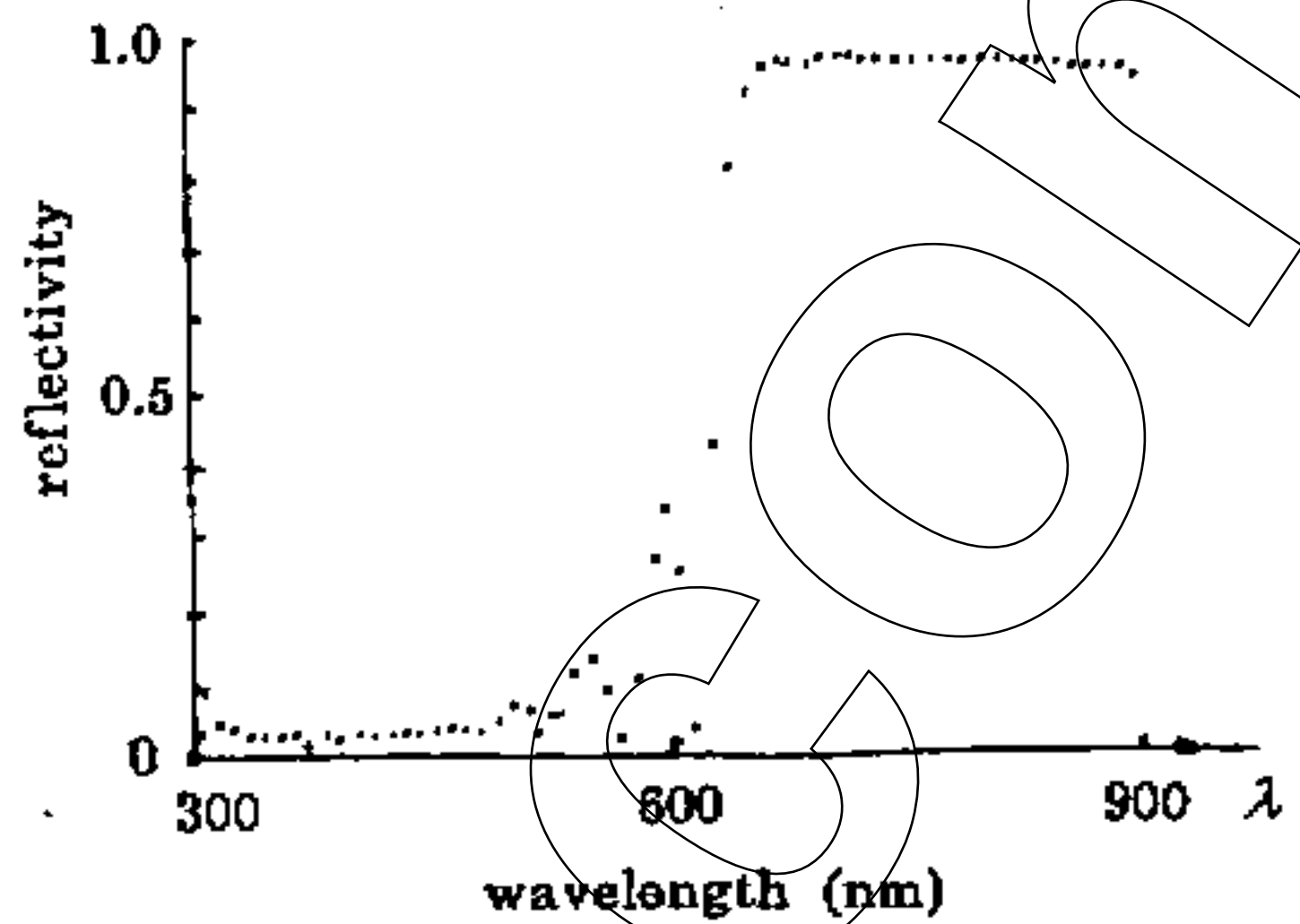


图 4(b) 高通滤波器,  $k=21$   $\theta_0=0.0^\circ$   
Fig. 4(b) High pass filter,  $k=21$   $\theta_0=0.0^\circ$

