

文章编号: 0253-2239(2007)03-0563-4

# 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计

马小凤<sup>1</sup> 王 丹<sup>2</sup> 刘定权<sup>1</sup> 陈 刚<sup>1</sup> 张凤山<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所光学薄膜与材料研究室, 上海 200083)  
(<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜研发中心, 上海 201800)

**摘要:** 分析了倾斜入射条件下导致光学薄膜产生偏振的原因, 针对不同偏振态的等效导纳与等效相位进行了分析, 并计算了对称膜层在 45° 入射条件下不同偏振态的等效折射率与等效相位厚度, 采用等效层方法设计了光学性能良好的 600~900 nm 波段消偏振宽带减反膜。最后利用电子束蒸发技术制备了薄膜样品, 样品的光谱性能完全能够满足使用要求。其中在 600~900 nm 波段范围内, 平均反射率均小于 1.38%, 反射率的偏振度均低于 0.89%。另外, 通过对其理论及实验光学性能、角度敏感性、膜层厚度误差敏感性等方面的分析结果可知, 对称膜层组合法是设计消除倾斜入射下宽带减反膜偏振效应的一种行之有效的方法。

**关键词:** 光学薄膜; 消偏振; 等效层; 减反膜

中图分类号: O484 文献标识码: A

## Design of Non-Polarizing Broadband Antireflection Coating Using Equivalent Layer

Ma Xiaofeng<sup>1</sup> Wang Dan<sup>2</sup> Liu Dingquan<sup>1</sup> Chen Gang<sup>1</sup> Zhang Fengshan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** The reasons leading to polarization for optical coatings at oblique incidence were analyzed. Analysis was made for the equivalent admittance and phase of different polarization states, and the equivalent indices and phase thickness for both polarizations of a symmetrical structure at 45° incidence were computed. Then a non-polarizing broadband antireflection coating with good optical performance within 600~900 nm was designed by using equivalent layer method. A sample was fabricated through electron beam evaporation technique, and its optical performance absolutely satisfied the requirements. From 600 to 900 nm, the average reflectance was less than 1.38%, and the polarization of reflectance was lower than 0.89%. In addition, after analyzing its theoretical and experimental performance, angle sensitivity and layer-thickness error sensitivity, we drew a conclusion that symmetrical layer combination was a practical way to design a non-polarizing broadband antireflection coating at oblique incidence.

**Key words:** thin film optics; non-polarizing; equivalent layer; antireflection coating

## 1 引 言

对于各向同性光学薄膜, 光线倾斜入射时薄膜内 s 光与 p 光具有不同的等效导纳, 因此两种偏振态光波具有不同的透射和反射特性。一方面可以利用这种偏振效应设计制作相位延迟器和偏振器; 另一方面, 在许多应用中要求消除倾斜入射下薄膜在

宽光谱范围内两种偏振态的分离, 例如在海洋卫星所负荷的水色扫描仪系统光路中就要求消除不同偏振态之间的分离, 以便取得准确的目标辐射数据。为此, 该系统的设计除了合理摆放各个镜片的角度外, 更需要对镜片所要镀制的光学薄膜样品进行消偏振设计。薄膜分色滤光片是该系统光路中的重要

作者简介: 马小凤(1978-), 女, 河南嵩县人, 博士研究生, 主要从事航天海洋遥感用光学薄膜的分色技术与工艺研究。  
E-mail: mx407@sohu.com

导师简介: 张凤山(1941-), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事薄膜光学与技术方面的研究。  
E-mail: fszhang2002@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-07-02; 收到修改稿日期: 2006-10-08

光学元件之一。为避免分色片基底背面对透射光的反射从而使得其透射带的透射率降低,有必要在分色片基底的背面镀制消偏振宽带减反膜。该分色片的工作角度为  $45^\circ$ ,在透射波段  $600\sim 900\text{ nm}$  范围内要求透射率高于  $95\%$ ,且透射光的偏振度小于  $3\%$ 。为了保证分色片的高透射及低偏振度特性,要尽可能地降低减反膜的反射率与偏振度。针对倾斜入射下薄膜的消偏振问题,国内外许多文献已进行了深入详细的报道<sup>[1~8]</sup>,但是对于宽光谱减反膜的消偏振问题则研究甚少。本文采用等效层的方法设计了航天海洋遥感用消偏振宽带减反膜。

