

可见光波段金属-介质膜消偏振分光镜的理论设计

史金辉 朱 正 王政平 关春颖

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种金属-介质膜消偏振分光镜设计,采用针(needle)方法对该设计进行了优化处理,给出了消偏振分光镜的反射率与反射相移的计算机仿真结果,并分析了入射角对此消偏振分光镜性能的影响。消偏振分光镜在振幅和反射相位两个方面都达到了预期的目标,而未考虑透射相位。在 540~560 nm 的范围内,45°入射光线的 2 个偏振分量的反射率与目标反射率 50% 的偏差小于 0.22%,反射相移小于 0.29°。当入射角偏离 1°时,其对 2 个分量的反射率影响较小,而对反射相移影响稍大。

关键词 薄膜;偏振效应;消偏振;反射率;反射相移;分光镜

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100303

Theoretical Design of a Novel Metal-Dielectric Non-Polarizing Beam Splitter in the Visible Range

Shi Jinhui Zhu Zheng Wang Zhengping Guan Chunying

(School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A design of metal-dielectric non-polarizing beam splitter in a cube is proposed, using the needle optimization. The digital simulations of the splitter's reflectance and reflection-induced retardance are presented. The effects of incident angle on the splitter's performance are analyzed. Both amplitude and reflection-induced retardance of the splitter meet the requirement ignoring the phase of transmitted light. The differences between both components and the reflectance target which is 50% are less than 0.22%. The reflection-induced retardance is less than 0.29° in the range of 540~560 nm with the incident angle of 45°. When the incident angle deviates with the error of 1°, the reflectance of both components is influenced slightly and the reflection-induced retardance strongly depends on the incident angle.

Key words thin films; polarization effects; non-polarizing; reflectance; reflection-induced retardance; beam splitter

OCIS codes 260.5430; 310.0310; 230.1360

1 引 言

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的,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,需要用到消偏振的平板分光镜和消偏振的分光棱镜等器件。这时,由器件自身引入的这种偏振效应必须予以消除或尽可

能减小。为了解决这个问题,1970年,Costich^[1]运用等效折射率的概念设计了消偏振膜系,提出了一种适用于有空气界面的金属-介质膜的、减少多层膜偏振效应的方法。此方法因为反射率很低且不可调节而实用价值不大。1974年,Mahlein^[2]提出用两层膜构成基本周期来设计消偏振膜系。这种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,因此很难在实际工作中采用。1976年,Thelen^[3]发展了“仅用 $\lambda/4$ 波堆”在玻璃基底上获得

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-10-23

基金项目: 哈尔滨工程大学基础科研业务费专项基金(HEUCF20101113)资助课题。

作者简介: 史金辉(1979—),男,博士,副教授,主要从事薄膜光学及超材料等方面的研究。

E-mail: shijinhui@hrbeu.edu.cn

消偏振薄膜的方法。用该法制备的膜系的消偏振性能对膜层的折射率变化十分敏感,加之膜系数层数较多,所以因膜系制备困难而少被采用。1983年,De Sterke等^[4]在Thelen研究的基础上,采用三种材料实现消偏振效应膜系,其偏振分离小于5%的区域近100 nm。1992年,Gilo^[5]提出应用布儒斯特条件采用三种不同折射率的材料来实现消偏振膜系的设计。近几年来,国内学者对消偏振的问题开展了深入研究,利用受抑全反射、双折射、等效层等多种方法来实现消偏振光学器件^[6~18],此外利用金属-介质膜同样取得了良好的效果^[15,16,19,20]。迄今为止,对能够在振幅和相位2个参量都达到消偏振效果的消偏振分光棱镜的报道不多^[15~17],消偏振分光镜(NPBS)反射相移的问题一直被忽视,而相位特性在偏振干涉测量等光学系统中是非常重要的。

本文将利用金属银设计出振幅和反射相位都满足消偏振要求的分光棱镜,在不考虑透射相移的情况下得到了高性能的分束器。

2 理论分析

对于p分量和s分量,光线斜入射时的有效折射率分别为

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

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

式中 n 是膜层折射率, θ 是膜层中的折射角。

偏振分离 Δn 的定义为

$$\Delta n = \frac{n_p}{n_s} = \frac{1}{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n^2}}, \quad (3)$$

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(3)式可知当光倾斜入射时,用一单层膜不可能实现消偏振(Δn 是恒大于1的量)。

