

# 利用非规整膜系实现宽角度入射 减偏振、减反射薄膜的研究

徐晓峰<sup>1</sup>, 邢怀中<sup>1</sup>, 杜西亮<sup>2</sup>, 范滨<sup>3</sup>

(1 东华大学 应用物理系, 上海 201620)

(2 黑龙江大学 电子工程学院, 哈尔滨 150080)

(3 日本光驰有限公司, 日本 350-0801)

**摘 要:**利用非均匀膜系理论对宽角度入射减偏振、减反射薄膜进行优化设计,分析了在宽角度入射的情况下,偏振光产生透过率不同的原因,选取了  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  三种不同折射率材料,采用  $\text{BK}_7$  作为基底,模拟设计了光谱区在 500~560 nm 波段、入射角为 0~70° 之间的多层减偏振、减反射薄膜,设计结果表明,薄膜的透过率得到大幅度提高.

**关键词:**光学薄膜;非均匀膜系理论;减反射薄膜;减偏振;透过率

**中图分类号:** O484.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)09-1691-3

## 0 引言

光学薄膜技术是一项专业性很强的现代技术.近年来,经过广大光学薄膜工作者的不懈努力,光学薄膜技术得到了长足的发展,伴随着空间光学技术、光通信技术、太阳能技术、激光技术等领域的迅猛发展,它已经从传统光学的辅助技术发展成为今天的新兴光电行业和信息产业的核心技术.

宽带减反射薄膜是光学薄膜设计中应用最多的膜系之一.由于宽带减反射膜克服了单层减反射膜透过率低、色彩还原性能差的缺陷,能够适用于紫外波段、可见光波段、可见近红外波段等.因此,它被广泛应用在微电子工业、阴极射线管、大屏幕显示器件、高功率激光、太阳能集热器表面作为防眩光的减反射涂层,数码相机,摄像手机等许多领域.

随着镀膜工艺的不断改进及计算机辅助设计技术发展的需要,现代科技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、位相以及偏振的变化也提出了更高的要求.为此,加大光线的入射角度并达到减偏振和减反射的效果,始终是新型薄膜设计和制作的一大难题,对于入射角度超过 60° 的薄膜设计方法,目前国内外的许多学者还在探索之中.

本文利用非均匀膜系结构对 0~70° 入射角的减反射薄膜进行膜系设计,选择  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  三种不同材料,在光谱区 500~560 nm 波段内进行设计和优化,使薄膜透过率达到了 95% 以上的良好效果.

## 1 理论分析

非均匀膜系具有折射率随膜层物理厚度作连续

变化的优点.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的,非均匀膜系结构的光谱响应  $f(k)$  与其折射率变化曲线  $n(x)$  可以用下面的方程近似联系起来<sup>[1-3]</sup>

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dn(x)}{dx} * \frac{1}{2n} \exp(ikx) * dx = Q(x) * \exp[i\phi(k)] = f(k) \quad (1)$$

$$x = 2 \int_0^{\infty} n(u) du$$

$$Q(k) = \{1/2[1/T(k) - T(k)]\}^{1/2}$$

对方程(1)作傅里叶变换,然后对  $x$  积分,则有

$$n(x) = \exp \left\{ \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin[\phi(k) - kx] dk \right\} \quad (2)$$

要真正实现折射率连续变化是十分困难的,采取以下方法<sup>[4-5]</sup>,将非均匀膜层用  $N$  层均匀膜层来等效.

每一层的光学厚度为  $\Delta\epsilon$ ,当  $N \rightarrow \infty$  时,  $\Delta\epsilon \rightarrow 0$ ,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.采取等效的方法获取了每层折射率以后,此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,使其在作用上与非均匀膜系滤光片等效<sup>[6-12]</sup>.

长期以来,在薄膜制备过程中,消除薄膜系统的偏振效应始终是一个棘手的问题.随着入射角度的增大,特别是入射角度超过 60° 的情况下,偏振效应会更加严重,以至于 S 偏振光和 P 偏振光不能同时达到高增透的效果.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,对第  $j$  层膜而言<sup>[13-14]</sup>

$$\begin{aligned} \eta_{Pj} &= n_j / \cos \theta_j \\ \eta_{Sj} &= n_j \cos \theta_j \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

式中  $n_0, n_s$  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

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \theta_j \\ i \eta_j \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

这里  $\delta_j$  是第  $j$  层膜的位相厚度

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

而  $\eta_j$  对于 P 偏振光和 S 偏振光分别为  $\eta_{pj}$  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  $A_P$  和  $A_S$  分别是  $m$  个特征矩阵  $[M_{pj}]$  和  $[M_{sj}]$  的连乘积.

$$A_P = \prod_{j=1}^m [M_{pj}] \quad (7)$$

$$A_S = \prod_{j=1}^m [M_{sj}] \quad (8)$$

多层膜和基片组导的导纳  $Y = \frac{C}{B}$ . 而  $B, C$  由式(9)

确定

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

式中  $\eta_s$  是基片的导纳.