## 2 理论分析

倾斜入射条件下薄膜的光学性能计算。假设薄膜由  $m$  层组成,且入射光以  $\theta_0$  角度入射,则第  $j$  层膜的特征矩阵  $\mathbf{M}_j$  为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & iN_j^{-1} \sin \delta_j \\ iN_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $N_j$  为膜层的等效折射率, $\delta_j$  为膜层相位厚度。

$$\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda, \quad (2)$$

$$N_j^s = n_j \cos \theta_j, \quad (\text{s 光}) \quad (3)$$

$$N_j^p = n_j / \cos \theta_j, \quad (\text{p 光}) \quad (4)$$

这里  $n_j$  为第  $j$  层的折射率, $d_j$  为第  $j$  层的物理厚度, $\theta_j$  为第  $j$  层的折射角。由菲涅耳折射定律得

$$n_0 \sin \theta_0 = n_j \sin \theta_j, \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

膜系的特征矩阵  $\mathbf{M}$  为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_j \cdots \mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

记膜系与基底的组合矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} 1 \\ N_s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则膜系组合导纳  $Y$  为  $Y = C/B$ 。

记  $A = Y/N_0$ ,则该薄膜的振幅反射系数  $r = (1 - A)/(1 + A)$ ,薄膜的反射率为  $R = |r|^2$ 。

另外,任一具有对称结构的膜层组合的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同性质,在数学上可等效为一单层膜<sup>[9]</sup>。如最简单的三层全介质膜层组合(mnm),其等效折射率与等效相位厚度公式如下:

$$E_{\text{mnm}} = \sqrt{\frac{\eta_m^2 \left[ \sin 2\delta_m \cos \delta_n + \left( \frac{\eta_m}{\eta_n} + \frac{\eta_n}{\eta_m} \right) \cos 2\delta_m \sin \delta_n - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_m}{\eta_n} - \frac{\eta_n}{\eta_m} \right) \sin \delta_n \right]}{\left[ \sin 2\delta_m \cos \delta_n + \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_m}{\eta_n} + \frac{\eta_n}{\eta_m} \right) \cos 2\delta_m \sin \delta_n + \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_m}{\eta_n} - \frac{\eta_n}{\eta_m} \right) \sin \delta_n \right]}}, \quad (8)$$

$$\Gamma_{\text{mnm}} = \arccos M_{11} = \arccos \left[ \cos 2\delta_m \cos \delta_n - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_n}{\eta_m} + \frac{\eta_m}{\eta_n} \right) \sin 2\delta_m \sin \delta_n \right]. \quad (9)$$

由(1)式可以看出, $E_{\text{mnm}}$ 与入射角  $\theta_0$  有关,只有当满足某特定条件时才有  $E_{\text{mnm}}^p = E_{\text{mnm}}^s$ ,而在一般情况下  $E_{\text{mnm}}^p \neq E_{\text{mnm}}^s$ ;同理  $\Gamma_{\text{mnm}}^p \neq \Gamma_{\text{mnm}}^s$ 。

## 3 膜系设计

根据以上等效层理论,分别计算了参考波长为  $550\text{ nm}$  的对称膜层组合  $t_1 L t_2 H t_3 L t_2 H t_1 L$  在  $45^\circ$  入射条件下 p 偏振态和 s 偏振态的等效折射率值与等效相位厚度,其色散曲线分别如图 1 所示。其中  $n_H = 2.15, n_L = 1.38$ ; H、L 分别表示光学厚度为四分之一参考波长的高低折射率膜层; $t_1, t_2, t_3$  分别表示膜层厚度系数,该膜层组合的物理厚度分布如图 2(a)所示。由图 1 可以看出,该膜层组合的等效折射率  $E_p$  与  $E_s$  在  $600\sim 1200\text{ nm}$  波段范围内均稳定在 2 以下,且二者分离较小;同理, $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  在所需波段内变化趋势一致且二者分离较小。正是利用

它的这些特性来实现宽波段范围内的消偏振。

基于上述膜层组合,选定膜系初始结构 1 为

$$G/t_1 L t_2 H t_3 L t_2 H t_1 L / \text{Air},$$

其中参考波长为  $550\text{ nm}$ ,入射角为  $45^\circ$ ,G 代表 BK7 玻璃基底。仅对初始膜系的膜层厚度进行简单优化即得膜系结构 2

$$G/t'_1 L t'_2 H t'_3 L t'_2 H t'_1 L / \text{Air},$$

其膜层物理厚度分布如图 2(b)所示。膜系 2 的光谱曲线如图 3 所示。

该膜系具有良好的光学性能,即在所需波段范围内有足够小的反射率与足够低的偏振度。其中在  $600\sim 900\text{ nm}$  波段范围内,平均反射率为  $0.52\%$ ,平均反射率最大值为  $1.22\%$ ,反射率的平均偏振度为  $0.09\%$ ,反射率的最大偏振度为  $0.21\%$ 。完全能够满足航天海洋遥感用消偏振宽带减反膜的光学性能要求。

