

文章编号:1001-9014(2004)03-0185-04

利用 Rugate 膜系理论实现宽角度入射 1500-1600nm 波段减反射薄膜的研究

徐晓峰¹, 张凤山², 范滨³, 张旻浩²

(1. 东华大学理学院应用物理系, 上海 200051; 2. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 日本光弛有限公司, 日本, 350-0801)

摘要:阐述了利用 Rugate 膜系理论设计宽角度减反射薄膜的方法, 从理论上分析了在宽角度的情况下, 偏振产生透过率不同的原因, 模拟设计了光谱区在 1500—1600nm 波段, 入射角从 0 度到 80 度宽角度减反射薄膜, 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; Rugate 膜系; 减反射膜系; 偏振光; 优化
中图分类号: O484.1 **文献标识码:** A

STUDY ON ANTIREFLECTION COATINGS OF BROAD ANGLE INCIDENCE IN 1500-1600NM BY RUGATE COATINGS

XU Xiao-Feng¹, ZHANG Feng-Shan², FAN Bin³, ZHANG Min-Hao²

(1. Applied Physics Department, Donghua University, Shanghai 200051, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Oporun Co., Ltd., Takeno 350-0801, Japan)

Abstract: A method of designing antireflection coatings by the way of Rugate coatings was presented. The reason of difference of transmittance was analysed under the circumstances of polarization and board angle incidence. Antireflection coatings of 1500-1600nm and incidence angle from 0° to 80° were designed. A new way of design was founded. It shows that the result of optimization is perfect. This method can increase the ratio of utilization of optical energy. It has great value of application in the fields of sun energy, optical fiber communication, spaceflight, laser and so on.

Key words: film optics; Rugate coatings; antireflection coatngs; polarized light; optimization

引言

随着薄膜光学理论和应用技术的发展, 薄膜光学已经成为近代光学的一个重要分支, 它越来越广泛地被应用到航天、激光、太阳能以及光通讯等许多领域. 减反射薄膜是光学薄膜设计中应用最多的膜系之一, 由于科技的发展, 新材料的出现以及制造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也越来越高, 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新的要求. 应用 Rugate 膜系理论进行薄膜设计, 正是适应了新技术发展的迫切需要. 从

光谱响应特性分析来看, Rugate 膜系具有负滤光片的性质^[1,2], 而从膜系结构分析来说, 又具有折射率随膜层物理厚度做正弦变化的膜系结构. 根据傅利叶变换理论^[3-6], 任意一个函数都可以分解成若干个不同变量频率的正弦波分量, 若把这个正弦变化广义地理解为正弦分量, 那么就可以认为 Rugate 膜系是一种非均匀膜系结构. 由于 Rugate 膜系结构中其折射率是渐变的, 且在设计、结构、制备等方面与以往使用的常规滤光片有根本的不同, 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, 但由于其制备困难, 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.可以说,Rugate 膜系的研究是非均匀膜系研究中最具代表性和典型性的.

1 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^[4-6],对单层膜:

$$\begin{aligned} \eta_p &= n/\cos\theta \\ \eta_s &= n \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

已知偏振分离 Δn 为:

$$\Delta n = \frac{\eta_p}{\eta_s} = \frac{n/\cos\theta}{n \cdot \cos\theta} = \frac{1}{\cos^2\theta} = \frac{1}{(1 - \frac{n_0^2 \sin^2\theta_0}{n^2})} \quad (2)$$

容易看出 Δn 对单层膜而言是一个恒大于 1 的量,其中 η_p 大于 η_s . 然而对于薄膜组合,有可能使 $\Delta n = 1$.

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 p 和 s 光在某一波段同时达到高增透的效果.

