

文章编号: 0253-2239(2010)07-2154-05

双折射消偏振膜的设计和制备

王晴云^{1,2} 齐红基^{1,3} 贺洪波¹ 邵建达¹ 范正修¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

³上海大恒光学精密机械有限公司, 上海 201800

摘要 基于倾斜沉积薄膜材料的双折射特性,采用单一 TiO₂ 设计和制备了中心波长为 632 nm 的双折射消偏振膜。首先以 60°和 70°的沉积角度镀制了 TiO₂ 单层膜,通过单层膜的透射光谱分别拟合出两种沉积角度下薄膜对 s 和 p 偏振光的等效折射率 n_{PH} , n_{SH} 和 n_{PL} , n_{SL} 。通过对折射率的组合,实现正入射时 s 偏振光透射率大于 p 偏振光,而入射角度增大会使两者透射率差值减小,基于这一思想设计并制备了消偏振膜。分别测量了消偏振薄膜在 400~800 nm 波段范围内正入射及倾斜入射条件下 s 和 p 偏振光的透射光谱。入射角为 60°时, s 偏振光反射带宽基本与 p 偏振光反射带宽重合,在波长 632 nm 左右基本实现消偏振。结果表明,利用材料的双折射特性,可以设计和制备出倾斜入射条件下消偏振薄膜。

关键词 薄膜光学;消偏振;倾斜沉积;双折射

中图分类号 O484.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103007.2154

Design and Manufacture of Birefringent Non-Polarizing Thin Films

Wang Qingyun^{1,2} Qi Hongji^{1,3} He Hongbo¹ Shao Jianda¹ Fan Zhengxiu¹

¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Shanghai Daheng of Optics and Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China

Abstract Based on the birefringent characteristic of thin film fabricated by glancing angle deposition (GLAD), a birefringent non-polarizing thin film at wavelength 632 nm only using titanium oxide is designed and deposited. At the beginning, two titanium oxide monolayers were deposited with the deposition angle 60° and 70° respectively. The effective refractive index of the monolayer for s- and p-polarization, n_{PH} , n_{SH} and n_{PL} , n_{SL} , were obtained. a higher s transmittance than p polarization at normal incidence is got by arranging the index correctly, since the increase of the incidence would bring an opposite effect, we could get a non-polarizing effect at a very angle can be got. Based on the analysis above, a non-polarizing thin film was designed and prepared. The s- and p-polarization transmission spectra of non-polarizing film were measured with photometer at normal and tilted incidence. At the incidence angle of 60°, the reflection band width of s- and p-polarizations were less different and the non-polarizing effect was achieved partially. The obliquely incident non-polarizing thin film can be designed based on the thin film material's birefringence.

Key words thin film optics; non-polarizing; glancing angle deposition; birefringence

1 引 言

当光线斜入射至薄膜介质中时,由于电场和磁场的切向连续,不可避免地会产生偏振分离,即 s 和 p 偏振光具有不同的有效折射率。利用斜入射情况下膜层呈现的偏振分离现象,可以设计出偏振分光

薄膜,例如利用斜入射下高反射薄膜对于两种偏振态入射光具有不同的反射带宽,可以设计出平板型的偏振分光膜^[1];利用高低折射率膜层满足布儒斯特(Brewster)条件,可以设计棱镜型的偏振分光膜^[2]。然而,在许多光学系统中,这种偏振分离对光

收稿日期: 2009-07-15; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(60778026)和上海市青年科技启明星计划(07QB14006)资助课题。

作者简介: 王晴云(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: qy_wang_siom@163.com

导师简介: 齐红基(1979—),男,博士,副研究员,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: qhj@siom.ac.cn(通信联系人)

