

文章编号: 0253-2239(2004)09-1173-4

# 宽角度入射 600~700 nm 波段减反射薄膜的研究\*

徐晓峰<sup>1</sup> 张凤山<sup>1</sup> 范 滨<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)  
(<sup>2</sup> 日本光驰有限公司, 日本 350-0801)

**摘要:** 阐述了利用非均匀膜系理论设计宽角度多层减反射薄膜的方法, 从理论上分析了在宽角度的情况下, 偏振光产生透过率不同的原因, 选取了 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 两种材料作为折射率材料, 选取 BK7 作为基底材料模拟设计了光谱区在 600~700 nm 波段、入射角为 0°~80° 之间的宽角度多层减反射薄膜, 探索出了一条新型膜系设计的途径, 其优化结果是较为理想的。这一研究方法如能在太阳能、光纤通信、航天、激光等领域应用, 将大大地提高光能的利用率, 具有重要的应用价值。

**关键词:** 薄膜光学; 非均匀膜系; 多层减反射薄膜; 偏振光

中图分类号: O484.1 文献标识码: A

## The Study of Antireflection Coatings of 600~700 nm at Wide Angle Incidence

Xu Xiaofeng<sup>1</sup> Zhang Fengshan<sup>1</sup> Fan Bin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)  
(<sup>2</sup> Oporun Co., Ltd., Takeno 350-0801 Japan)

(Received 15 July 2003; revised 13 October 2003)

**Abstract:** A method of designing antireflection multilayer using the theory of inhomogeneous coatings was presented. The cause of difference of transmittance is analysed by polarized light and in the case of incidence at wide angle. Antireflection multilayer of 500~600 nm at incidence angle from 0° to 80° have been designed using Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and SiO<sub>2</sub> as materials of refractive index of smultilayer, using BK7 as material of substrate. A new way of film design has been explored. It shows the result of optimization is perfect. This method can increase the ratio of utilization of optical energy, and it can find the applications in the fields of solar energy, optical fiber communication, aerospace industry, laser and so on.

**Key words:** film optics; inhomogeneous coatings; antireflection multilayer; polarized light

## 1 引 言

近年来,随着光谱干涉技术、激光技术、空间光学技术、太阳能技术以及光通信技术的迅速发展,光学薄膜作为现代光学仪器和各种光学器件的重要组成部分,其应用范围日益广泛。减反射薄膜是光学薄膜设计中应用最多的膜系之一,由于新材料的出现,以及工艺水平与设计水平的提升,人们对减反射

薄膜的性能指标要求越来越高,不仅对光谱透过率、反射率的要求更为严格,而且对光学薄膜的吸收、相位以及偏振的变化也提出了新的要求。这给薄膜设计和制作增加了很大难度,需要探索新的途径和新的方法。为此,我们选择了非均匀膜系结构对宽角度减反射薄膜进行研究。

对于非均匀膜系,从理论上假定有两种情况:1) 靠近膜层表面处存在着很薄的过渡区,在过渡区内折射率是急剧变化的;2) 沿着膜层表面的法线方向折射率呈现梯度变化,但在垂直于法线的水平方向折射率保持不变<sup>[1,2]</sup>。我们主要研究的是第二种情况。从

\* 与日本光驰公司合作项目。

E-mail: xxf61@163.com

收稿日期:2003-07-15; 收到修改稿日期:2003-10-13

理论上讲,折射率连续变化的非均匀膜系是比较完善的膜系结构,由于折射率渐变的膜系结构可以从根本上解决膜系的应力、牢固度、倾斜所引起的中心漂移及偏振效应等问题,且非均匀膜系在结构设计、工艺制备等方面与以往使用的常规膜系有根本的不同,从而使薄膜领域中许多棘手的问题迎刃而解。

虽然非均匀膜系结构的概念早就提出来了<sup>[3]</sup>,但由于自然界可用于光学薄膜制备的材料局限以及工艺的问题,从而使其制备非常困难,发展很缓慢。近些年,随着光学薄膜制备工艺的不断改进与更新,非均匀膜系的研究也得到了深入的发展。

