

0.55~0.85 μm 波段增透膜的相位调控设计与研制

李大琪¹ 于天燕^{1,2} 陈刚¹ 刘宝剑¹ 余德明¹ 段微波^{1,2} 刘定权^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 在 0.55~0.85 μm 波段范围内,在保证薄膜高透射率的同时对其相位进行调控,是多偏振成像模块项目研制的核心技术。采用等效膜层理论,使用三种氧化物薄膜材料: Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiO_2 ,在光学玻璃 H-LaK4L 基底上设计并制备了相位调控增透膜。经过工艺优化,研制结果表明,在 28°入射条件下,0.55~0.85 μm 的波段范围内,薄膜平均透射率大于 97%,其相位差小于 1°。膜层能够经受航天光学薄膜产品的环境实验的检验,满足了项目的可靠性要求。

关键词 薄膜; 增透膜; 相位调控膜

中图分类号 O484.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0731001

Design and Fabrication: Phase Modulated Antireflection Coatings in 0.55~0.85 μm Waveband

Li Daqi¹ Yu Tianyan^{1,2} Chen Gang¹ Liu Baojian¹

Yu Deming¹ Duan Weibo^{1,2} Liu Dingquan^{1,2}

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

²Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract In the waveband of 0.55~0.85 μm , how to modulate the phases while ensuring high transmittance of thin films is the key technology of multiple polarization imaging module project. Phase modulated antireflection coatings has been designed and fabricated on the substrate H-LaK4L (optical glass) by utilizing asymmetry equivalent layers theory and using three types of oxide coating materials: Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiO_2 . After process optimization, in the waveband of 0.55~0.85 μm and with the incidence angle of 28°, the results indicate that the average transmittance is greater than 97% while phase difference is less than 1°. The coatings can pass the environmental test required for space optical thin film products, and meet the reliability requirement of the project.

Key words thin films; antireflection coatings; phase regulated coatings

OCIS codes 310.1210; 310.5448; 310.6860

1 引言

对航天遥感来说,目标光学信号本身所包含的偏振特性可提供大量有用的信息,随着航天遥感技术的发展,越来越多的航天遥感卫星对光学薄膜元件的偏振特性控制提出了要求^[1-2]。

光线在斜入射情况下,将不可避免地产生 p 光和 s 光的能量分离,当 p 光和 s 光的分离太大时,不仅会导致一部分的光能量损失,也会影响光学系统的性能。国内外许多学者对光学薄膜的偏振特性进行了研究。Thelen 在 1980 年首次设计了倾斜条件下的消偏振分色片^[1];顾培夫等^[3]于 2003 年设计并制备了 20°倾斜入射的波分复用薄膜滤光片,使得 p 光和 s 光的峰值波长保持一致;2005 年,顾培夫等^[4]又采用宽带法布里-珀罗薄膜干涉滤光片中心波长两侧的干涉带作为长波通或短波通截止滤光片的初始膜系,然后经适当的优化以提高透射带的透射率;王晴云等^[5]利用多层双折射薄膜实现了倾斜入射条件下单波长消偏振分束薄膜;马小凤等^[6]在 2007 年针对海洋遥感卫星的任务需求,设计并制备了宽光谱消偏振分色片;艾曼灵等^[7]于

收稿日期: 2016-02-24; 收到修改稿日期: 2016-03-24

作者简介: 李大琪(1980—),女,硕士,副研究员,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: lidaqi@mail.sitp.ac.cn

2014 年设计了 1 种具有低偏振像差的偏振分色合色系统。

上述的研究工作大都是为消除 p 光和 s 光的能量分离而展开,但是对 p 光和 s 光本身所包含的相位信息及其调控的研究则非常少。本文的研究工作围绕相位调控展开。

2 薄膜设计

2.1 理论依据

设计采用了等效膜层的设计思想^[8-9]。以最简单的膜系(qpq)为例,来说明周期性膜系在数学上存在 1 个等效折射率概念。膜系的特征矩阵为:

$$\mathbf{M}_{\text{qpq}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_q & i \sin \delta_q / \eta_q \\ i \eta_q \sin \delta_q & \cos \delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_p & i \sin \delta_p / \eta_p \\ i \eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_q & i \sin \delta_q / \eta_q \\ i \eta_q \sin \delta_q & \cos \delta_q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

因为 qpq 膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同的特性,所以可以用下式来进行表示:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i \sin \Gamma / E \\ i E \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

