

文章编号:1002-2082(2008)04-0537-05

三波长宽角度消偏振平板分光膜的设计

王文梁^{1,2}, 熊胜明², 张云洞²

(1.南昌大学 物理系,江西 南昌 330031; 2.中国科学院 光电技术研究所,四川 成都 610209)

摘要: 分光膜都是倾斜使用的,不可避免地存在S和P 2个偏振分量的分离。在许多实际应用中,这是一个迫切需要解决的棘手难题。基于Thelen和Costich理论,选择初始膜系材料和结构,并在Needle合成法与Conjugate graduate精炼法的帮助下,采用全介质材料设计了532 nm, 633 nm和1 315 nm三波长宽角度消偏振平板型分光膜,空气中入射角的变化范围为 $45^\circ \pm 5^\circ$ 。结果表明:在宽角度范围内,此膜系在 (532 ± 10) nm, (633 ± 10) nm和 $(1\ 315 \pm 10)$ nm范围的偏振分离都能比较好地满足消偏振要求。

关键词: 全介质材料;宽角度;消偏振;平板型分光膜

中图分类号: TN204; O484

文献标志码: A

Design of wide-angle depolarization flat-plate light-splitting film for three wavelengths

WANG Wen-liang^{1,2}, XIONG Sheng-ming², ZHANG Yun-dong²

(1. Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Institute of Optics and Electronics, CAS, Chengdu 610209, China)

Abstract: Since the light-splitting film is always tilted, the separation between s- and p-component is inevitable. The separation has become a difficult problem to be solved in many applications. The material and structure of original film system were selected according to Costich and Thelen theories. A wide-angle depolarization flat-plate light-splitting film for three wavelengths (532 nm, 633 nm and 1 315 nm) was designed with all-dielectric materials by Needle synthesis method and Conjugate graduate refine method. The variation range of the incident angle in the air is $45^\circ \pm 5^\circ$. The design and analysis results show that the polarization separation of the film system in the spectral range of (532 ± 10) nm, (633 ± 10) nm and $(1\ 315 \pm 10)$ nm can meet the requirement of the depolarization in the wide-angle range.

Key words: all-dielectric material; wide angle; depolarization; flat-plate light-splitting film

引言

薄膜倾斜使用时,由于要求电场和磁场在薄膜每个界面上的切向分量连续,使S和P偏振分量的有效折射率表现不同,不可避免地产生偏振分离。人们可以利用这个现象来设计偏振分光膜^[1],但在许多实际应用中,必须消除这种偏振分离,用于光线倾斜入射的分光膜就属这种情况。

消偏振分光膜的设计与制造需要解决材料固有的偏振分离基本属性,这一直是一个非常棘手的问题。理想的消偏振分光膜,应该在一个较大的波长范围内,使S偏振光和P偏振光具有相同的反射率和透射率特性,要使入射角具有一个合理的范围,而且要没有吸收。金属材料相对于全介质材料,具有比较小的偏振效应。因此,采用包括金属层的

收稿日期:2007-05-21; 修回日期:2007-09-27

作者简介:王文梁(1978—),男,浙江桐庐人,博士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究工作。E-mail:w.l.wang@163.com

多层膜设计能在较大的波长范围内使S偏振光和P偏振光具有近似相同的特性^[2-5],但金属材料的强烈吸收在激光系统中是一个问题。

为解决薄膜的消偏振问题,曾经有过大量的研究工作。Baumeister^[6]和Costich^[7]是比较早考虑消偏振理论的,但在工作波长范围内,在实际的折射率材料范围内,他们并不能得到期望的解。1976年,Thelen^[8]的理论显示了采用3种或4种材料的组合,有可能得到满足要求的解。然而,他论文中提出的消偏振分光膜的工作波长范围是非常有限的。接下来,有很多致力于采用全介质材料来设计消偏振分光膜的报导^[8-20]。近些年,也有很多采用数值方法的优化设计,取得了一些不错的结果^[18-21]。

以上的设计大部分都是理论性的结果,并且工作波长和入射角的范围都非常有限。本论文在Needle合成法与Conjugate graduate精炼法的帮助下,设计并分析了532 nm,633 nm和1 315 nm三波长宽角度消偏振平板型分光膜,空气中入射角

