

消偏振分光棱镜的设计与性能分析

史金辉, 王政平

(哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为消除光线倾斜入射所产生的偏振效应,介绍了基于布儒斯特条件的消偏振效应分光棱镜设计方法,选用3种常见的薄膜材料,氧化铝和氟化镁2种材料的 p 偏振的有效折射率相等,在特定的波长处实现2种偏振态的反射率相等,可达到消偏振的效果.改善膜层分布实现了优化特定波长域的反射率,研究了利用双折射特性实现的消偏振分光棱镜的角度特性,提供了反射为30%、50%、70%这3种设计方案,入射角偏离 2° 引起的偏振分离小于5%.

关键词:偏振效应;消偏振;双折射;反射率

中图分类号: O432.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7043(2008)09-1019-04

Design and characteristics analysis of non-polarizing beam splitters

SHI Jin-hui, WANG Zheng-ping

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A method has been developed for a non-polarizing beam splitter which utilizes a Brewster condition in a cube that eliminates polarization effects caused by the oblique incidence of light. This design concept was based on the use of quarter-wave layers of three conventional materials which were paired to have the same effective indices of p polarization. In this way they produce identical reflectance of two polarizations at a specified wavelength. Performance outside this wavelength was improved by altering the order of layers. Analysis of characteristics at various angles for non-polarizing beam splitters with birefringent properties was also conducted. Three designs with 30%, 50% and 70% reflectance were achieved with polarization separation less than 5% in the 2° region.

Keywords: polarization effect; non-polarizing; birefringent; reflectance

当光线倾斜入射时,各膜层光学薄膜的有效厚度变薄,由于电场和磁场在每一个界面上的切向分量均为连续,因而薄膜对 p 分量和 s 分量表现出不同的有效折射率,并使膜系显示出很强的偏振效应.人们利用这种性质可以制成偏振分束器等光学偏振器件.但是在很多情况下,需要用到消偏振效应平板分光镜、消偏振效应分光棱镜等消偏振效应的器件.这时,由器件自身引入的这种偏振效应必须消除或尽可能减小.为了解决这个问题,Costich利用有空气界面的金属—介质多层膜减少偏振效应^[1],Mahl-ein仅利用2种材料组成的周期膜进行消偏振^[2],多位学者利用3种材料组成的周期膜进行消偏振^[3-5],其中Thelen的 $\lambda/4$ 膜系和Gilo利用布儒斯特条件消偏振的设计思想得到了广泛关注.反射率很低且

不可调节,设计要求膜层材料的折射率远远超出实际使用材料的折射率、膜系的消偏振性能对膜层的折射率变化十分敏感和膜系数层数较多等诸多缺陷并未得到解决.2005年,齐红基^[6]利用双折射薄膜实现了消偏振滤波器的设计,但其制作难度较大.近几年来,国内学者利用金属—介质膜解决这个问题,取得了一定的效果^[7-8].

该文以Gilo的工作为基础,提出了新的膜系设计方案以得到相等的 p 分量和 s 分量的反射率(或透射率),给出了宽带和窄带消偏振膜系的结构,并对膜系的特性进行了分析.

1 膜系的偏振效应

对于 p 分量和 s 分量,光线斜入射时的有效折射率分别为

$$n_p = n / \cos \theta, \quad (1)$$

$$n_s = n \cos \theta. \quad (2)$$

收稿日期:2007-06-05.

作者简介:史金辉(1979-),男,讲师,博士研究生;

王政平(1949-),男,教授,博士生导师,E-mail:zpwang@hrbeu.edu.cn.

式中: n 是膜层折射率, θ 是膜层中的折射角.

偏振分离 $\Delta n^{[1]}$ 的定义为

$$\Delta n = \frac{n_p}{n_s} = \frac{n/\cos \theta}{n \cos \theta} = \frac{1}{\cos^2 \theta}. \quad (3)$$

式中: n_0 是入射介质的折射率, θ_0 是光在入射介质中的入射角. 由式(3)可以得知: 当光倾斜入射时, 用一单层膜不可能实现消偏振 (Δn 是恒大于1的量). p 分量和 s 分量的有效折射率与膜介质折射率的关系如图1所示.