本文利用折射率随膜层物理厚度作连续变化的非均匀膜系的理论,在光谱区 600~700 nm 波段内对宽角度减反射薄膜进行了优化设计,并达到了较为理想的效果。

## 2 理论分析

消除薄膜系统的偏振效应是一个棘手的问题,目前人们掌握的消偏振设计手段还不是很多。之所以会产生偏振效应,是因为在倾斜入射的情况下,薄膜对 s 偏振光和 p 偏振光表现出来的有效折射率不同<sup>[4~6]</sup>,对单层膜:

$$\eta_p = \frac{n}{\cos \theta}, \quad \eta_s = n \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

已知偏振分离  $\Delta n$  为

$$\Delta n = \frac{\eta_p}{\eta_s} = \frac{n/\cos \theta}{n \cdot \cos \theta} = \frac{1}{\cos^2 \theta}, \quad (2)$$

容易看出  $\Delta n$  对单层膜而言它是一个恒大于 1 的量,其中  $\eta_p$  大于  $\eta_s$ 。然而对于薄膜组合,有可能使  $\Delta n = 1$ 。对于多层膜,在倾斜入射的情况下,每层薄膜 s 偏振光和 p 偏振光的导纳值是不同的,对于第  $j$  层膜,它们分别为

$$\eta_{pj} = \frac{n_j}{\cos \theta_j}, \quad \eta_{sj} = n_j \cdot \cos \theta_j, \quad (3)$$

其中  $n_j$  是第  $j$  层膜的折射率,  $\theta_j$  由斯涅尔定律得出

$$n_0 \sin \theta_0 = n_s \sin \theta_s = n_j \sin \theta_j, \quad (4)$$

这里  $n_0, n_s$  和  $\theta_0, \theta_s$  分别是入射介质,基片的折射率和入射角,折射角。

对于这两种偏振,膜层的有效光学厚度是相同的,且为  $n_j d_j \cos \theta_j$ 。因此第  $j$  层膜的特征矩阵是

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & (i/\eta_j) \sin \theta_j \\ i\eta_j \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix}, \quad (5)$$

这里第  $j$  层的相位厚度  $\delta_j$  是:

$$\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda, \quad (6)$$

而  $\eta_j$  对于 p 偏振和 s 偏振分别为  $\eta_{pj}$  和  $\eta_{sj}$ 。因此两种偏振的特征矩阵的差异仅仅在于导纳  $\eta$  的不同。整个  $m$  层膜的特征矩阵  $\mathbf{A}_p$  和  $\mathbf{A}_s$  分别是  $m$  个特征矩阵  $\mathbf{M}_{pj}$  和  $\mathbf{M}_{sj}$  的连乘积;

$$\mathbf{A}_p = \prod_{j=1}^m \mathbf{M}_{pj}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_s = \prod_{j=1}^m \mathbf{M}_{sj}, \quad (8)$$

多层膜和基片组成的导纳  $Y = C/B$ 。而  $B, C$  由下式确定:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

这里  $\eta_s$  是基片的导纳。

振幅反射系数:

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} = \frac{1 - Y/\eta_0}{1 + Y/\eta_0}, \quad (10)$$

能量反射率:

$$R = rr^* = \left| \frac{1 - Y/\eta_0}{1 + Y/\eta_0} \right|^2, \quad (11)$$

通常在大部分光谱区域, p 偏振和 s 偏振的反射率  $R_p$  和  $R_s$  是不同的,而在大角度的情况下,  $R_p$  和  $R_s$  的差值将更大。必须尽量减少这种偏差才能使 s 和 p 光在某一波段同时达到高增透的效果。

如何减少偏振而使 s 和 p 光在某一波段同时达到高增透的效果呢? 应该说,方法并不是唯一的<sup>[7]</sup>。本文采用非均匀膜系的思想。理想的非均匀膜系应当是膜层折射率随几何厚度作连续变化,要制备一个真正含义上的非均匀膜系滤光片是十分困难的,这就要求采取特殊的方法<sup>[8~10]</sup>,即将非均匀膜层用  $N$  层均匀膜层来等效。当  $N \rightarrow \infty$  时,多层均匀膜系也就成了非均匀膜系。只要  $N$  大于某一个不太大的数值  $N_0$  便可以获得理想的光谱响应。从而使非均匀膜系向均匀膜系转换,而每层折射率采取等效的方法获取<sup>[11~13]</sup>,这时的膜系结构已经完全失去了非均匀膜系的原有含义,成了不规则的高、低折射率膜堆,只是在作用上与非均匀膜系滤光片等效。而宽角度减反射薄膜设计就是要根据工艺条件,考虑各种工艺参量、材料的性能以及实现的可能性,利用计算机进行相关的膜系设计<sup>[14~16]</sup>,采用已知的折射率等效任意折射率,实现膜层几何厚度、折射率、以及膜层层数的合理匹配,使非均匀膜系转换为均匀膜系,对设计的膜系进行合理优化<sup>[17~20]</sup>,以达到理想的膜系设计。