因此 qpq 膜系可用 1 层特殊的等效单层膜来表达。这层等效膜的折射率 E (等效折射率) 和相位厚度 Γ (等效相位厚度) 可由下面关系式决定:

$$E_{\text{qpq}} = \eta_q \left[\frac{\sin 2\delta_q \cos \delta_p + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q + \eta_p}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_q \sin \delta_p - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q - \eta_p}{\eta_p} \right) \sin \delta_q}{\sin 2\delta_q \cos \delta_p + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q + \eta_p}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_q \sin \delta_p + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q - \eta_p}{\eta_p} \right) \sin \delta_q} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{qpq}} = \arccos \left[\cos 2\delta_q \cos \delta_p - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p + \eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_q \sin \delta_p \right]. \quad (4)$$

2.2 设计方法

采用黄金分割优化程序^[10],通过改变膜层厚度 d 直到接近目标函数。选择这一特殊的优化程序是因为它能迅速地达到给出的均方根评价函数 F_e 最小值:

$$F_e = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{B_i^T - B_i}{W_i} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 B_i^T 、 B_i 及 W_i 分别是 m 个目标透射率点中第 m 层的目标值、初始值及允差。

对初始膜系中每一层膜厚 d 进行循环优化,同时根据工艺可实现程度来对膜层厚度的最大值和最小值进行限定。根据优化结果进行膜层灵敏度分析,对优化结果进行筛选,直到满足目标函数及光谱性能,这样就得到了最终膜系设计结果。

2.3 设计结果

增透膜的设计原则就是在已知基底材料的情况下,使用最少的膜层,尽可能地实现最高的透射率,同时考虑薄膜材料之间及膜层与基底之间的应力匹配,从而保证产品的可靠性。根据上述原则,相位调控增透膜的设计步骤如下:1)综合考虑薄膜材料的折射率、吸收系数及应力匹配,选择 3 种不同高(H)中(M)低(L)折射率材料作为设计材料;2)在薄膜材料确定的情况下,改变膜层的层厚和层数,可得到不同的等效折射率 E 和等效相位 Γ ,因而可采用 HMH 和 LHL 这样的膜系结构,初始膜系结构可为 HMHLHL 或者 HMHMHLHL。根据入射角的大小及波段范围,初始膜系为 6 层或 8 层膜系结构的组合。3)设定优化目标。将所需达到的目标值带入进行优化设定。通过对膜厚 d 的不断优化,可得最终设计结果。采用此方法在基底折射率为 1.44~1.92 的光学玻璃上,都获得了很好的设计结果。

以多偏振成像模块系统为例,光学系统要求在 0.55~0.85 μm 波段范围内,研制相位调控增透膜,其平均透射率大于 97%;相位差小于 1° 。基底为光学玻璃 H-LaK4L,其折射率为 1.64,入射角度为 28° 。

根据上述方法,选用了 H-Ta₂O₅、M-Al₂O₃、L-SiO₂,分别作为高中低折射率材料。系统光路的入射角度为 28° ,是 1 个比较大的入射角度,因而选择的初始膜系结构为 6 层加 8 层:air|d1Ld2Hd3Ld4Hd5Md6H(膜系 1)|基底|d7Hd8Md9Hd10Md11Hd12Ld13Hd14L(膜系 2)|air,其中 d 为膜层厚度。

经过优化设计,最终的设计膜系为:

1)膜系 1:0.3H 0.38M 1.23H 0.13L 0.55H 1.07L;

2)膜系 2:0.09H 0.72M 0.36H 0.28M 1.98H 0.27L 0.36H 1.17L;设计中心波长 570 nm。其设计结果如图 1 所示。