如何减少偏振而使 p 和 s 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^[7-9]. 其中之一就是采用 Rugate 膜系的思想. 理想的 Rugate 膜系应当是膜层折射率随几何厚度作连续变化的,其公式如下:

$$n = n_a + n_p \cdot \cos(2\pi z/p) \quad (3)$$

$$\lambda_0 = 2p \cdot n_a \quad (4)$$

表 1 一个余弦周期内等效层及高低折射率层参数

Table 1 Parameters of layers of equivalent, and high and low index of refraction in one period of cosine

Nol	Equivalent layers		High low layers			
	n	nd ($\lambda_0/4$)	n	nd($\lambda_0/4$)		
1	1.52990	1/3	2.1000	0.106482L	0.039693H	0.106482L
			1.43807			
2	1.40000	1/3	2.10000	0.127090L	3.983979H	0.127090L
			1.43807			
3	1.27010	1/3	2.10000	0.141645L	3.933502H	0.141645L
			1.43807			
4	1.27010	1/3	2.10000	0.141645L	3.933502H	0.141645L
			1.43807			
5	1.40000	1/3	2.10000	0.127090L	3.983979H	0.127090L
			1.43807			
6	1.52990	1/3	2.10000	0.106482L	0.039693H	0.106482L
			1.43807			

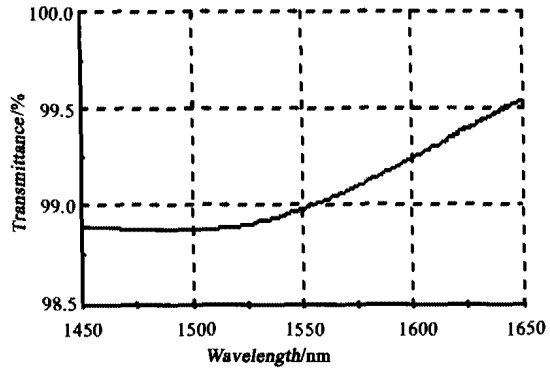


图 1 0°入射角优化透过率曲线
Fig. 1 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 0°

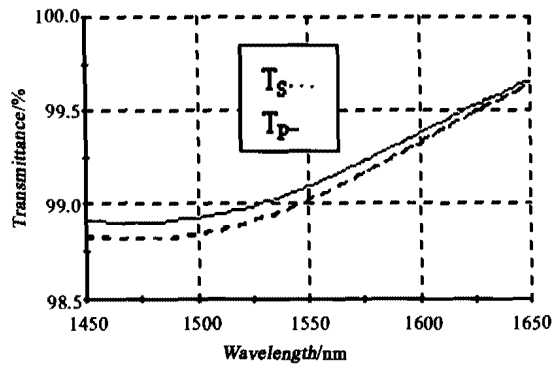


图 2 10°入射角优化透过率曲线
Fig. 2 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 10°

n_a 是一个周期内的平均折射率, n_p 是折射率变化幅值, p 是折射率随厚度变化周期, λ_0 是反射带中心波长. 由于自然界中可用作光学薄膜材料的物质很少,要制备一个真正含义上的 Rugate 滤光片是十分困难的,这就要采取特殊的方法,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

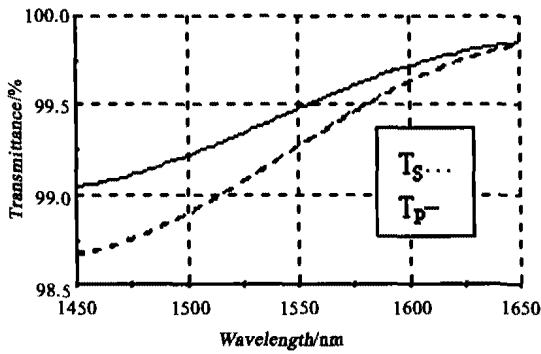


图 3 20°入射角优化透过率曲线
Fig. 3 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 20°

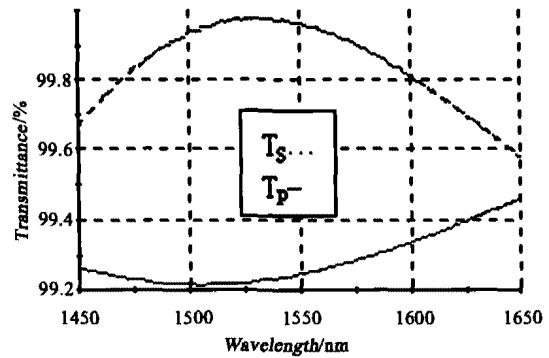


图 6 60°入射角优化透过率曲线
Fig. 6 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 60°