的变化范围为 $45^\circ \pm 5^\circ$ 。初始膜系材料和结构的选择是基于Thelen和Costich的理论做出的。

1 设计

本文设计的消偏振分光膜,要求在入射角 $45^\circ \pm 5^\circ$ 的范围,S偏振光和P偏振光在532 nm,633 nm和1 315 nm 3个波长位置附近具有相同的反射率特性,且分光比为 $R:T=50:50$ 。工作波长范围的跨度非常大,材料的色散显然会对光谱特性有非常明显的影响,我们在设计中考虑了这一因素。

对于工作波长范围跨度较大的消偏振分光膜的设计,往往采用优化设计的数值方法。本文对从可见光到红外范围的3个波长及附近位置消偏振的设计,是在Needle合成法与Conjugate graduate精炼法的帮助下得到的。由于采用全介质设计,且入射介质是空气,基板是玻璃,整个膜系的吸收是可以忽略的。所以,可采用如下评价函数:

$$MF = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left[\frac{(R_{i,j,s}^D - R_{i,j,s}^M)^2}{\sigma_{i,j,s}^2} + \frac{(R_{i,j,p}^D - R_{i,j,p}^M)^2}{\sigma_{i,j,p}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: M 和 N 分别是波长和角度所考虑的格点数目; $R_{i,j,s}^D$ 和 $R_{i,j,p}^D$ 是S和P偏振光反射率的计算值; $R_{i,j,s}^M$ 和 $R_{i,j,p}^M$ 是S和P偏振光反射率的设计目标值; $\sigma_{i,j,s}$ 和 $\sigma_{i,j,p}$ 是容许的反射率偏差。

对于优化设计,膜系初始结构的选择往往是取得成功的关键。我们考虑 $1/4$ 波长的膜堆HMLM。根据Thelen^[8]理论,当3种材料组合的偏振分离满足 $\Delta_H \Delta_L = \Delta_M^2$ 时,这个多层膜堆将在参考波长位置没有偏振分离。在我们的设计中,入射介质是空气,入射角选择 45° ,参考波长选择为1 000 nm,此时发现 MgF_2 (1.376@1 000 nm), Al_2O_3 (1.633 7@1 000 nm)和 TiO_2 (2.371@1 000 nm)是比较好的组合。因为 $\Delta_L=1.358 8$, $\Delta_M=1.230 5$ 和 $\Delta_H=1.097 6$,则

$$\frac{\Delta_H \Delta_L}{\Delta_M^2} = \frac{1.358 8 \times 1.097 6}{1.230 5^2} = 0.985 0$$

另外,根据Costich^[7]理论,在基片上加镀一层 $1/4$ 波长厚度、折射率 n_1 满足 $\Delta n_1 = (\Delta n_g)^{\frac{1}{2}}$ 的膜层,此时可对基板消偏振。我们的设计中,基板是Glass(1.507 53@1 000 nm),则 $\Delta n_g=1.282 1$, $(\Delta n_g)^{\frac{1}{2}}=1.132 3$ 。我们可以选择 TiO_2 作为基板的消偏振

匹配层。根据相同的原理,我们选择 MgF_2 作为空气的消偏振匹配层。

2 结果和分析

2.1 结果

根据以上分析,为保证初始结构的偏振分离比较小,而且使优化设计有比较多的可调参量,可选择L(HMLM)⁵H作为优化设计的初始膜堆。宽角度三波长消偏振分光膜的设计目标为在 (532 ± 10) nm, (633 ± 10) nm和 $(1 315 \pm 10)$ nm处,使分光比 $R:T=50:50$,入射角 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。设计结果如图1所示。

图1显示了我们设计的三波长宽角度消偏振平板型分光膜在 45° 入射时的反射率曲线。表1所示的是图1所示的三波长宽角度消偏振平板型分光膜的具体结构。其中,H,M和L分别对应 TiO_2 , Al_2O_3 和 MgF_2 材料在正入射时的一个 $1/4$ 波长厚度。 (532 ± 10) nm, (633 ± 10) nm和 $(1 315 \pm 10)$ nm 3个区域在不同入射角的反射率曲线分别如图2、图3和图4所示。

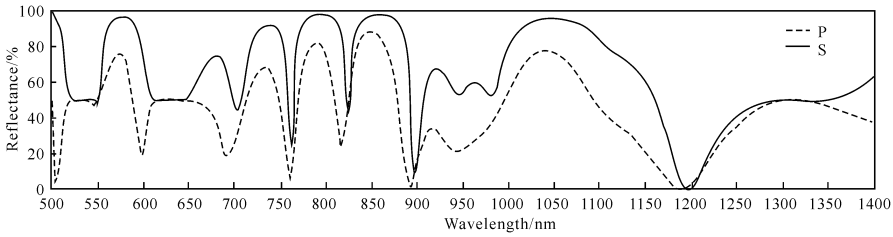


图1 45°角入射时宽角度三波长消偏振分光膜的完整反射率曲线

Fig. 1 Reflectance curves of wide-angle three-wavelength depolarization light-splitting film when incident angle is 45°