束传播产生不利影响,必须尽可能减少偏振分离,采用消偏振薄膜是一种有效的方法。

消偏振薄膜设计是一个非常棘手的光学薄膜设计问题,引起了不少学者的关注。1960年 Costich^[3]运用等效折射率的思想设计了消偏振膜系;1976年 Thelen^[4]在此基础上提出了仅用 $\lambda/4$ 波长膜堆在胶合玻璃棱镜中实现消偏振;1992年 Gilo^[5]提出利用 Brewster 条件采用三种材料实现消偏振膜系的设计;2006年徐学科等^[6]利用超薄薄膜的受抑全反射设计了消偏振分光膜。随着计算机技术发展和各类高效优化算法的出现,近年来还有许多学者利用优化设计的数值方法对消偏振问题进行了研究^[7~10]。

消偏振膜系之所以如此复杂,原因在于对于各向同性的薄膜材料而言,当光线倾斜入射均匀介质薄膜时,薄膜对于 p 和 s 偏振光的等效折射率分别为 $n/\cos\theta$ 和 $n\cos\theta$,其中 n 表示薄膜材料的折射率, θ 表示光波在膜层中的折射角度。入射角度越大,对应的 θ 越大,偏振分离越严重。为了消除斜入射下两种偏振态光波的偏振分离,需要薄膜对于两种偏振态具有不同的折射率,即薄膜具有双折射特性。2004年齐红基等^[11]利用薄膜的双折射特性,实现了可见光波段的 50:50 分光消偏振膜系设计,由于受制备技术限制,没有从实验上获得消偏振薄膜。最近几年,随着倾斜薄膜沉积(GLAD)技术的不断发展,对于薄膜双折射特性的控制能力有了显著增强^[12]。

本文利用电子束蒸发 TiO_2 材料,以 60° 和 70° 的沉积角分别镀制单层膜。利用 Lambda900 分光光度计获得两个沉积角所镀单层膜对 p 和 s 偏振光的透射光谱,用包络法拟合出两个角度倾斜沉积薄膜的折射率色散关系,并根据拟合出的折射率,设计并制备了消偏振膜。测量结果表明,在 60° 入射角度下所镀薄膜具有较好的消偏振效果。

2 消偏振薄膜设计思想

通常情况下,倾斜沉积的薄膜为双轴双折射薄膜,且沉积角越大,薄膜的折射率越小;另外,对 s 和 p 偏振光的薄膜等效折射率也不同,一般来说 $n_p < n_s$ ^[13]。若采用两种不同沉积角度镀制薄膜,则可以利用同一种材料获得具有 n_{PH}, n_{SH} 和 n_{PL}, n_{SL} 两组高低折射率的膜层。为了使双折射特性更加显著,镀膜时使高低折射率膜层主轴相互垂直。这样 s 偏振光的折射率依次为 $n_{PH}, n_{SL}, n_{PH}, n_{SL}, \dots$, p 偏振光的折射率依次为 $n_{SH}, n_{PL}, n_{SH}, n_{PL}, \dots$,如图 1 所示。

而 $n_{SH} > n_{SL}, n_{PH} > n_{PL}$,这样在正入射条件下, s 偏振光高低折射率层折射率差值较小, p 偏振光折射率差值较大,更容易通过设计得到消偏振效果。

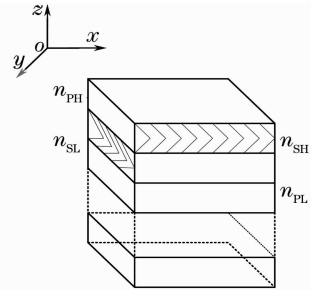


图 1 多层膜折射率示意图

Fig. 1 Refractive index schematic diagram of multi-layer thin film

无论是各向同性材料还是各向异性材料,对于高低折射率交替的多层薄膜,反射带宽决定于高低折射率的比值,比值越大反射带越宽, s 偏振光的折射率比值随着入射角的增大而增加, p 偏振光的折射率比值随着入射角的增加而减小^[14]。通过这样的设计,在正入射时, s 偏振光的反射带宽较窄, p 偏振光反射带宽较宽,而由前面的讨论,随着角度的增大, s 偏振光反射带宽会变宽, p 偏振光反射带宽会变窄,这样就会有一个角度使得 s 和 p 偏振光的反射带宽基本重合,设计合理的话就能得到斜入射条件下的消偏振薄膜。