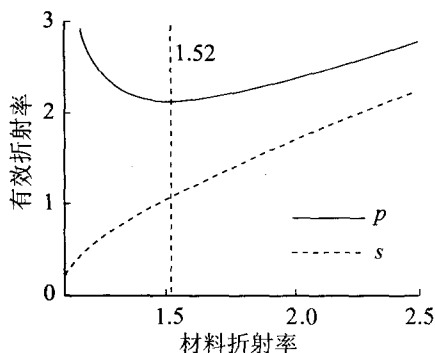


图1 当 $\theta_0 = 45^\circ$, $n_0 = 1.52$ 时的有效折射率

Fig. 1 Effective indices for $\theta_0 = 45^\circ$ and $n_0 = 1.52$

由图1中可以看出 n_s 曲线是单调增加的, 而 n_p 存在一个最小值. 对式(1)求导并令导数为零, 可知 n_p 的最小值存在于满足下述条件之处:

$$n = \sqrt{2} n_0 \sin \theta_0. \quad (4)$$

由式(4)可知, p 分量的有效折射率的最小值取决于 n_0 和 θ_0 . 一般情况, θ_0 可先确定, 而 n_0 则根据需要进行选定. 假定用 n_H 和 n_L 来表示2种膜材料的折射率, 则下面的等式成立:

$$n_H / \cos \theta_H = n_L / \cos \theta_L. \quad (5)$$

式中: θ_H 和 θ_L 分别表示相应材料中的折射角. 结合 Snell 公式, 得出

$$\sin^2 \theta_H = \frac{n_L^2}{n_H^2 + n_L^2}. \quad (6)$$

式(6)可以转化为布儒斯特条件:

$$\tan^2 \theta_H = \frac{n_L^2}{n_H^2}. \quad (7)$$

如果这2种材料被用在 $\lambda_0/4$ 膜系的设计上, 由于它们的 p 分量有效折射率 n_p 相同, 它们将对 p 分量的反射率没有影响, 只影响 s 分量的反射率.

2 消偏振膜系设计

设计要求: 基底为冕牌 K9 玻璃; 入射角为 $\theta_0 = 45^\circ$; 在 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 处, 要求得到 s 分量和 p 分量的反射率和透射率接近相等, 偏振分离小于5%. 选用3种常用材料, 分别为硫化锌、氧化铝、氟化镁, 材料在 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 处的折射率分别为 $n_H = 2.35$, $n_M =$

1.62 和 $n_L = 1.38^{[9]}$, 在不考虑材料吸收的情况下反射率与透射率之和为1, 文中只给出膜系的反射率曲线. 当整个膜层的分布具有周期性时, 改变周期数便可实现不同分光比的消偏振设计.

2.1 50% 反射的消偏振设计

2.1.1 宽带消偏振设计

膜系的结构为

$$n_{\text{sub}} / (1.124H, 1.334M, 1.588L, 1.334M)^4 / n_{\text{sub}}. \quad (8)$$

氧化铝均匀分布在硫化锌和氟化镁之间, 达到宽带消偏振的效果. p 分量、 s 分量的反射率曲线如图2所示, 在 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 处, p 分量、 s 分量的反射率分别为48.4%和46.7%, 偏振分离小于5%, 消偏振带达20 nm, 此膜系结构比 Gilo 的设计简单.

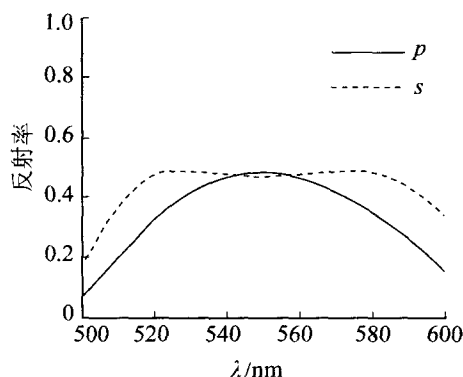


图2 宽带50%反射率曲线

Fig. 2 50% reflectance of the layers of wide band design

2.1.2 窄带消偏振设计

膜系的结构为

$$n_{\text{sub}} / (1.124H, 1.334M)^4, (1.588L, 1.334M)^4 / n_{\text{sub}}. \quad (9)$$