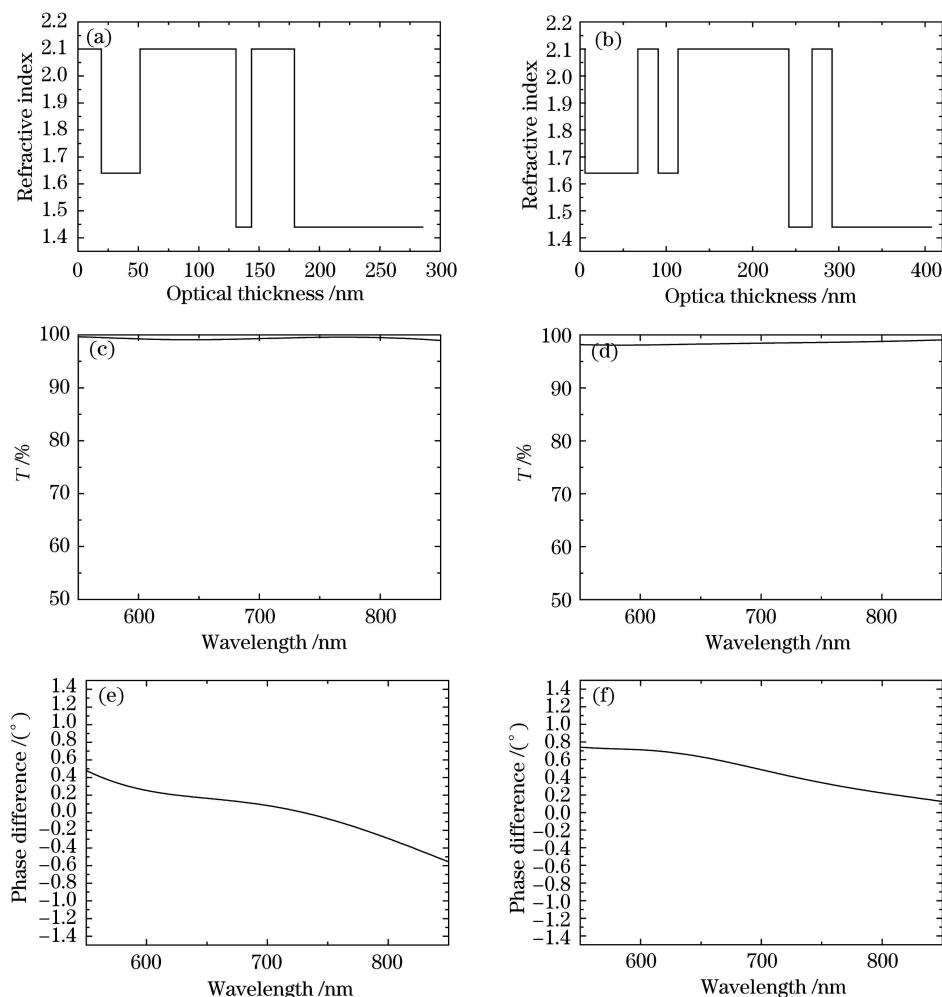


图 1 设计结果图。(a)膜系 1 厚度分布图;(b)膜系 2 厚度分布图;(c)膜系 1 透射率曲线;
(d)膜系 2 透射率曲线;(e)膜系 1 相位差曲线;(f)膜系 2 相位差曲线

Fig. 1 Figures of design result. (a) Thickness distribution of stack 1; (b) thickness distribution of stack 2;

(c) transmittance curve of stack 1; (d) transmittance curve of stack 2;

(e) phase difference of stack 1; (f) phase difference of stack 2

3 实验结果

样品的研制是在国产南光箱式真空镀膜设备上完成的。本底真空 1.2×10^{-3} Pa, 镀制之前基底在 250°C 温度下保温烘烤 2 h, 镀制时充 18 sccm (sccm 为标况下毫升每分钟) 氧气进行离子辅助, 可提高薄膜与基片之间的附着力, 提高薄膜材料的稳定性。镀制过程中膜层厚度监控采用 IC5 晶振监控方式。3 种镀膜材料采用电子束蒸发的方法, 蒸发速率分别为: H-0.12 nm/s; M-0.6 nm/s; L-0.8 nm/s。

样品的光谱曲线测试是在美国 PE 公司生产的 Lamd900 型可见/近红外分光光度计上完成; 相位差测试是在美国 J A WOOLLAM 公司生产的商用设备 VASE-32 可见近红外椭偏仪上完成, 研制结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 所研制的相位调控增透膜, 在 $0.55 \sim 0.85 \mu\text{m}$ 范围内样品平均透射率大于 97%, 相位差小于 1° 。完全满足多偏振成像模块系统的要求。