3 单层膜折射率定标及消偏振膜镀制和测量

薄膜的制备采用电子束蒸发沉积技术。实验设备为南光 ZZS550 镀膜机,基片为 K9 玻璃,对真空室内夹具部分进行了改造,使用步进电机控制基片的转动,夹具部分如图 2 所示。其中 θ 为蒸发气流与基片表面法线的夹角,亦即沉积角。在镀膜过程中,使用美国 Telemark 公司生产的 INFICON/5 石

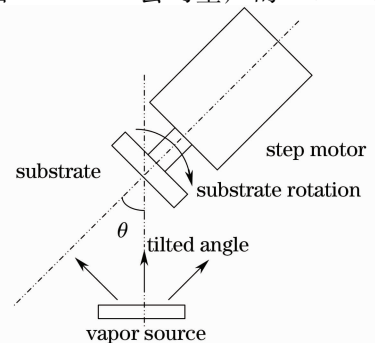


图 2 GLAD 镀膜装置示意图

Fig. 2 Schematic of birefringent-film preparation by GLAD

英晶控仪,实时监控沉积速率和薄膜的厚度。

3.1 折射率的确定

首先以 60°和 70°沉积角在 K9 基片上镀制 TiO₂ 单层膜,沉积速率为 0.5 nm/s,本底真空为 3×10⁻³ Pa,为了获得化学计量比的薄膜,在薄膜制备过程中充入高纯度的氧气,工作气压为 2×10⁻² Pa。

薄膜制备完成后,使用 Lambda-900 分光光度计测量了薄膜在 400~800 nm 范围内的正入射时的透射率曲线,入射光为两个振动方向互相垂直的

线偏振光,测量结果如图 3 所示。

对于弱吸收薄膜,折射率可以用透射率包络法计算得到^[15],拟合出薄膜 s 和 p 偏振光的折射率曲线如图 4 所示。

基于第 2 节介绍的设计思想以及拟合出的两种沉积角度下薄膜的折射率参数,设计了 45°斜入射的消偏振薄膜,对于 s 偏振光分量,采用规整膜系(HL)²⁵ H,设计结果如图 5 所示。

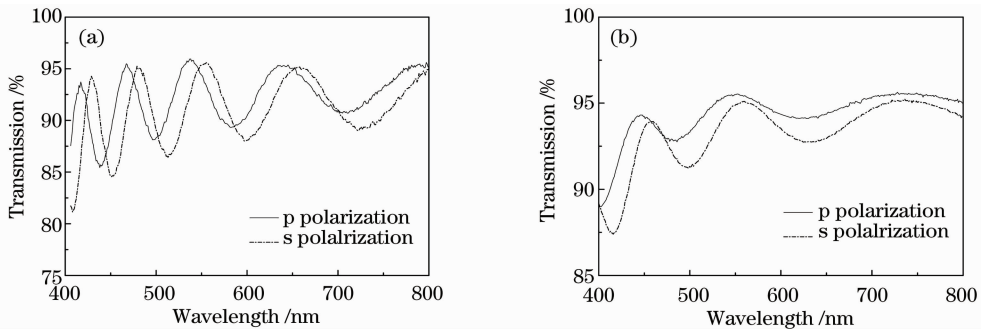


图 3 (a)60°沉积单层膜和(b)70°沉积单层膜在正入射条件下对两种偏振态光波的透射光谱
Fig. 3 Transmission spectra of (a) 60° deposited monolayer and (b) 70° deposited monolayer for two polarized lightwaves, measured at normal incidence.