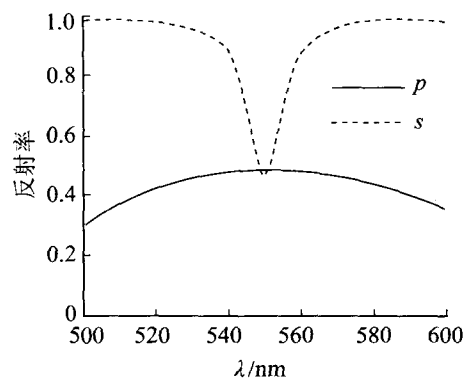


图3 窄带50%反射率曲线

Fig. 3 50% reflectance of the layers of narrow band design

氧化铝分别与硫化锌和氟化镁组合构成基本周期, 形如法布里—珀罗结构, 中间的M层充当了间隔层, 达到窄带消偏振的效果. p 分量、 s 分量的反射率曲线如图3所示, 在 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 处, p 分量、 s 分

量的反射率依然分别为48.4%和46.7%,偏振分离小于5%,可见膜层的重新分布只影响 λ_0 以外波长处的反射率。

2.2 30%和70%反射的消偏振设计

膜系的结构为

$$n_{\text{sub}}/(1.124\text{H},1.334\text{M},1.588\text{L},1.334\text{M})^3/n_{\text{sub}} \tag{10}$$

p 分量、 s 分量的反射率曲线如图4,在 $\lambda_0=550\text{ nm}$ 处, p 分量、 s 分量的反射率分别为32.2%和30.8%,偏振分离小于5%,可见当把总周期降为3时,2个偏振态的反射率同时降到30%,造成这种一致性的原因就在于氧化铝、氟化镁2者 p 分量的有效折射率相等.这种变化就像在实现高反射率膜时,可以通过膜层的周期数调节其反射率。

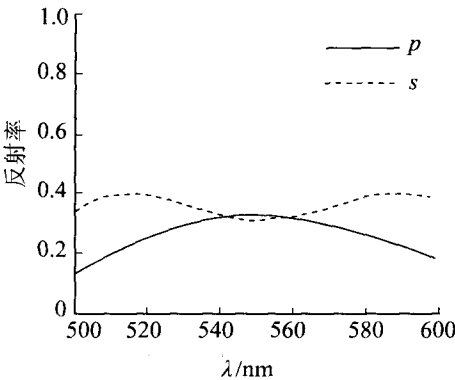


图4 30%反射率曲线
Fig. 4 30% reflectance of the layers

当膜系的结构变化为

$$n_{\text{sub}}/(1.124\text{H},1.334\text{M},1.588\text{L},1.334\text{M})^5/n_{\text{sub}} \tag{11}$$

p 分量、 s 分量反射率分别为73.7%和72.0%,如图5所示,图4、5说明改变膜层的周期起到调节 λ_0 处的反射率的作用.当膜层总周期不变时,高、低膜层的重新分布同样会影响 λ_0 以外波长处的反射率,从而影响消偏振的带宽,这里不再赘述。

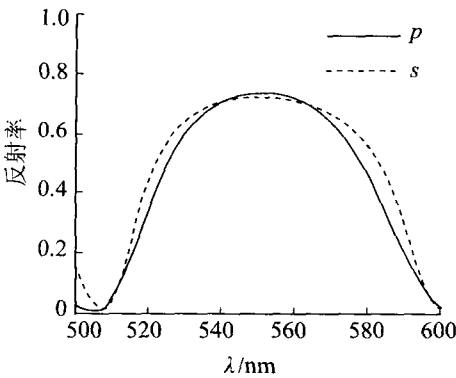


图5 70%反射率曲线
Fig. 5 70% reflectance of the layers

3 消偏振膜系的特性分析

3.1 入射角的影响

规定入射角为 45° ,但在实际应用中入射角一定会有所偏差.选取入射角为 43° 对50%反射的膜系结构式(8)进行分析,并与原始设计进行对比.2种情况的反射率曲线如图6所示.当入射角为 43° 时,膜系消偏振的位置偏移到566 nm处, p 分量、 s 分量的反射率分别为46.5%和48.5%,产生消偏振位置偏移的原因是膜层相位厚度的改变,而反射率的改变主要来源于膜材料有效折射率的变化.当入射角偏离 2° 时,对反射率造成的影响较小,两者的偏振分离仍小于5%,可以满足实际需要。