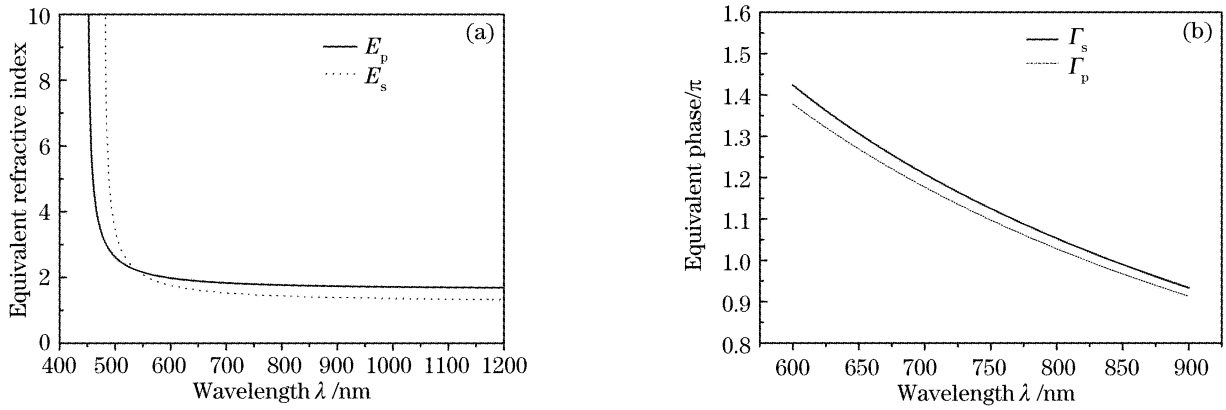


图 1 光线以 45°入射时膜层组合  $t_1L_2Ht_3L_2Ht_1L$  的等效折射率(a),等效相位厚度(b)随波长的变化曲线  
 Fig. 1 Dispersion of  $E_p$  and  $E_s$ (a),  $\Gamma_p$  and  $\Gamma_s$ (b) of the structure  $t_1L_2Ht_3L_2Ht_1L$  at 45° incidence

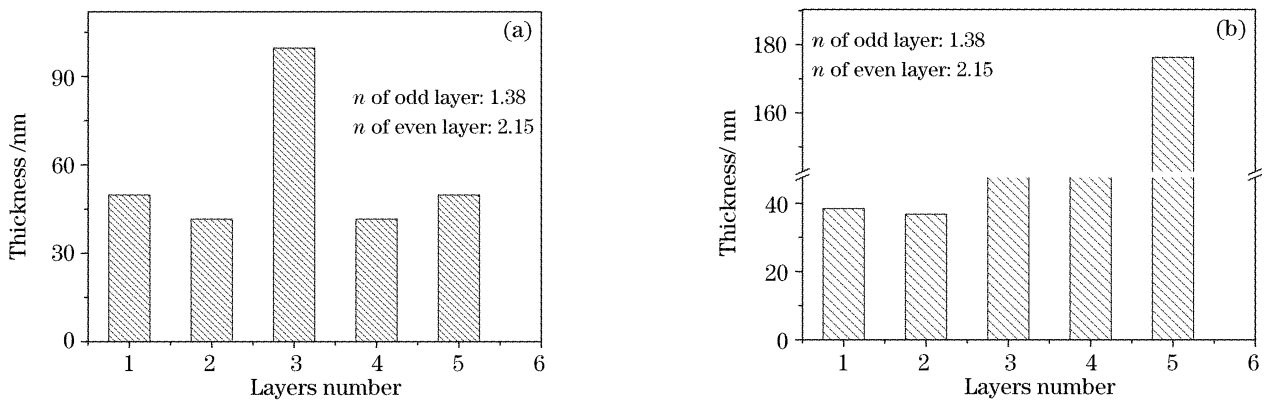


图 2 膜层组合  $t_1L_2Ht_3L_2Ht_1L$ (a),  $K9/t_1L'_2Ht'_3L'_2Ht'_1L/air$  (b)的膜层物理厚度分布图  
 Fig. 2 Layer thickness distribution for the structure  $t_1L_2Ht_3L_2Ht_1L$  (a),  $K9/t_1L'_2Ht'_3L'_2Ht'_1L/air$  (b)