表1 图1所示三波长消偏振分光膜的λ/4厚度(H:TiO₂; M:Al₂O₃; L:MgF₂)

Table 1 Quarter-wave thickness of three-wave depolarization light-splitting film (H:TiO₂; M:Al₂O₃; L:MgF₂)

Air	1.960 6M	0.885 6H	0.714 4M	2.131 6H	1.607 3M	0.780 3H	0.675 3M	0.505 2H
	0.323 8L	0.649 3H	0.210 0L	0.361 7H	0.361 7L	0.926 0H	0.1436L	0.366 1H
	0.478 4L	0.466 1H	1.839 5M	0.1601L	1.283 1H	0.840 7M	0.217 9L	0.385 9M
	1.336 5H	0.357 6L	1.125 9M	0.948 3L	1.185 1H	1.174 7M	0.949 8L	0.457 1M
	1.991 1H	0.134 5L	0.229 8H	0.576 0L	0.647 7M	2.327 1H	0.297 6M	0.141 2H Glass

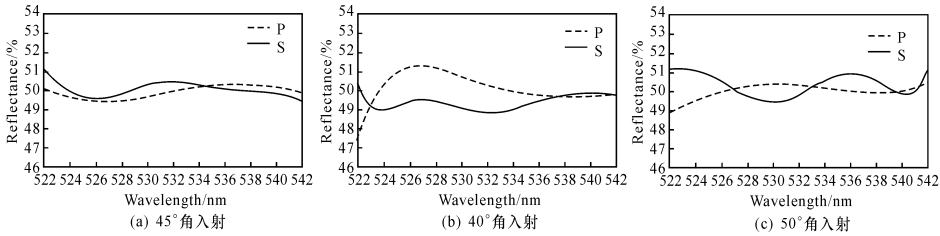


图2 (532±10)nm区域在不同入射角的反射率曲线

Fig. 2 Reflectance curves of different incident angles at (532±10) nm

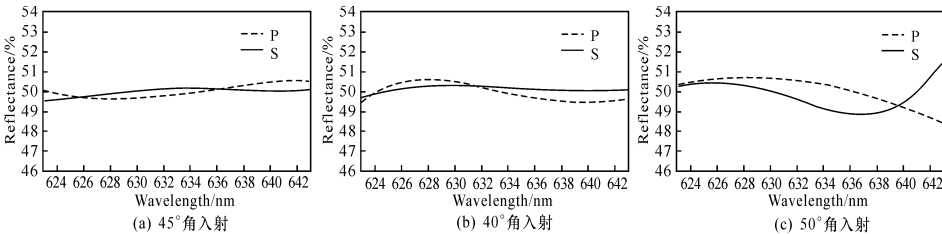


图3 (633±10)nm区域在不同入射角的反射率曲线

Fig. 3 Reflectance curves of different incident angles at (633±10) nm

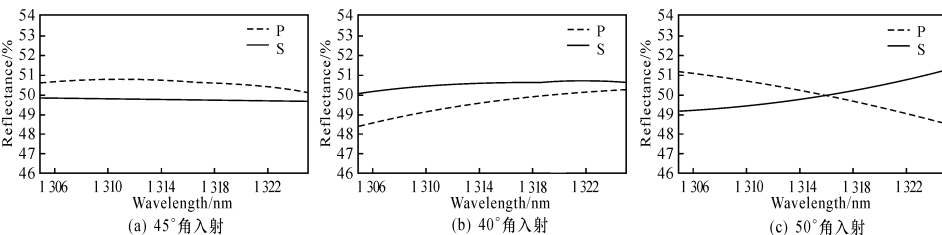


图4 (1 315±10)nm区域在不同入射角的反射率曲线

Fig. 4 Reflectance curves of different incident angles at (1 315±10) nm

2.2 分析

消偏振薄膜的具体要求与实际应用环境有关。一般来说,当满足以下3个条件时,可以认为膜系的偏振效应可以忽略。这3个条件^[22]是: $|R_{i,s}^D - R_{i,s}^M| \leq 0.1R_{i,s}^M$; $|R_{i,p}^D - R_{i,p}^M| \leq 0.1R_{i,p}^M$; $|R_{i,s}^D - R_{i,p}^D| \leq 0.03R_{i,s}^M$ 。当 $R_{i,s}^M = R_{i,p}^M = R_i^M = 0.50$ 时,若 $|R_{i,s}^D - R_{i,s}^M| \leq 0.05$, $|R_{i,p}^D - R_{i,p}^M| \leq 0.05$ 且 $|R_{i,s}^D - R_{i,p}^D| \leq 0.015$, 则可认为膜系的设计完全达到消偏振要求。

表2 膜系的一些数据

Table 2 Data of film system

Region /nm	$ R_{i,j,s}^D - R_{i,j,s}^M /\%$			$ R_{i,j,p}^D - R_{i,j,p}^M /\%$			$ R_{i,j,s}^D - R_{i,j,p}^D /\%$		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average