### 3 膜系优化与结果

我们选取了  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  两种材料作为等效折射率材料,选取 BK7 作为基底材料,入射角从  $0^\circ\sim 80^\circ$ ,膜系为 48 层,选取 600~700 nm 作为设计和优化波段,在这个波段优化目标是 s 和 p 光的透过率对于  $0^\circ\sim 80^\circ$  入射角都要大于或等于 95%,采

取随机与共轭梯度相结合的方法进行优化,其透过率随波长变化的部分曲线如下:

从图 1(a)到图 1(h),结果显示: $0^\circ\sim 80^\circ$  入射角,600~700 nm 优化波段,s 光和 p 光透过率都超过了 95%。达到了较理想的结果。

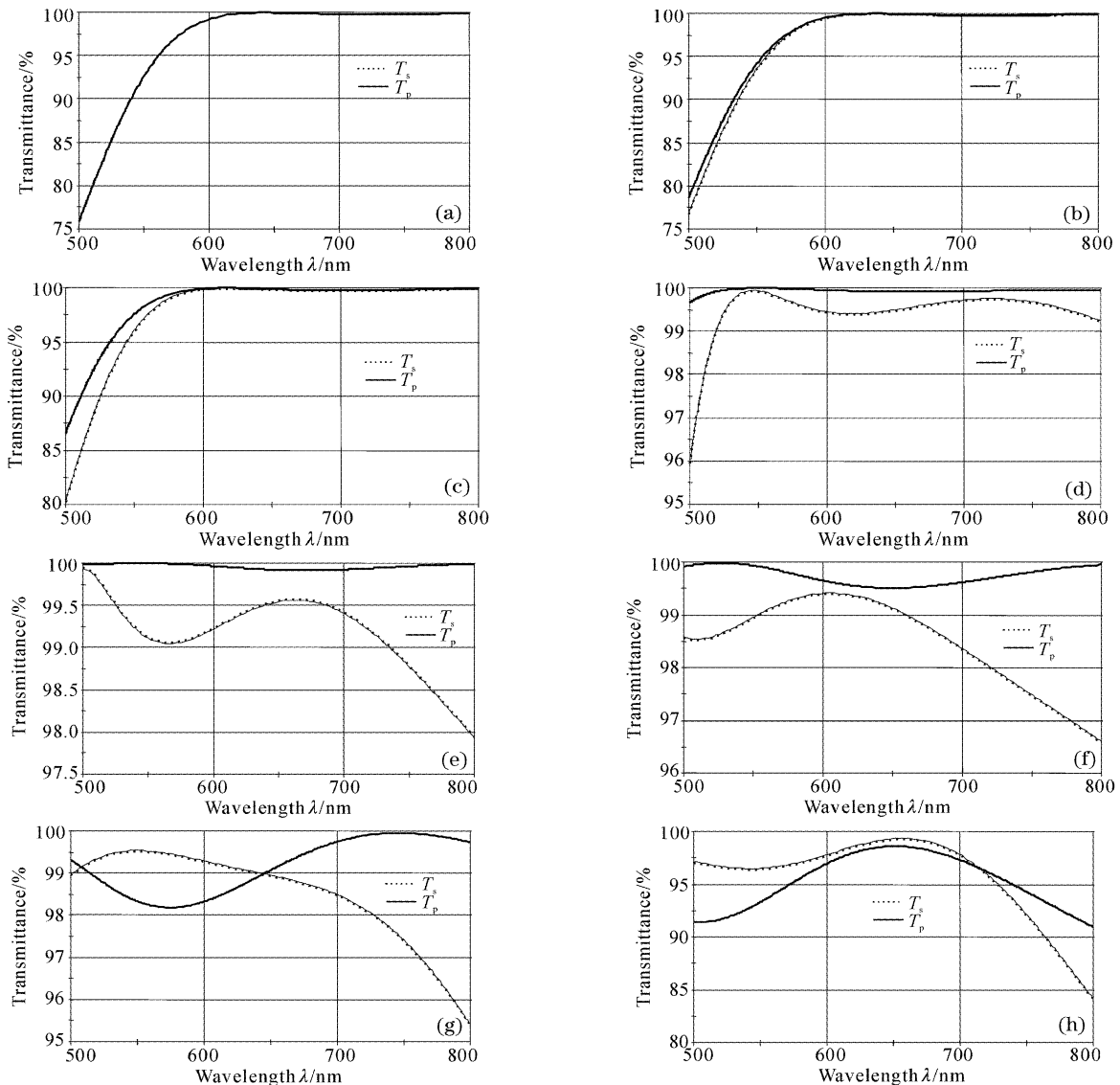


Fig. 1 Transmittance curve of optimization design with incident angle of (a)  $0^\circ$ , (b)  $10^\circ$ , (c)  $20^\circ$ , (d)  $40^\circ$ , (e)  $50^\circ$ , (f)  $60^\circ$ , (g)  $70^\circ$ , (h)  $80^\circ$

**结论** 本文利用非均匀膜系理论在光谱区 600~700 nm 波段内,入射角从  $0^\circ\sim 80^\circ$  设计了宽角度减反射薄膜,探索出了一条新型膜系设计的途径,其优化结果是较为理想的。这一研究方法如能在太阳能、光通信、航天、激光等领域应用,将大大地提高光能的利用率,具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Austi R, Miohaod R, Guenther A *et al.*. Influence of structural effects on laser damage thresholds of discrete and inhomogeneous thin film and multilayers. *NBS Special Publication*, 1972, **372**(2):135~138
- 2 Dobrowolski J A, Love D G. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(4):30~39

- 3 Sossi L, Eesti. The design of thin film. *NSVTead. Akad. Toim. Fuus. Mat.*, 1974, **3**(1):229~302
- 4 Craig R. Method for analysis of the characteristic matrix in optical systems. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(3): 1092~1096
- 5 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. *Optical Thin-Film Principles* (光学薄膜原理). Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 271~272 (in Chinese)
- 6 Tang Jinfa, Gu Peifu. *Thin-Film Optics and Technology* (薄膜光学与技术). Beijing: Machinery Industry Press, 1989. 18~24 (in Chinese)
- 7 Li Li, Dobrowolski J A, Sullivan *et al.*. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3634**: 52~62