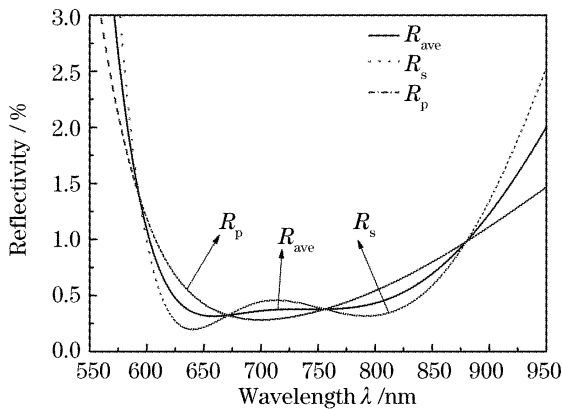


图 3 入射角为 45°时膜系 2 的反射率光谱曲线  
 Fig. 3 Reflectance of stack 2 at 45° incidence

### 4 样品制备与光谱测试

高低折射率膜料分别选用  $TiO_2$  和  $MgF_2$ , 基底为 BK7 玻璃。样品采用电子束蒸发技术及晶体振荡监控手段并借助于离子辅助技术沉积薄膜。衬底温度为 150 °C, 本底真空为  $3 \times 10^{-3}$  Pa,  $TiO_2$  和  $MgF_2$  的蒸发真空分别为  $3 \times 10^{-2}$  Pa 和  $4 \times 10^{-3}$  Pa,  $TiO_2$  和  $MgF_2$  的沉积速率分别为 0.3 nm/s 和 0.6 nm/s, 离子源采用 H-1 型霍尔离子源, 其工作气体是 Ar

和  $O_2$ 。

用 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda 900 分光光度计测量了样品的剩余反射谱, 仪器的波长分辨力为 1 nm。图 4 是光线在 45°入射下样品的反射率光谱曲线。其中在 600~900 nm 波段范围内, 平均反射率为 1.07%, 平均反射率最大值为 1.38%, 反射率的平均偏振度为 0.41%, 反射率的最大偏振度为 0.89%。虽然反射率与偏振度均较其理论值有了一点提高, 但仍然能够满足我们的使用要求。

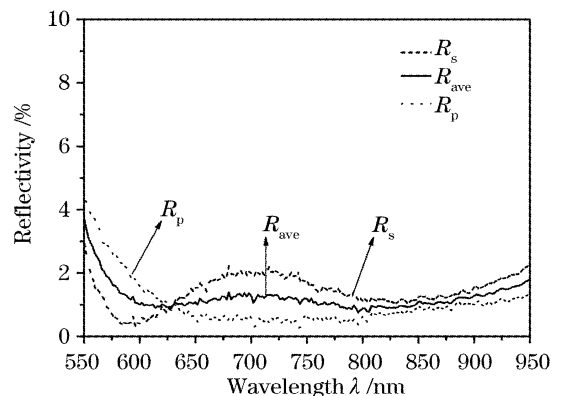


图 4 入射角为 45°时样品的反射率测量光谱曲线  
 Fig. 4 Experimental reflectance of the sample at 45° incidence

## 5 讨 论

由于消偏振薄膜的光学性能对入射光线的角度以及膜层厚度误差比较敏感,所以有必要对其膜系的角度敏感性以及层厚误差敏感性进行分析。为研究膜系 2 对入射角的敏感性问题,现将入射角  $\theta_0$  改变为  $40^\circ$  或  $48^\circ$ 。当膜系 2 的  $\theta_0$  改变时,经膜系设计与分析软件<sup>[10]</sup>模拟计算后得其光学性能分别如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,当  $\theta_0$  为  $40^\circ$  时减反射带向长波方向发生了微小偏移,但其减反射带的平均反射率与平均偏振度均有了明显的降低,在  $600\sim 900$  nm 波段范围内平均反射率由原来的  $0.52\%$  降低为  $0.36\%$ ,反射率的平均偏振度由原来的  $0.09\%$  降低为  $0.06\%$ ;

当  $\theta_0$  为  $48^\circ$  时减反射带的反射率与偏振度有略微提高。此时在  $600\sim 900$  nm 波段范围内平均反射率为  $0.72\%$ ,反射率最大值为  $1.64\%$ ,反射率的平均偏振度为  $0.11\%$ ,反射率的最大偏振度为  $0.33\%$ 。尽管如此,仍然能够满足航天海洋遥感用消偏振宽带减反膜的光学性能要求。而当入射角  $\theta_0$  在  $40^\circ\sim 48^\circ$  范围内变化时,其光谱性能均更加理想且如图 5(c) 所示,所以膜系 2 的角度敏感性良好。另外,经膜系设计与分析软件对层厚误差模拟分析结果得出,当膜层厚度误差以正态规律变化时膜系 2 的膜层厚度容差为  $2\%$ 。而这一误差值在工艺控制范围之内,所以该膜系的膜厚容差良好。