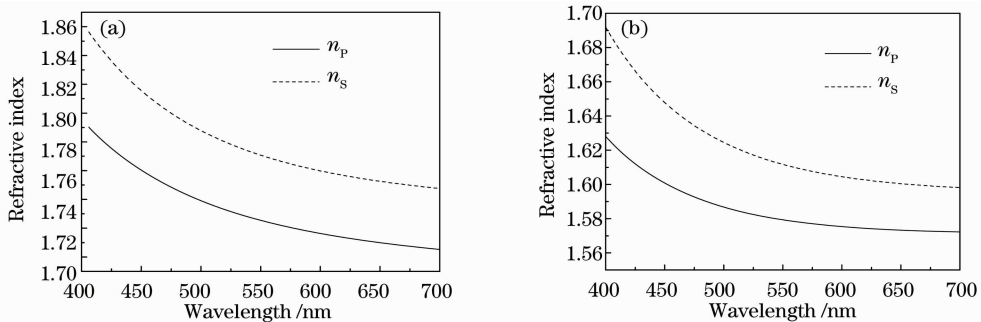


图 4 (a)60°沉积薄膜拟合折射率和(b)70°沉积薄膜拟合折射率

Fig. 4 (a) Fitted refractive index of 60° deposited layer and (b) fitted refractive index of 70° deposited layer

3.2 消偏振薄膜的镀制及结果测量

利用图 2 中的夹具装置,在薄膜制备过程中,采用步进电机控制基片的旋转及倾斜,完成了 51 层薄膜制备,并利用分光光度计测量了薄膜在 45°斜入射条件下对两种偏振态光波的透射光谱,如图 6 所示。

由透射光谱看到,镀膜的结果与设计结果的中心波长发生偏离,波形相差也较明显,在中心波长处 p 偏振光透射率为 19%,而 s 偏振光透射率为 35%。分析认为主要是由于多层膜镀制过程膜厚误差及基片旋转和倾斜定位不准确造成的。为分析利用一种材料制备倾斜入射条件下消偏振薄膜的可行性,对正入射和 60°斜入射条件下两种偏振态光波的透射光谱进行了测量,如图 7 所示。

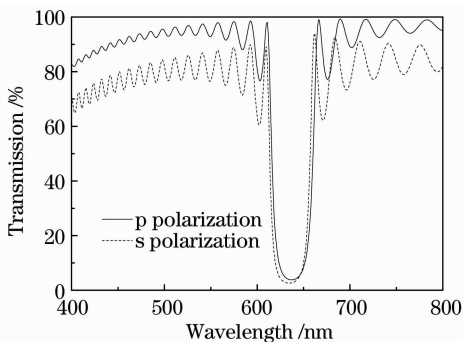


图 5 45°斜入射的消偏振薄膜设计结果

Fig. 5 Design of non-polarizing thin film with the oblique angle of 45°

可以看到,在正入射条件下,p 偏振光具有更大的反射带宽,在 710 nm 附近,s 偏振光比 p 偏振光的透射率高出 40%。与 45°入射测量结果比较,p 偏振光反射带宽加宽、透射率下降,而 s 偏振光的反射带带宽变窄、透射率增加。相对于斜入射而言,正入射条件下薄膜具有最大的等效相位厚度,因此,正入射条件下,反射带的中心波长向长波偏移。60°入射测量时,s 偏振光反射带宽基本与 p 偏振光反射带宽重合,实现了倾斜入射条件下消偏振薄膜制备。

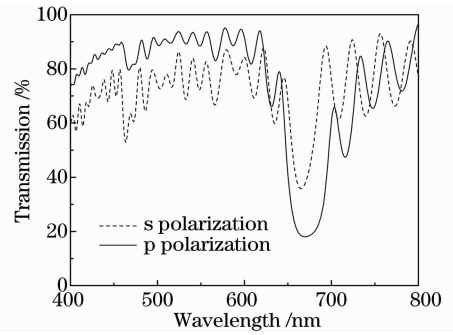


图 6 45°斜入射透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra at 45° incidence