振幅反射系数

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

反射率为

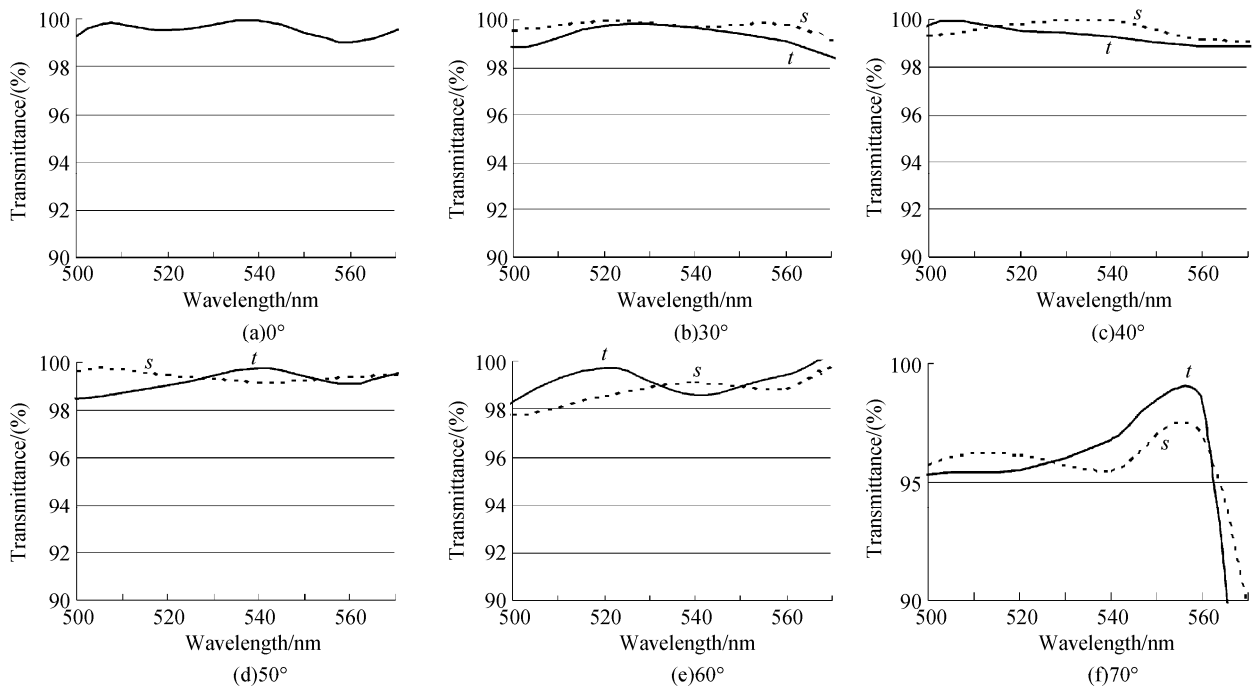


图 1  $0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  和  $70^\circ$  角优化透过率曲线

Fig. 1 Transmittance curves of optimization design with incident angles of  $0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  and  $70^\circ$

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

已知偏振分离  $\Delta n$  为

$$\Delta n = \frac{\eta_P}{\eta_S} = \frac{n/\cos \theta}{n \cos \theta} = \frac{1}{\cos^2 \theta} = \frac{1}{\left(1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n^2}\right)} \quad (12)$$

目前, 人们所掌握的消偏振的设计方法尽管还很有有限<sup>[15]</sup>, 但从式(12)中也可以看出,  $\Delta n$  对单层膜而言它是一个恒大于 1 的量, 其中  $\eta_P$  大于  $\eta_S$ , 对于薄膜组合来说, 有可能使  $\Delta n = 1$ . 这样, 就为消除偏振或减少偏振提供了理论依据.

## 2 设计方法

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, 只有减少这种偏差, 才能使 S 偏振光和 P 偏振光在某一波段同时达到高增透的效果.