反射相移可由下式算得^[21]:

$$\Delta_r = \arg(r_p/r_s), \quad (4)$$

式中 r_p 是p分量的菲涅耳反射系数, r_s 是s分量的菲涅耳反射系数。反射相移可由实验测得^[22],其大小可描述反射光偏振态的改变程度。光波在介质中传播时是横波,但光波在金属中传播就不再是纯横波,它还有一部分是纵波,因此偏振效应较小^[19]。加之金属膜中性好,所以介质-金属-介质消偏振膜系有优良的特性。金属膜p分量反射率的最小值可近似表示为

$$R_{pmin} = \left[\frac{k/n}{1 + \sqrt{1 + (k/n)^2}} \right]^2. \quad (5)$$

式中 k 为金属的消光系数,由(5)式可见,提高金属膜的光学常数的比值 k/n ,则 R_{pmin} 增大,于是偏振效应减小。在可见光区,银有最高的 k/n 值、最小的偏振效应和较好的光谱中性,因此银膜在可见光区是良好的消偏振金属膜层。虽然银膜的附着力差,机械强度和化学稳定性也不好,但是可以在胶合棱镜中得到较好的应用^[23]。

3 金属-介质膜消偏振分光镜设计

消偏振分光镜结构如图1所示,其中 A , T 和 R 分别为吸收率,透射率和反射率。s分量和p分量的吸收损耗均小于5%。选取可见光区折射率为2.35的ZnS材料作为Ag膜的匹配层,参考波长 $\lambda_0 = 550$ nm,设计中采用的基底材料为K9玻璃。所用材料的折射率如表1所示,由于ZnS, MgF₂在可见光区色散较小,此处忽略不计。

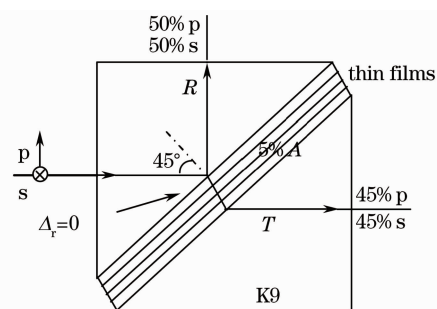


图1 理想金属-介质膜消偏振分光镜结构图
Fig. 1 Schematic of ideal metal-dielectric NPBS

表1 光学材料的折射率

Table 1 Refractive index of optical materials

Wavelength /nm		500	550	600
Ag	n	0.050	0.055	0.060
	k	2.87	3.32	3.75
ZnS	n	2.35	2.35	2.35
MgF ₂	n	1.38	1.38	1.38

在银膜两侧加上ZnS膜后(入射角为45°)其s分量和p分量的最大分离约为7%。金属-介质消偏振膜虽能够达到振幅消偏振的效果,膜系的反射相移却很大,且二者对波长都较为敏感。为了得到理想的消偏振特性,利用针(needle)法对上述膜系进行优化^[24]。MgF₂薄膜被用作加入层,在540~560 nm的波长范围内对膜系进行优化,目标为

$$\begin{aligned} |R_p - R_s| &< 1\% \\ |R_p - 50\%| &< 1\% \\ |R_s - 50\%| &< 1\% \\ |\Delta_r| &< 3^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

所得膜系共有 10 层,总物理厚度为 1299 nm,有关参量如表 2 所示(表中 Thickness 代表膜层的物理厚度)。对所设计的膜系进行计算机仿真研究,s 分量和 p 分量的反射率曲线和反射相移如图 2,3 所示:在 550 nm 处 s 分量和 p 分量的反射率接近完全相等,消偏振效果较为理想,且在 542,554 和 571 nm 三波长处的反射相移极小,接近于零。

表 2 光学膜系的参量

Table 2 Parameters of optical thin films

Layer number	1	2	3	4	5
Material	MgF ₂	ZnS	MgF ₂	ZnS	MgF ₂
Thickness /nm	87.01	129.98	525.00	51.69	136.97
Layer number	6	7	8	9	10
Material	ZnS	Ag	ZnS	MgF ₂	ZnS
Thickness /nm	49.92	33.47	31.71	149.80	103.41