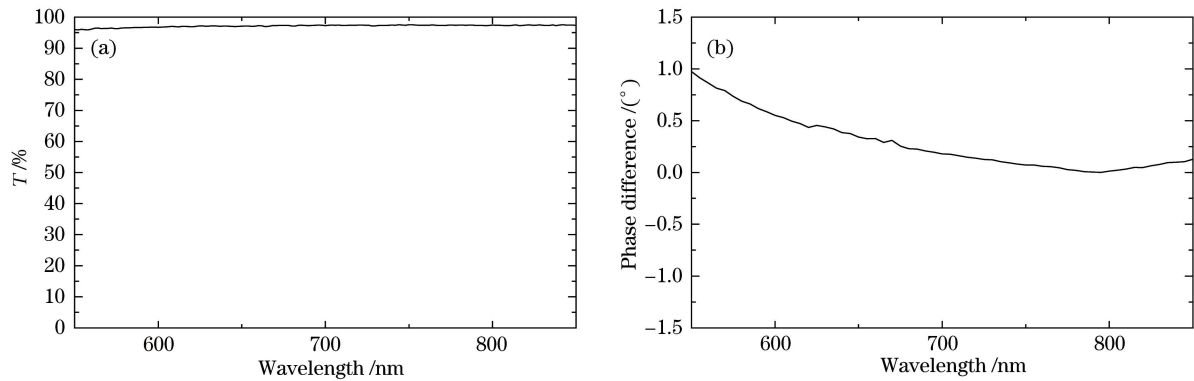


图 2 实验结果图。(a)实测透射率曲线;(b)实测相位差曲线

Fig. 2 Figures of experimental result. (a) Measured curve of transmittance; (b) measured curve of phase difference

同时为了满足航天产品的可靠性要求,进行了如表 1 所示的环境模拟实验,经过以下实验后,膜层无脱落则可视作通过实验。实验分别是:1)附着力实验,把 3M-610 型胶带的胶面牢牢地贴在膜层表面,排出气泡,迅速拉起胶带的一端;2)浸泡实验,在 45 °C 水中浸泡 8 h;3)湿度实验,在 45 °C,相对湿度不小于 95% 的环境中,保持 24 h;4)温度交变实验,在 45 °C 环境中保持 30 min,再自然降温,在 -10 °C 环境中保持 30 min,后自然升温到 45 °C,此为 1 个循环,共计完成 3 个循环。实验结果表明所研制的产品可满足航天产品的环境可靠性要求。

表 1 相位调控增透膜实验结果

Table 1 Test results for of phase modulated antireflection coatings

Test	Result
Adhesion test	Pass
8 h 45 °C soaking	Pass
24 h 45 °C temperature and 95% humidity	Pass
High and low temperature test	Pass

4 结 论

采用等效膜层理论,归纳总结了相位调控增透膜的设计方法。该设计方法可以应用到 1.44~1.92 折射率基底的光学玻璃上,具有广泛的应用价值。按照多模块偏振系统的要求,使用 3 种氧化物材料 Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiO_2 相配合,在光学玻璃 H-LaK4L 上进行了研制。研制结果表明,在 28° 入射下,在 0.55~0.85 μm 波段范围内,相位调控增透膜的平均透射率大于 97%,相位差小于 1°,达到了系统的光学指标要求。样品通过了航天产品环境实验要求的检验,可以满足航天产品的可靠性使用要求。

参 考 文 献

- Yin Xin, Liu Dingquan, Duan Weibo, *et al.* Design and fabrication of near-infrared dichroic beam-splitter for polarization state coding[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 31(6): 505-509.
尹 欣, 刘定权, 段微波, 等. 近红外波段偏振编码用分色片的设计与制作[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 505-509.
- Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, *et al.* The present research and developing trend of polarization remote sensing[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1237-1240.
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥感的研究现状及发展趋势[J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1237-1240.
- Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang, *et al.* Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing (DWDM) thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 377-380.
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.
- Gu Peifu, Chen Weibin, Liu Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2) :

274-278.

顾培夫, 陈卫斌, 刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 274-278.

- 5 Wang Qingyun, Qi Hongji, He Hongbo, *et al.* Design and manufacture of birefringent non-polarizing thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2154-2158.
王晴云, 齐红基, 贺洪波, 等. 双折射消偏振膜的设计和制备[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2154-2158.
- 6 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan, *et al.* Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 563-566.
马小凤, 王丹, 刘定权, 等. 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 563-566.
- 7 Ai Manlin, Zhang Meijiao, Jin Bo, *et al.* Polarizing color separator and combiner with low polarizing aberration[J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(6): 508-512.
艾曼灵, 张梅娇, 金波, 等. 具有低偏振像差的偏振分色合色系统[J]. 光学仪器, 2014, 36(6): 508-512.
- 8 Xu Jiangfeng, Chen Qiuling. Anti-reflection coating designed by genetic algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(9): 1271-1275.
徐江峰, 陈秋灵. 增透膜的遗传算法设计[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1271-1275.
- 9 Tang Jingfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 154-158.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 154-158.
- 10 Yu Tianyan, Cheng Xiaochun, Qin Yang, *et al.* Design and manufacture of broadband infrared antireflection coatings for germanium windows[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1197-1200.
于天燕, 成效春, 秦杨, 等. 锗窗口红外宽光谱增透膜的研制[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1197-1200.