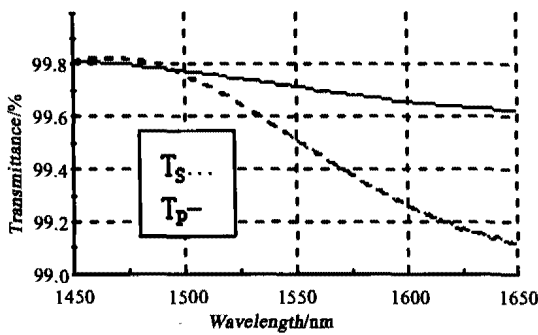


图 4 40°入射角优化透过率曲线
Fig. 4 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 40°

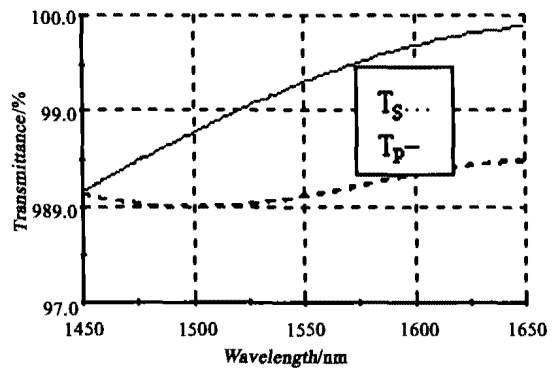


图 7 70°入射角优化透过率曲线
Fig. 7 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 70°

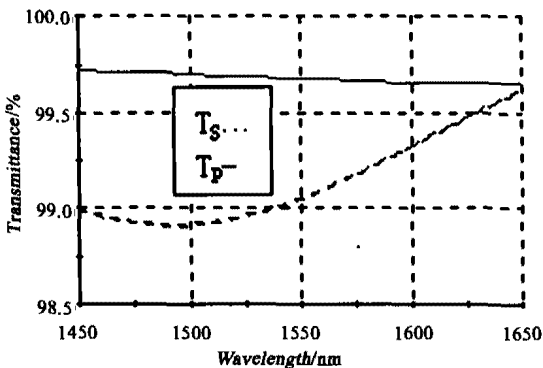


图 5 50°入射角优化透过率曲线
Fig. 5 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 50°

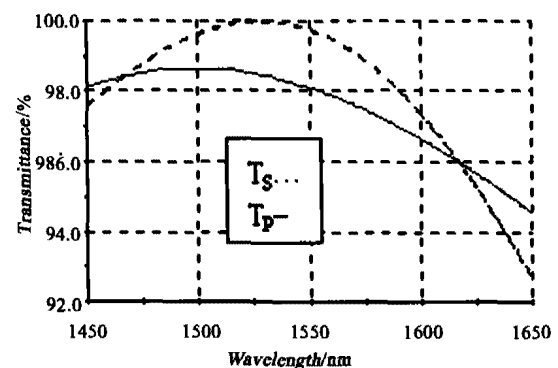


图 8 80°入射角优化透过率曲线
Fig. 8 Transmittance curve of optimization design with incident angle of 80°

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, 这时的膜系结构已经完全失去了 Rugate 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 Rugate 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, 考虑各种工艺参数、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, 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、折射率变化周期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

计膜系合理优化, 以达到理想的膜系设计.

2 膜系设计、优化与结果

直接采用式(3)变折射率公式设计膜系是困难的, 若采用折射率均匀膜层去等效折射率余弦变化的膜层则是行之有效的, 每层的折射率用 Herpin 方法等效, 选取了 Ta_2O_5 和 SiO_2 两种材料作为等效折射率材料, 选取 BK_7 作为基底材料, 设计如下:

$$n_a = 1.4, \quad n_p = 0.15, \quad \lambda_0 = 2000nm$$

选取两个余弦周期作为初始膜系, 两边插入适

当的匹配层,选取 1500—1600nm 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 度到 80 度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,最终膜系为 51 层,其透过率随波长变化曲线如图 1 至图 8 所示.