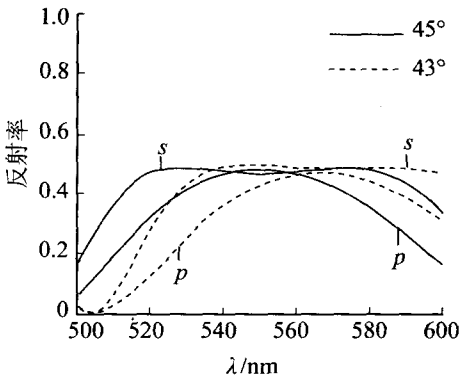


图6 不同入射角时反射率曲线
Fig. 6 Reflectance of layers at different angle of incidence

3.2 膜厚的影响

在膜系的镀制过程中,膜层的厚度一定会存在着误差.膜层的厚度直接影响着相位厚度,就会导致消偏振位置发生偏移,但对反射率影响较小.3种材料的膜层厚度对消偏振膜系性能应具有一致性,选取高折射率的硫化锌膜层进行分析.随机误差的分析较为繁琐,为了简化分析,假定膜系在镀制过程中的每层厚度误差均为10%,其分析曲线如图7所示,消偏振位置分别偏移至562 nm和538 nm处, p 分量和 s 分量的反射率之间的反射率偏差小于5%。

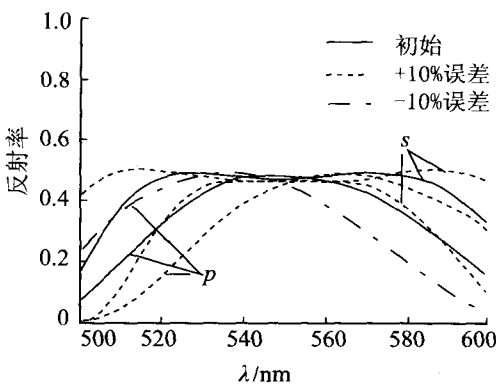


图7 不同H层厚度时膜层的反射率曲线
Fig. 7 Reflectance of layers with different H-layer thickness

3.3 双折射消偏振膜的分析

文献[10]利用薄膜双折射特性补偿倾斜入射条件下不同偏振分量等效导纳的变化,实现了倾斜入射条件下单波长消偏振分束薄膜.入射介质为空气,基底折射率为1.52,入射角 $\theta_0 = 45^\circ$ 参考波长 $\lambda_0 = 1\ 200\text{ nm}$,膜结构为 $1.52/(\text{HL})^{15}\text{H}/1.0$,其中,H层对 p 分量和 s 分量的折射率为 $n_{pH} = 1.585$ 、 $n_{sH} = 1.553$,L层对 p 分量的折射率为 $n_{pL} = 1.479$ 、 $n_{sL} = 1.510$,角度和折射率的影响见图6、7:入射角的偏离造成了 p 分量、 s 分量反射率的背向分离, 2° 的偏差导致了4%的偏振分离;H层的 s 分量折射率偏差0.01时,相应的 s 分量的反射率偏离10%.膜层优先考虑 s 分量反射率是造成较大分离的原因.实际的成膜过程中折射率一般会出现较大的偏差,且双折射膜的镀制难度较大,只有克服这些困难,双折射才能够起到较好的消偏振效果.