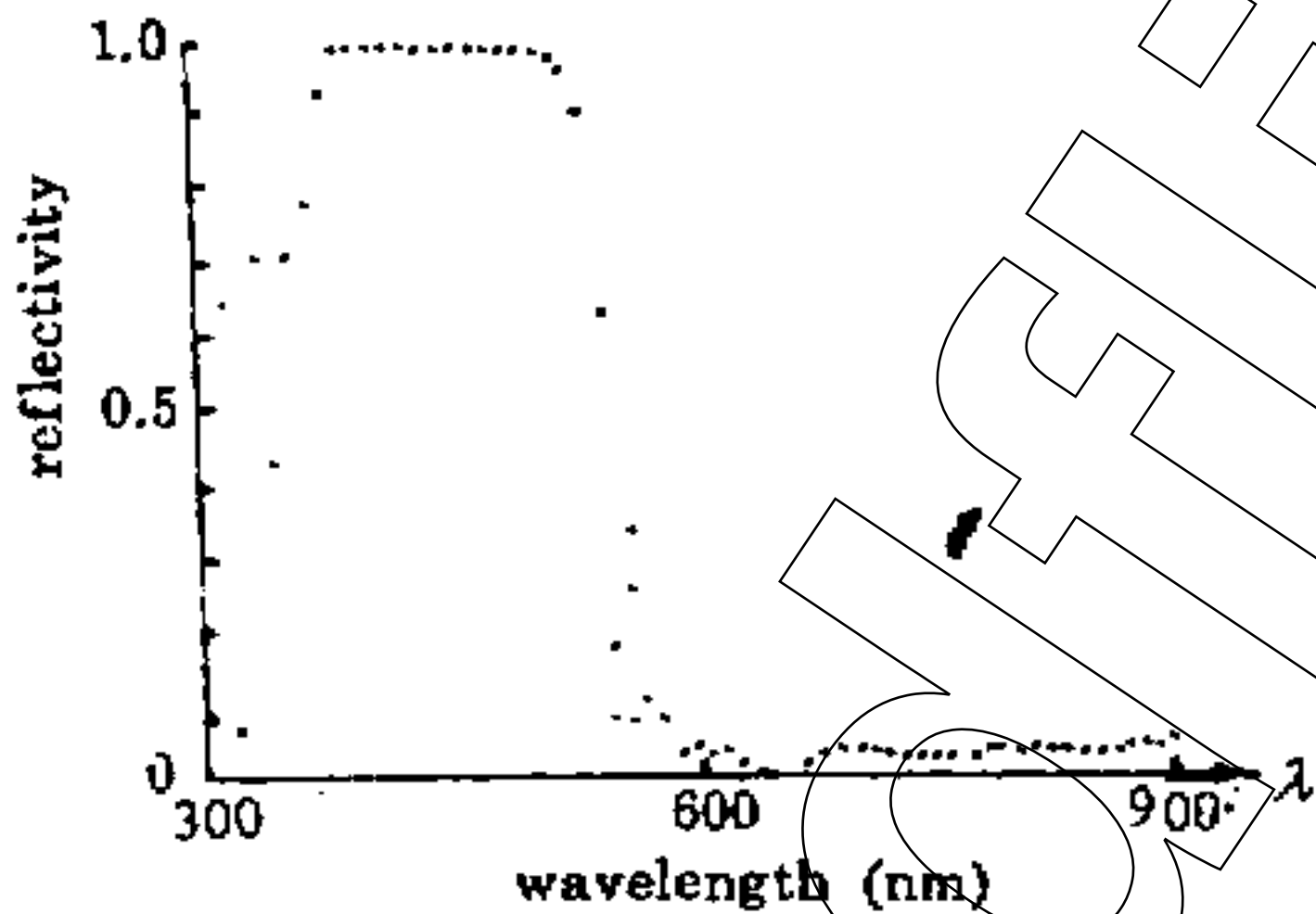


图 4(c) 低通滤波器  
 $k=27$   $\theta_0=0.0^\circ$   
Fig. 4 Low pass filter  
 $k=27$   $\theta_0=0.0^\circ$