本文采用多种材料的组合进行计算机模拟设计, 经过认真分析和反复探索, 最终选取了  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  三种折射率材料进行膜系设计. 使膜系在  $500 \sim 560 \text{ nm}$  的波段和入射角从  $0 \sim 70^\circ$  的范围内, S 偏振光和 P 偏振光透过率都达到 95% 以上, 得到了一个 25 层的较理想的膜系结构. 初始膜系经过 Herpin 方法等效计算为  $0.325342L0.560743H0.246482L0.127634M0.387653H$ , 其中 L, H, M 分别是薄膜材料  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在参考波长  $510 \text{ nm}$  处光学厚度的  $1/4$ . 透过率随角度和波长优化曲线如图 1 (s 是 S 偏振光的透过率, t 是 P 偏振光的透过率).

### 3 结论

本文利用非均匀膜系理论在光谱区500~560 nm波段内,设计了入射角从0~70°的减偏振减反射薄膜,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,使薄膜透过率达到了95%以上的良好效果.一般在大于60°的情况下,P偏振光与S偏振的透过率在500~560 nm波段时,最大相差10%左右,而经过减偏振设计后,P偏振光与S偏振光的透过率在此波段最大相差减少到1.4%.这一研究方法如能推广,对新型薄膜的研制将具有重要的理论指导意义和广泛的应用价值.

#### 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 [J]. *NBS Special Publication*, 1972, **372**(2): 135.
- [2] DOBROWOLSKI J A, LOVE D G. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**(4): 3039.
- [3] EESTI L S. The design of thin film[J]. *NSV Tead Akad Toim Fuus Mat*, 1974, **3**(1): 229.
- [4] SOUTHWELL W H. Coating design using very thin high and low index layers[J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(2): 457-460.
- [5] BAUMEISTRE P. Simulation of a rugate filter via a stepped index dielectric multilayer[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(4): 2644.
- [6] ESPTEIN L. The design of optical filters[J]. *J Opt Soc Am A*, 1970, **42**(4): 806-810.
- [7] SEELEY J S. Synthesis of interference filters[J]. *Proc Phys Soc*, 1973, **78**(2): 998-1008.
- [8] DOBROWOLSKI J A, LOWE D. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**(5): 3039-3043.
- [9] TANG Jin-fa, ZHENG Quan. Automatic design of optical thin film systems -merit function and numerical optimization technique[J]. *J Opt Soc Am A*, 1982, **72**(3): 1522-1528.
- [10] BAUMEISTER P. Starting designs for the computer optimization of optical coatings[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(22): 4835-4843.
- [11] WILLEY R. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(28): 544-548.
- [12] TIKHONRAVOY A V, TRUBETSKOY M K, DEBELL G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. *Appl Opt*, **35**(28): 5493-5500.
- [13] LIN Yong-chang, LU Wei-qiang. Principles of optical films [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 271-272.  
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 271-272.
- [14] TANG Jin-fa, GU Pei-fu. Thin-film optics and techniques [M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 18-24.  
唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 18-24.
- [15] DOBROWOLSKI L L, SULLIVAN J A. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displays[C]. *SPIE*, 1999, **3634**: 52-62.

## Study of Anti-polarization and Antireflection Coatings of Broad Angle Ranges by Inhomogeneous Coatings

XU Xiao-feng<sup>1</sup>, XING Huai-zhong<sup>1</sup>, DU Xi-liang<sup>2</sup>, FAN Bin<sup>3</sup>

(1 Department of Applied Physics, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2 Institute of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(3 Optron Co., Ltd., Takeno 350-0801, Japan)

Received date: 2006-03-29

**Abstract:** Both anti-polarization and antireflection coatings were designed and optimized by means of inhomogeneous coatings theory. The reason for different transmittance caused by polarized light was analyzed in the case of broad angle incidence. By means of selecting Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as different transmittance materials of multilayer and utilizing BK<sub>7</sub> as the materials of substrate, both anti-polarization and antireflection multilayer of wave length between 500 nm and 560 nm and incidence angle from 0° to 70° have been designed. The design result indicated that the transmittance has been increased greatly.

**Key words:** Optical coatings; The theory of inhomogeneous coatings; Antireflection coatings; Anti-polarization; Transmittance



**XU Xiao-feng** was born in 1961 and received the Ph. D. degree in 2004 from Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. He is an associate professor of Donghua University. His research focuses on film optics.