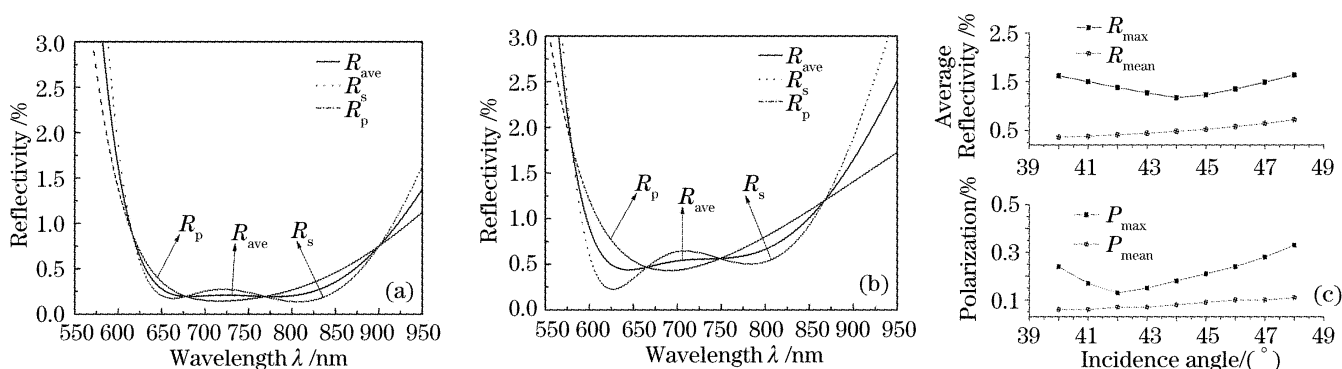


图 5 入射角为  $40^\circ$  (a),  $48^\circ$  (b), 入射角  $\theta_0$  在  $40^\circ\sim 48^\circ$  内(c)变化时膜系 2 的平均反射率及偏振度变化曲线

Fig. 5 Reflectance of stack 2 at  $40^\circ$  (a),  $48^\circ$  (b), average reflectance and polarization at varying incident angle  $40^\circ\sim 48^\circ$  (c)

## 6 结 论

本文采用对称膜层组合方法,设计了入射角为  $45^\circ$ 、波段为  $600\sim 900$  nm 的宽带消偏振减反膜。通过对其理论及实验光学性能、角度敏感性、膜层厚度误差敏感性等方面的分析结果可知,对称膜层组合法是设计消除倾斜入射下宽带减反膜偏振效应的一种行之有效的方法。

### 参 考 文 献

- 1 John S. Seeley. Simple nonpolarizing high-pass filter [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(6): 742~744
- 2 Jerzy Ciosek, J. A. Dobrowolski, Glenn A. Clarke *et al.*. Design and manufacture of all-dielectric nonpolarizing beam splitters [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7): 1244~1250
- 3 Hongji Qi, Ruijin Hong, Jiando Shao *et al.*. Nonpolarizing and polarizing filter design [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2343~2348
- 4 Weibin Chen, Peifu Gu. Design of non-polarizing color splitting filters used for projection display system [J]. *Display*, 2005, **26**: 65~70
- 5 Gu Peifu, Chen Weibin, Liu Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 274~278 (in Chinese)

顾培夫,陈卫斌,刘旭. 薄膜截止滤光片的设计 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 274~278

- 6 Xu Xiaofeng, Zhang Fengshan, Fan Bin. The study of antireflection coatings of  $600\sim 700$  nm at wide angle incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1173~1176 (in Chinese)
- 7 徐晓峰,张凤山,范宾. 宽角度入射  $600\sim 700$  nm 波段减反射薄膜的研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1173~1176
- 7 Chen Weibin, Gu Peifu. Design of nonpolarizing thin film edge filters used for color-separation and color-recombination in projection display system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 869~872 (in Chinese)
- 8 陈卫斌,顾培夫. 用于投影显示的分色合色膜系的消偏振设计 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 869~872
- 8 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yuebin *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing thin film filters used in tilted incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380 (in Chinese)
- 9 顾培夫,李海峰,章岳光等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 377~380
- 9 Tang Jinfa, Zheng Quan. *Applied Thin Film Optics* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984. 90~100 (in Chinese)
- 10 唐晋发,郑权. *应用薄膜光学* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 90~100
- 10 TFCalc; thin film design software for windows, V3. 5. <http://www.ssepectra.com>