由此可见,同样条件下  $p$  增加,  $T_{\max}$  增加,低通滤波器  $\lambda_m$  向短波偏移,高透区扩大,透过截止区也向短波移;高通滤波器  $\lambda_m$  向长波偏移,高透区扩大,透过截止区未变;中心波长  $\lambda_0$  选取至关重要,当将低通滤波器  $\lambda_0$  选到长波段(例 760nm),高通滤波器  $\lambda_0$  选到短波段(例 440nm)时,不但  $T_{\max}$  减小,高透区缩小,截止区也缩小,且出现严重的波纹现象,这就是说,在设计截止滤光片时,必须选择最佳  $\lambda_0$ ,即每层膜的最佳厚度,则可达到消除波纹,扩大截止区的双重效果,通过对  $p=7$  的高、低通滤波器  $\theta_0=0.0^\circ$ 、 $15.0^\circ$ 、 $30.0^\circ$  计算结果表明,随着  $\theta_0$  增大,性能变差,但相对单、双半波滤光片其对入射角的敏感性要小得多。

表 4 高、低通滤波器光学特性 ( $\theta_0=0.0^\circ$ )

| 类型             | $p$ | $\lambda_0$ (nm) | $T_{\max}$ | $\lambda_m$ (nm) | $T \geq 0.9$ 的 $\Delta\lambda$ (nm) | 截止区 $T < 0.1$ 的 $\Delta\lambda$ (nm) |
|----------------|-----|------------------|------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 低通滤波器<br>(长波通) | 7   | 449              | 0.99432    | 680              | 900—660=240                         | 610—440=170                          |
|                | 9   | 440              | 0.99502    | 660              | 900—550=350<br>300,320,             | 530—370=160                          |
|                | 7   | 760              | 0.95736    | 810              | 840—790=50<br>670—650=20            | 540—380=160                          |
| 高通滤波器<br>(短波通) | 7   | 760              | 0.96476    | 370              | 530—300=230<br>570,620              | 900—650=250                          |
|                | 9   | 760              | 0.96567    | 390              | 520—300=220,590<br>560—550=10,630   | 900—650=250                          |
|                | 7   | 440              | 0.95742    | 380              | 380,410,440,480<br>520,570,620      | 900—640=260                          |

### 3 增透膜

选四层增透膜,膜系公式为  $A|LHML|G$ , 其中  $M$  表示折射率处高、低之间的介质,其膜厚分布为  $\lambda_0/4|\lambda_0/2|\lambda_0/4|\lambda_0/4$ , 取  $\lambda_0=550\text{nm}$ , 光谱范围为  $400\sim 800\text{nm}$ ,  $\Delta\lambda=10.0\text{nm}$ , 选两种系列材料计算之。其一,  $A|\text{MgF}_2|\text{TiO}_2+\text{Ta}_2\text{O}_5|\text{Al}_2\text{O}_3|\text{肖特 8329 玻璃}|G$  (图 5(a)), 对应折射率  $1.0|1.38, 2.25, 1.62|1.48$   $1.52$ ; 其二,  $A|\text{MgF}_2|\text{ZnS}|\text{CeF}_3|\text{MgF}_2|G$  (图 5(b)), 对应折射率  $1.0|1.38, 2.35, 1.63, 1.38|1.52$ 。结果如图 5 和表 5。