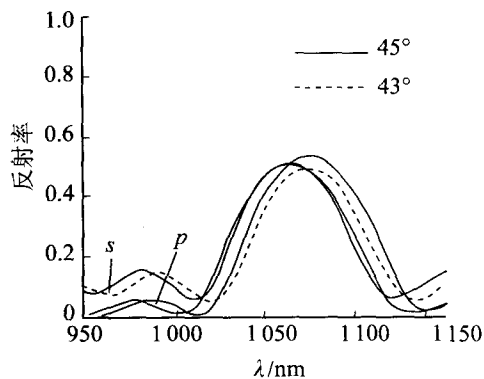


图8 不同入射角时双折射膜的反射率曲线

Fig.8 Reflectance of birefringent films at different angles of incidence

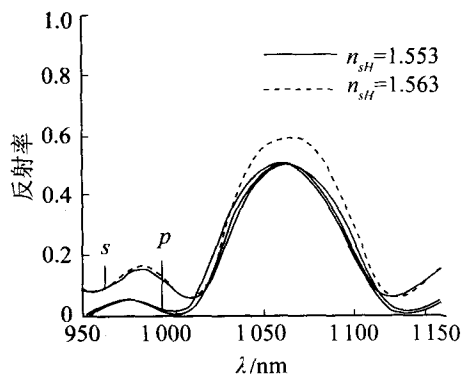


图9 不同 n_{sH} 时双折射膜的反射率曲线

Fig.9 Reflectance of birefringent films with different n_{sH}

4 结束语

该文详细介绍了布儒斯特条件在消偏振分光棱

镜中的应用,对于冕牌K9玻璃提出了一种新的16层膜系结构,比已见报道的结构都简单,在550 nm处 p 分量和 s 分量的反射率接近50%,满足设计要求.调节膜层周期可实现不同分光比的消偏振膜系,分析了入射角、膜层厚度对消偏振特性的影响,为消偏振分光镜的设计提供了有价值的理论依据.此外,该文对双折射消偏振薄膜的特性进行了分析,提供了角度等影响的定性分析.基于以上的分析,合理地设计膜系结构加之良好的镀制工艺便可实现性能优良的消偏振分光棱镜,其必将在光通信技术、光干涉技术等领域得到广泛的应用.解决消偏振分光棱镜的角度敏感性和相位问题将是今后研究的重点.

参考文献:

- [1] COSTICH C R. Reduction of polarization effects in interference coatings [J]. Appl Opt, 1970, 9:866-870.
- [2] MAHLEIN H F. Non-polarizing beam splitters [J]. Optica Acta, 1974, 21(7):577-583.
- [3] THELEN A. Non-polarizing interference films inside a glass cube [J]. Appl Opt, 1976, 15(12):2983-2985.
- [4] De STERKE C M. Non-polarizing beam splitter design [J]. Appl Opt, 1983, 22(4):595-601.
- [5] GILO M. Design of a non-polarizing beam splitter inside a glass cube [J]. Appl Opt, 1992, 31(25):5435-5439.
- [6] QI H J, HONG R J. Nonpolarizing and polarizing filter design [J]. Appl Opt, 2005, 44(12):2343-2348.
- [7] 李明宇, 顾培夫. 宽波长宽角度消偏振分光镜设计[J]. 激光与红外, 2002, 32:297-299.
- LI Mingyu, GU Peifu. Design of broadband and wide-angle non-polarization beam splitter[J]. Laser & Infrared, 2002, 32:297-299.
- [8] 李明宇, 顾培夫. 近紫外区宽角度消偏振平板分光镜[J]. 光子学报, 2003, 32(10):1231-1233.
- LI Mingyu, GU Peifu. Design of near ultraviolet band and wide-angle non-polarization beam-splitting plate [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10):1231-1233.
- [9] 麦克劳德 H A. 光学薄膜技术[M]. 周九环, 尹树百, 译. 北京:国防工业出版社, 1974:455.
- [10] 齐红基, 洪瑞金. 双折射消偏振薄膜设计[J]. 中国科学 E 辑:工程科学与材料科学, 2005, 35(1):9-16.
- QI Hongji, HONG Ruijin. Birefringent nonpolarizing thin films design [J]. Science in China Ser E Engineering & Materials Science, 2005, 35(1):9-16.

[责任编辑:王亚秋]