Incident angle 45°									
532±10	1.098 8	0.002 5	0.297 6	0.563 7	0.027 3	0.274 3	0.976 1	0.052 9	0.373 5
633±10	0.496 7	0.011 8	0.170 1	0.571 8	0.011 5	0.284 1	0.529 5	0.011 3	0.298 5
1 315±10	0.346 8	0.190 4	0.280 4	0.737 3	0.198 1	0.590 4	0.994 3	0.544 4	0.870 8
Incident angle 40°									
532±10	1.173 7	0.109 0	0.614 4	1.349 0	0.062 1	0.522 0	1.848 8	0.017 1	0.893 7
633±10	0.355 1	0.000 9	0.136 9	0.564 2	0.015 6	0.377 7	0.581 5	0.041 9	0.326 6
1315±10	0.578 2	0.029 4	0.425 3	1.674 2	0.004 4	0.592 2	1.703 6	0.405 8	0.977 5
Incident angle 50°									
532±10	1.197 3	0.053 0	0.586 5	1.137 6	0.010 4	0.284 9	2.302 2	0.042 5	0.772 8
633±10	1.534 4	0.000 8	0.593 8	1.531 6	0.045 5	0.602 6	3.066 0	0.069 4	0.800 0
1315±10	1.195 2	0.020 9	0.539 7	1.483 7	0.045 0	0.705 8	2.678 9	0.024 1	1.243 6

表2所示是设计所得膜系的一些数据。从表中可以看到在(532±10) nm, (633±10) nm 和(1 315±10) nm 区域中,S 偏振光和P 偏振光的反射率的计算值与各自设计目标值的平均偏差都小于5%, S 偏振光和P 偏振光反射率计算值之间的平均偏差都小于1.5%。应该说,这3个区域的消偏振要求都能较好地满足。

另外,图5所示分别是532 nm,633 nm 和1315 nm 3个波长位置的反射率与入射角的关系。从图5可以看到,在入射角40°~50°的范围内,3个波长位置S 偏振光和P 偏振光反射率的计算值与各自设计目标值的偏差,以及S 偏振光和P 偏振光反射率计算值之间的偏差基本上都在1.0%以内,能够很好地满足消偏振的要求。

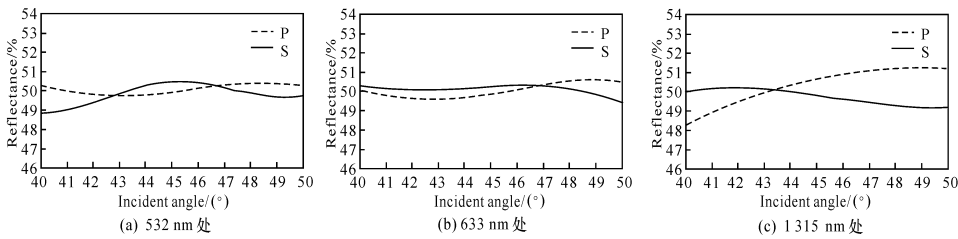


图5 3个波长位置的反射率与入射角的关系

Fig. 5 Reflectance versus incident angles at three different wavelengths

3 结论

本文基于 Thelen 和 Costich 的理论,选择 MgF₂, Al₂O₃ 和 TiO₂ 3种材料,采用 L(HMLM)⁵H 作为初始膜系,借助 Needle 合成法与 Conjugate graduate 精炼法,设计了 532 nm, 633 nm 和 1 315 nm 三波长宽角度消偏振平板型分光膜。结果显示:在入射角为 40°, 45°和 50°时,(532±10) nm, (633±10) nm 和 (1315±10) nm 3个区域内,