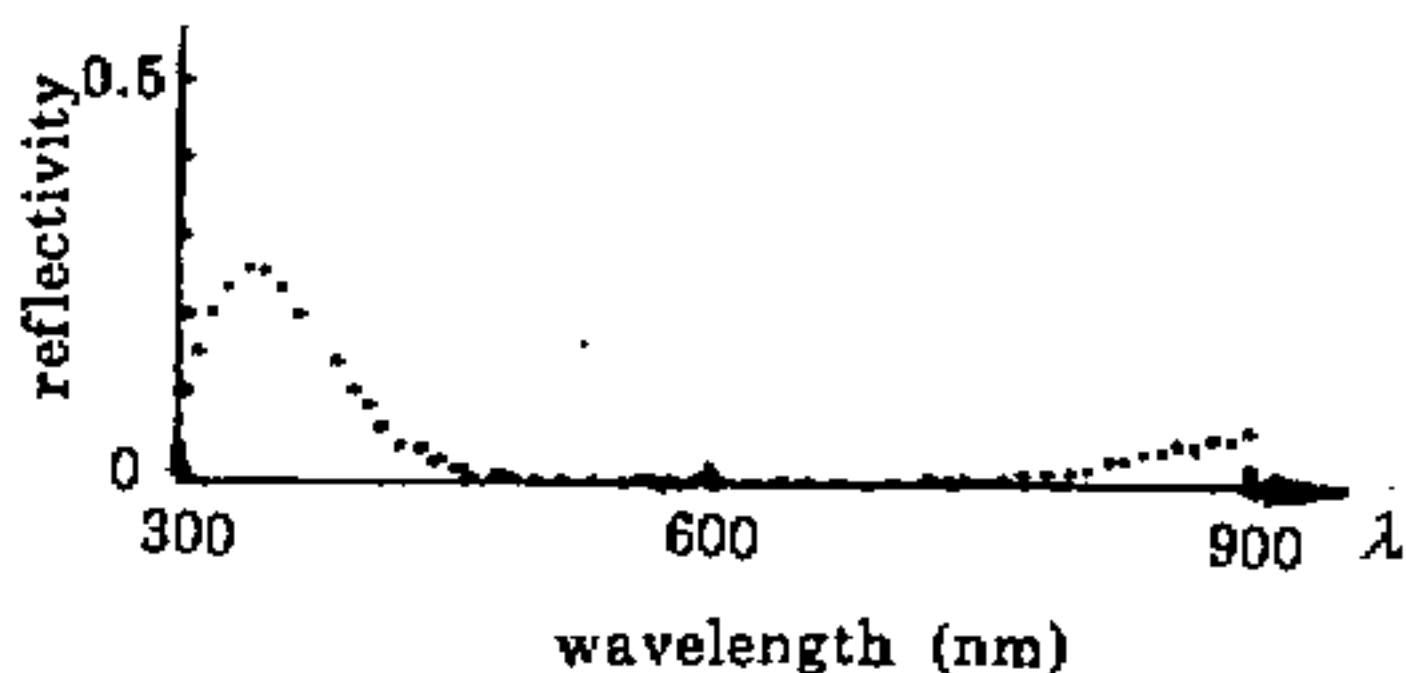


图 5(a) 增透膜,  $k=4$   $\theta_0=0.0^\circ$

Fig. 5(a) Antireflection film,  $k=4$   $\theta_0=0.0^\circ$

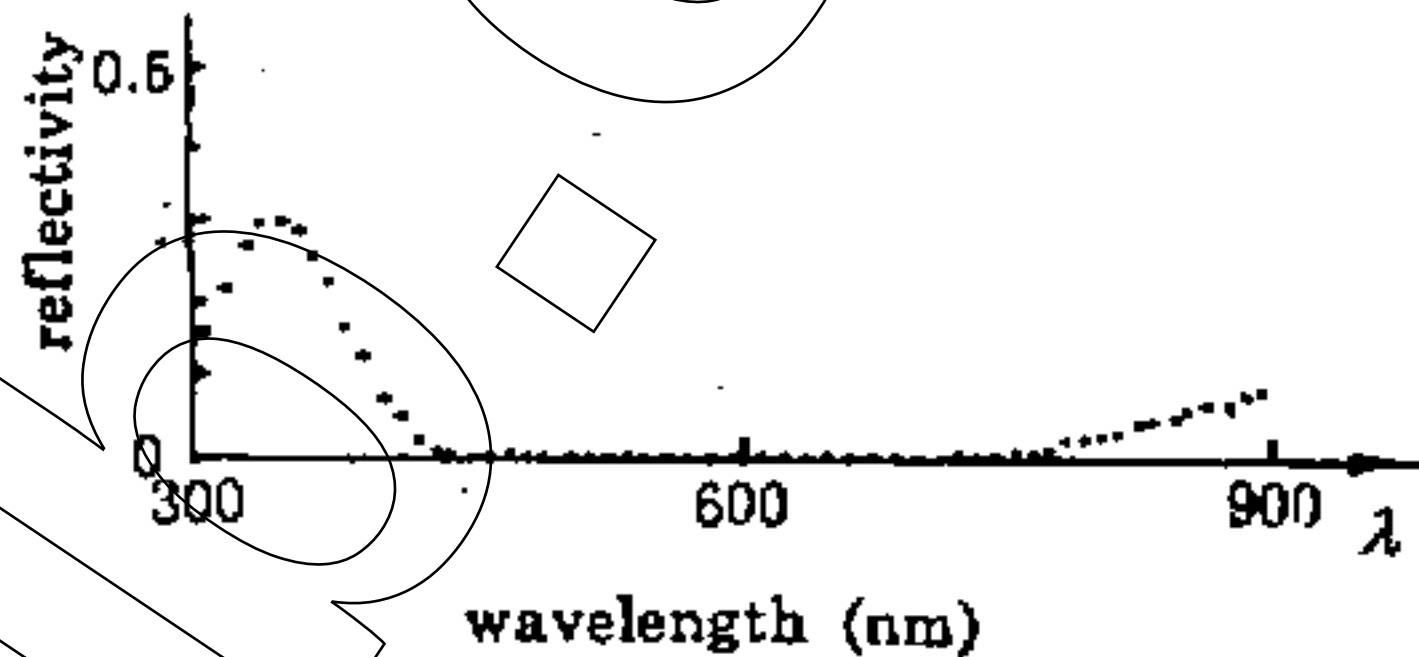


图 5(b) 增透膜,  $k=4$   $\theta_0=0.0^\circ$

Fig. 5(b) Antireflecting film,  $k=4$   $\theta_0=0.0^\circ$

表 5 增透膜的光学特性

| 膜系 | $k$ | $\theta_c$ (度) | $T_{\max}$ | $\lambda_m$ (nm) | $T>0.99$ 的 $\Delta\lambda$ (nm) | $T_0$   |
|----|-----|----------------|------------|------------------|---------------------------------|---------|
| 1  | 4   | 0.0            | 1.00000    | 630              | 440—730                         | 0.99950 |
|    |     | 15.0           | 0.99995    | 630              | 440—730                         | 0.99943 |
| 2  | 4   | 0.0            | 0.99912    | 450              | 430—760                         | 0.99711 |
|    |     | 15.0           | 0.99926    | 450              | 430—750                         | 0.99691 |

$T_0-\lambda_0$  对应的透过率

作者曾受益于杨葆塘教授,谨表衷心感谢。

### 参考文献

- 1 玻恩·M 等. 光学原理. 北京: 科学出版社. 1979; 58~101; 453~458
- 2 麦克劳德 H A. 光学薄膜技术. 北京: 国防工业出版社. 1974; 12~39; 51~92; 156~342; 257~305
- 3 唐晋发等. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社. 1989; 6~24; 29~34; 42~63; 72~119

# ANALYSIS OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILMS

Tian Leike

*Dept. of physics, Northwest University Xi'an 710069*

Received date: 1995-03-04

**Abstract** In this paper, optical properties have been investigated for high-reflectance films, antireflecting films and interference filters by CAD. The attentive question is pointed in designing and use.

**Keywords** Optical thin-film; Reflection; Transmission



**Tian Leike** was born in 1949, in Xi'an, China. He graduated from the physics department of University of Science and Technology of China. He is interested in the fields of lasers and technology, optical theory, light scattering and others. He has published about twelve papers and one book.