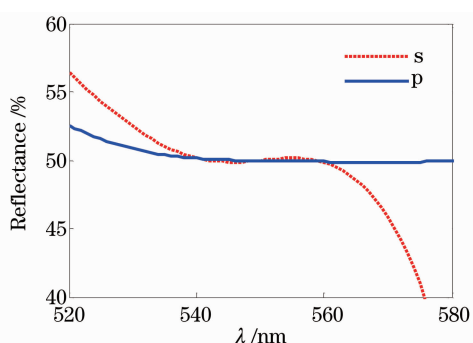


图 2 优化后金属-介质膜消偏振分光镜的反射率图

Fig. 2 Reflectance of optimized NPBS composed of metal-dielectric thin films

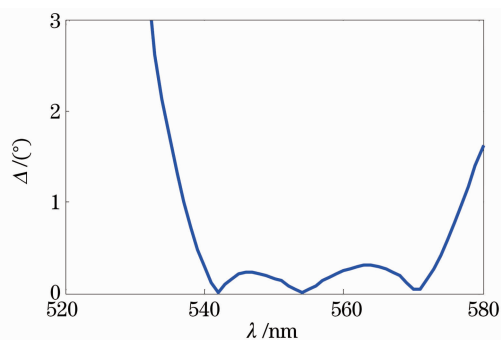


图 3 优化后金属-介质膜消偏振分光镜的反射相移

Fig. 3 Reflection-induced retardance of optimized NPBS composed of metal-dielectric thin films

分析整个波长范围,从图 2,3 提取部分优化数据如表 3 所示。从表 3 可知此消偏振分光镜完全满足(6)式所要求的目标,消偏振带宽 20 nm,在振幅和相位 2 个方面都达到了消偏振的效果。

图 4,5 分别给出了入射角变化对消偏振分光镜的反射率和反射相移的影响。当入射角变化 $\pm 1^\circ$ 时,s 和 p 2 个分量反射率仅产生了 2.8% 的变化,

反射相移产生小于 5° 的变化,因此对于反射相移要求严格的光学系统需要精细地调整入射角。当银膜厚度产生 5% 误差时,s 和 p 2 个分量将产生约 5% 的分离(这里未提供仿真结果)。在优化区间 540~560 nm 内,s 分量和 p 分量的透射率均在 45% 以上,二者之间最大偏差小于 1.6%。为了更好地评价该膜系性能,计算了其吸收率,s 和 p 2 个分量的吸收率均小于 5%,如图 6 所示。

表 3 优化数据

Table 3 Optimization data

Target	$ R_p - R_s / \%$	$ R_p - R_s / \%$	$ R_p - R_s / \%$	$\Delta_r / (^\circ)$
	Max	Max	Max	Max
R:T=50:50	0.13	0.17	0.22	0.29

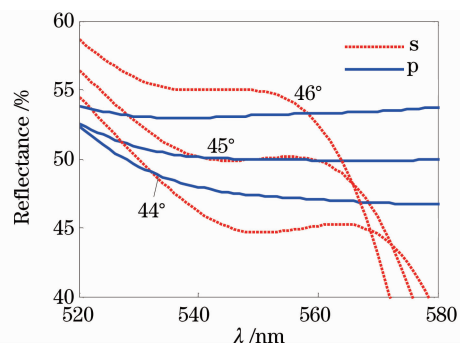


图 4 不同入射角金属-介质膜消偏振分光镜的反射率

Fig. 4 Reflectance of optimized NPBS at different incident angles

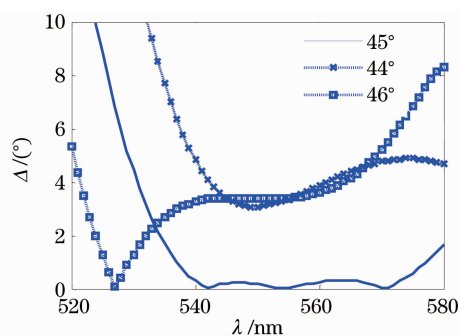


图 5 不同入射角金属-介质膜消偏振分光镜反射相移

Fig. 5 Reflection-induced retardance of optimized NPBS at different incident angles

4 结 论

提出了一种采用金属-介质膜结构的消偏振分光镜设计,并利用 needle 法对其进行了优化,使其在振幅和相位两个方面都可达到消偏振要求。结果表明,其消偏振带宽达 20 nm,s 和 p 分量的反射率与目标反射率 50% 的偏差均小于 0.22%,反射相移小于 0.29° 。入射角偏差 1° 时,反射率所受影响不大,但反