- 8 Southwell W H. Coating design using very thin high and low index layers. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2):457~460
- 9 Li Zhongqi. Hight efficiency and wide-range antireflection coating in the infrared region. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1983, **3**(3): 253~258 (in Chinese)
- 10 Wu Qihong. Complex equivalent index of symmetrical periods. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1986, **6**(10): 943~947 (in Chinese)
- 11 Baumeister P. Simulation of a rugate filter via a stepped index dielectric multilayer. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(4): 2644~2649
- 12 Southwell W H. Rugate index profile which suppresses all harmonic stopbands. *Optical Interference Coatings*, 1988, **6**(3):142~147
- 13 Esptein L. The design of optical filters. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1970, **42**(4):806~810
- 14 Seeley J S. Synthesis of interference filters. *Proc. Phys. Soc.*, 1973, **78**(2): 998~1008
- 15 Dobrowolski J A, Lowe D. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(5): 3039~3043
- 16 Tang Jinfa, Zheng Quan. Automatic design of optical thin film systems-merit function and numerical optimization technique. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1982, **72**(3):1522~1528
- 17 Baumeister P. Starting designs for the computer optimization of optical coatings. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22):4835~4843
- 18 Willey R. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28):544~548
- 19 Tikhonravov A V, Trubetskoy M K, DeBell G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings. *Appl. Opt.*, **35**(28): 5493~5500
- 20 Fan Zhengxiu, Qian Weizhen. Automatic coating of optical thin films. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1981, **1**(3): 273~280 (in Chinese)