S 偏振光和P 偏振光的反射率计算值与各自的设计目标值之间的偏差,以及S 偏振光和P 偏振光反射率计算值之间的偏差都非常小,能够比较好地满足消偏振的要求。另外,对于 532 nm,633 nm 和 1 315 nm 3个波长位置,S 偏振光和P 偏振光的反射率计算值与各自的设计目标值之间的偏差,以及S 偏振光和P 偏振反射率计算值之间的偏差基本都在 1.0%以内,可以在入射角 40°~50°的范围内

很好地满足消偏振要求。

参考文献:

- [1] 郝殿中, 吴福全, 李国华, 等. 基于TFCALC软件的薄膜偏光分束镜的设计[J]. 应用光学, 2005,26(1): 42-45.
HAO Dian-zhong, WU Fu-quan, LI Guo-hua, et al. The design of thin-film polarizing beamsplitter based on TFCALC software [J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(1):42-45. (in Chinese)
- [2] REFERMAT S J, TURNER A F. Polarization free beam divider: US patent, 3559090[P]. 1971-01-26.
- [3] ITOH S, SAWAMURA M. Achromatized beam splitter of low polarization; US patent, 4415233[P]. 1983-11-15.
- [4] CHANG L Y, MO S H. Design of non-polarizing prism beam splitter [C] // Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series. Washington DC: Optical Society of America, 1988:381-384.
- [5] MACLEOD H A, MILANOVIC Z. Immersed beam splitters-an old problem[C]// Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series. Washington DC: Optical Society of America, 1992:28-30.
- [6] BAUMEISTER P. The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence[J]. Optica Acta, 1961,8(1):105-119.
- [7] COSTICH V R. Reduction of polarization effects in interference coatings [J]. Applied Optics, 1970, 9 (4):866-870.
- [8] THELEN A. Non-polarizing interference films inside a glass cube[J]. Applied Optics, 1976, 15(12): 2983-2985.
- [9] MAHLEIN H F. Non-polarizing beam splitters[J]. Optica Acta, 1974, 21(7):577-583.
- [10] KNITTL Z. Control of polarization effects by internal antireflection[J]. Applied Optics, 1981, 20 (1):105-110.
- [11] KNITTL Z, HOUSERKOVA H. Equivalent layers in oblique incidence: the problem of unsplit admittances and depolarization of partial reflectors [J]. Applied Optics, 1982,21(11):2055-2068.
- [12] KNITTL Z. Applications of thin films in optics and the principles and methods of their design [J]. SPIE, 1983, 401:2-18.
- [13] DE STERKE C M, VAN DER LAAN C J, FRANKENA H J. Non-polarizing beam splitter design [J]. Applied Optics, 1983,22(4):595-601.
- [14] HENDERSON A R. The design of non-polarizing beam splitters[J]. Thin Solid Films, 1978, 51(3): 339-347.
- [15] ZUKIC M, GUENTHER K H. Design of non-polarizing beam splitters with dielectric multilayer coatings[J]. Optical Engineering, 1989,28(2):165-171.
- [16] GILO M. Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube[J]. Applied Optics, 1992, 31 (25): 5345-5349.
- [17] CIOSEK J. Non-polarizing beam-splitter inside a glass cube[J]. SPIE, 1996,2943:179-183.
- [18] TIKHONRAVOV A V, TRUBETSKOV M K. Development of the needle optimization technique and new feature of optilayer design software[J]. SPIE, 1994,2253:10-20.
- [19] TIKHONRAVOV A V, TRUBETSKOV M K, DEBELL G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. Applied Optics, 1996, 35 (28): 5493-5508.
- [20] CIOSEK J, DOBROWOLSKI J A, CLARKE G A, et al. Design and manufacture of all-dielectric nonpolarizing beam splitters [J]. Applied Optics, 1999, 38(7):1244-1250.
- [21] MA P, VERLY P G, DOBROWOLSKI J A, et al. All-dielectric front-surface non-polarizing beam splitter operating between 500 and 600 nm[C]// 9th Topical Meeting on Optical Interference Coatings. US: Optical Society of America, 2004.
- [22] KOPEC G J. Design and tolerance analysis of all-dielectric non-polarizing beamsplitter coatings [J]. SPIE, 2005,5954:1-10.