3 结论

利用 Rugate 膜系理论在红外光谱区 1500—1600nm 波段内,入射角从 0 度到 80 度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.

REFERENCES

- [1] Austin R, Miohoad 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**: 135—138.
- [2] Dobrowolski J A, Love D G. Optical thin film synthesis program based on the use of fourier transforms[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**: 3039—3043.
- [3] Southwell W H. Coating design using very thin high and low index layers[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**: 457—460.
- [4] Baumeister P. Simulation of a rugate filter via a stepped index dielectric multilayer[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**: 2644—2648.
- [5] Southwell W H. Rugate index profile which suppresses all harmonic stopbands. optical interference coatings[J]. *Technical Digest Series*, 1988, **6**: 142—146.
- [6] Sossi L, Eesti. The design of thin film[J]. *NSVTead. Akad. Toim. Fuus. Mat*, 1974, **3**: 229—233.
- [7] Craig R. Method for analysis of the characteristic matrix in optical systems[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**: 1092—1095.
- [8] Lin Yong-Chang, Lu Wei-Qiang. Optical thin-film principles[M]. Beijing: National Defence Industry Press(林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社), 1990, 239.
- [9] Dobrowolski Li Li, Sullivan J A. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displays[J]. *SPIE*, 1999, **3634**: 52—62.
- [10] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solid* [M], Orlando: Academic FL, 1985, 759.
- [11] Tauc J C, *Amorphous and Liquid Semiconductor* [M], New York: Plenum Press, 1974, 159.
- [12] Hu Z G, Wang G S, Huang Z M, *et al.* Optical properties of PbTiO₃ thin films prepared by a modified sol-gel processing[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(胡志高, 王根水, 黄志明, 等. 溶胶-凝胶法制备的 PbTiO₃ 薄膜的光学性质研究. 红外与毫米波学报), 2002, **21**(3): 175—179.
- [13] Wemple S H, Didomenico M Jr, Optical properties of perovskite oxides in their paraelectric and ferroelectric phases[J]. *Phys. Rev. B*, 1971, **3**: 1338—1351.
- [14] Majumder S B, Jian M, Katiyar R S, Investigations on the optical properties of sol-gel derived lanthanum doped lead titanate thin films[J]. *Thin Solid Films*, 2002, **402**: 90—98.
- [15] Krempask Y J, Wang L, Proctor M, *et al.* Optical properties of PZT and PMZT sputtered thin films[J]. *Solid State Communications*, 1991, **78**(12): 1039—1043.
- [16] Okuyama M, Usuki T, Hamakawa Y, *et al.* Epitaxial growth of ferroelectric PLZT thin film and their optical properties[J]. *Appl. Phys.*, 1980, **21**: 339.
- [17] Trolrier-McKinstry S, Hu H, Krupanidhi S B, *et al.* Spectroscopic ellipsometry studies on ion beam sputter deposited Pb(Zr, Ti)O₃ films on sapphire and Pt-coated silicon substrates[J]. *Thin Solid Films*, 1993, **230**: 15—27.
- [18] Zhu D R, Li Q J, Lai T S, *et al.* Optical properties of lead lanthanum zirconate titanate amorphous thin films[J]. *Thin Solid Films*, 1998, **314**: 210—213.
- [19] Li H Q, Zhang Y L, Wen J H, *et al.* Optical properties of lead lanthanum zirconate titanate amorphous thin films[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(李辉道, 张曰理, 文锦辉, 等. PLZT 非晶薄膜光学性质研究. 红外与毫米波学报), 2000, **19**(3): 201—204.
- [20] Mo D, Li Q J, Zhu D R. Ellipsometric spectra and optical constants of PLZT thin films[J]. *Ferroelectrics*, 1999, **229**: 123—130.
- [21] Forouhi A R, Bloomer I, Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics[J]. *Phys. Rev. B*, 1986, **34**: 7018—7026.
- [22] Kim S Y, Simultaneous determination of refractive index, extinction coefficient, and void distribution of titanium dioxide thin film by optical methods[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **34**: 6703—6707.

(上接第 184 页)