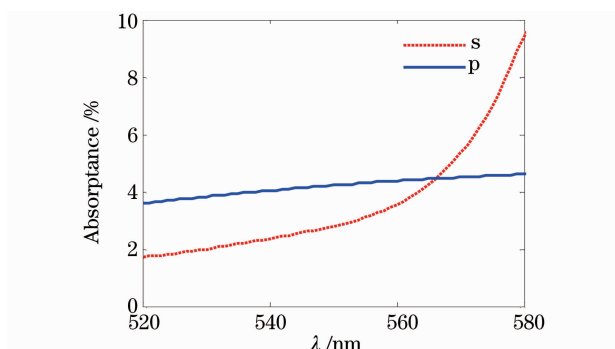


图 6 45°入射角时金属-介质膜消偏振分光镜的吸收
Fig. 6 Absorbance of optimized NPBS at the incident angle of 45°

射相移对入射角较为敏感。对于现有的光学薄膜沉积技术,此设计可以较容易地实现,为获得 1:1 分光和接近零反射相移消偏振器件提供了参考。

参 考 文 献

- V. R. Costich. Reduction of polarization effects in interference coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 866~870
- H. F. Mahlein. Non-polarizing beam splitters[J]. *Optica acta.*, 1974, **21**(7): 577~583
- A. Thelen. Non-polarizing interference films inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
- C. M. De Sterke, C. J. Van Der Lann, H. J. Frankena. Non-polarizing beam splitter design[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(4): 595~601
- M. Gilo. Design of a non-polarizing beam splitter inside a glass cube[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25): 5435~5439
- Qi Hongji, Hong Ruijin, Yi Kui *et al.*. Nonpolarizing and polarizing filter design [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2343~2348
- Qi Hongji, Hong Ruijin, He Hongbo *et al.*. Birefringent nonpolarizing thin films design [J]. *Science in China Ser. E Engineering & Materials Science*, 2005, **35**(1): 9~16
齐红基, 洪瑞金, 贺洪波 等. 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
- Chen Weibin, Gu Peifu. Design of nonpolarizing thin film edge filters used for color-separation and color-recombination in projection display system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 869~872
陈卫斌, 顾培夫. 用于投影显示的分色合色膜系的消偏振设计 [J]. 光子学报, 2005, **34**(6): 869~872
- Chen Weibin, Gu Peifu. Design of non-polarizing color splitting filters used for projection display system [J]. *Displays*, 2005, **26**(2): 65~70
- X. K. Xu, J. D. Shao, Z. X. Fan. Nonpolarizing beam splitter designed by frustrated total internal reflection inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4297~4302
- 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
- Liao Yanlin, Han Zhengfu, Cao Zhuoliang. Design of form-birefringent multilayer nonpolarizing beam splitter [J]. *Optics Communications*, 2007, **271**(2): 569~572
- J. H. Shi, Z. P. Wang. Theoretical analysis of two nonpolarizing beam splitters in asymmetrical glass cubes [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): C275~C278
- Liao Yanlin, Cao Zhuoliang. Design of a nonpolarizing beam splitter based on the form birefringence of a subwavelength grating inside a glass cube [J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, **55**(9): 1473~1477
- J. H. Shi, Z. P. Wang. Designs of infrared nonpolarizing beam splitters with a Ag layer in a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(14): 2619~2622
- J. H. Shi, C. Y. Guan, Z. P. Wang. Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(18): 3385~3390
- M. Tilsch, K. Hendrix. Triple bandpass filter and nonpolarizing beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **47**(13): C55~C69
- X. Y. Fu, K. Yi, J. D. Shao *et al.*. Nonpolarizing guided-mode resonance filter [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 124~126
- Li Mingyu, Gu Peifu. Design of broadband and wide-angle non-polarization beam splitter [J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(5): 297~299
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**(5): 297~299
- 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
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
- Spiller E. Totally reflecting thin-film phase retarders [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20): 3544~3549
- Li Qingbo, Wang Zhengping, Sun Weimin *et al.*. Novel method for measuring reflection-induced retardance employing polarizers and its theoretical analysis [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2002, **23**(3): 59~62
李庆波, 王政平, 孙伟民 等. 用偏振片测量反射相移的方法及其理论分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, **23**(3): 59~62
- Lin Yongchang, Sun X. M.. Design of non-polarizing prism beam splitter [C]. *Optical Interference Coatings in OSA Technical Digest Series*, 1988, **6**: 381~384
- A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, G. W. Debell. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5493~5508