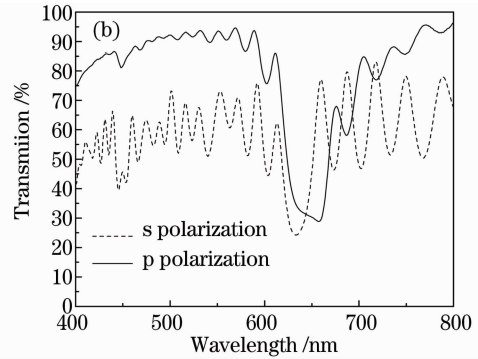
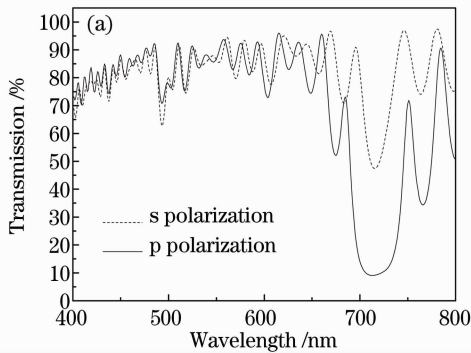


图 7 测量不同入射角的透射曲线。(a) 0 入射;(b) 60°入射

Fig. 7 Transmission spectra at different angles of incidence. (a) 0 incidence; (b) 60° incidence

4 结 论

基于双折射薄膜折射率主轴与 s 和 p 偏振光折射率的关系,通过控制薄膜沉积过程中高低折射率膜层的沉积平面,获得了正入射条件下 s 偏振光具有较小高低折射率比值的设计结果,从而获得了正入射条件下薄膜对于 p 偏振光具有更大的反射带宽及更高的反射率。随倾斜入射角度增大,s 偏振光反射带宽变宽,而 p 偏振光反射带宽变窄,可以在某一角度使得 s 和 p 偏振光对应的反射带宽相当,获得消偏振效果。基于这一设计思想,利用倾斜沉积技术,仅用单一的 TiO₂ 材料实现了消偏振薄膜设计和制备。正入射及倾斜入射条件下薄膜对于 s 和 p 偏振光的透射光谱的测试结果表明,入射角为 60°时,s 偏振光反射带宽与 p 偏振光反射带宽基本重合,在波长 632 nm 左右基本实现消偏振。

参 考 文 献

1 H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters [M]. Third edition, London: Institute of Physics Publishing, 2001, 366~367
2 M. Shokoo-Saremi, M. Nourian M. M. Mirsachi *et al.*. Design of multilayer polarizing beam splitters using genetic algorithm

[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1-3): 57~65
3 V. R. Costich. Reduction of polarization effects in interference coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 866~870
4 A. Thelen. Nonpolarizing interference films inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
5 M. Gilo. Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25): 5345~5349
6 Xueke Xu, Jianda Shao, Zhengxiu Fan. Nonpolarizing beam splitter designed by frustrated total internal reflection inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4297~4302
7 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskoy, G. W. Debell. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5493~5508
8 Zhengping Wang, Jinhui Shi, Shunling Ruan. Designs of infrared non-polarizing beam splitters [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(2): 394~399
9 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, 刘旭等. 薄膜截止滤光片的消偏振设计 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 274~278
10 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan *et al.*. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **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*, 2006, **27**(3): 563~566
11 Qi Hongji, Hong Ruijing, Yi Kui *et al.*. Nonpolarizing and polarizing filter design [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2343~2348
12 Lan Hodgkinson, Qihong Wu. Serial bideposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence [J]. *Appl. Opt.*,

- 1999, **38**(16): 3621~3625
- 13 Wang Sumei, He Hongbo, Shao Jianda *et al.*. ZnS birefringent sculptured thin film prepared by glancing angle deposition technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1699~1702
王素梅, 贺洪波, 邵建达等. 倾斜角沉积技术制备 ZnS 双折射雕塑薄膜 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1699~1702
- 14 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006, 52~55
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, 52~55
- 15 Wang Sumei, Xia Guodong, He Hongbo *et al.*. Structural and optical properties of nanostructured TiO₂ thin film fabricated by glancing angle deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, **431**(1-2): 287~291