

宽波长宽角度消偏振分光镜设计

李明宇,顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘 要 :简要介绍 K9 玻璃棱镜中用金属介质膜系实现宽波长宽角度消偏振的设计,设计波长为 420 ~ 680nm,空气中的入射角变化范围为 $\pm 8^\circ$,膜系的透过率 T 和反射率 R 的平均偏离约为 2.5%,S 偏振分量和 P 偏振分量的平均偏离约为 1%。

关键词 :消偏振分光镜;宽角度;K9 玻璃棱镜

中图分类号 :TH744.2 文献标识码 :A

Design of Broadband and Wide-angle Non-polarization Beamsplitter

LI Ming-yu, GU Pei-fu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract :The design of a visible broadband and wide-angle metal-dielectric non-polarization Beamsplitter deposited on substrate of K9 glass is briefly presented. The spectral wavelength region of the design is from 420 to 680nm, and the incident angle of $\pm 8^\circ$ in air. The average deviation of transmittance and reflectance is about 2.5%. The average deviation of p-polarization and s-polarization is about 1%.

Key words :non-polarization Beamsplitter; wide-angle; K9 glass prism

1 概 述

薄膜设计中消偏振问题比偏振设计更困难,至今还没一个十分有效的设计方案。我们的目的是要设计一组 $T/R = 1$ 的宽波长宽角度消偏振膜系。设计采用空气中的入射角度为 $\pm 8^\circ$ 和入射波长为 420 ~ 680nm,故消偏振设计非常困难^[1]。

薄膜之所以会产生偏振现象,是由于光在倾斜入射的情况下,不但其各层膜的有效厚度变薄,而且由于要求电场和磁场在每一个界面上的切向分量均为连续,使薄膜对 s 偏振光和 p 偏振光表现出不同的有效折射率。

很多情况下,这种偏振效应是必须消除或减少的,如倾斜使用的介质分光镜就是如此^[2]。消除薄膜系统的偏振效应是一个棘手的问题,目前人们掌握的消偏振设计手段还不很多。

2 膜系设计原理

当光线倾斜入射时, η_p 和 η_s 不同,将引起偏振分离 Δn ,通常 Δn 定义如下:

$$\Delta n = \frac{\eta_p}{\eta_s} = \frac{n/\cos\theta}{n \cdot \cos\theta} = \frac{1}{\left[1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n^2}\right]}$$

式中 θ_0 和 θ 分别为光在入射介质和膜层中的入射角, n_0 和 n 分别为入射介质和膜层的折射率。显然,对一个单层膜要实现消偏振是不太可能的, Δn 是一个恒大于 1 的量,其中 η_p 大于 η_s 。对确定 n_0 和 n , Δn 随入射角 θ_0 增大而增大。对一个确定的入射角 θ_0 ,入射介质 n_0 越高,偏振分离 Δn 也越大。因而封闭在胶合棱镜中的膜层的偏振效应更为显著^[3]。由于入射介质和基板均采用 K9 玻璃,因而比用低折射率的石英基板难度更大。

1970 年 Costich 运用等效折射率的概念设计消偏振膜系^[4]。此方法因为反射率很低,且不可调节,故实用价值不大。1974 年 Mahlein^[5]提出用两层膜组成的基本周期膜系设计消偏振膜系。由于这

作者简介:李明宇(1978-),男,在读博士生,主要从事光电子薄膜方面的研究工作。

收稿日期:2002-08-14

种设计要求膜层材料的折射率远远超出实际使用的材料,因此实际应用中也很难采用此种设计方法。1976 年 Thelerr^[6]提出将膜层、基片和入射介质统一考虑的消偏振方式。此法由于膜层的折射率变化对消偏振的性能影响十分敏感,加之膜系层数较多,所以实际中难以制备。这些方法都是全介质消偏振的方式,虽然膜系的吸收可以忽略,但是不能达到宽波长宽角度消偏振。

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。加之,金属膜中性好,所以采用介质—金属—介质消偏振膜系比全介质消偏振膜系有更优良的特性。

3 立方棱镜宽波长宽角度消偏振分光镜设计

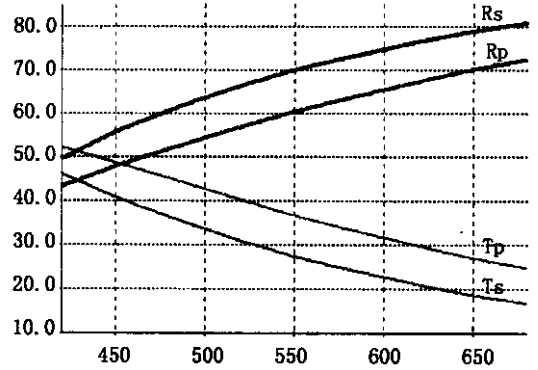
本设计的思路如下:首先选择金属材料。金属膜 p 偏振反射率的最小值可近似表示为:

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

由上式可见,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,但是可以应用在胶合棱镜中。分光镜的 R/T 值决定于银膜的厚度。本设计中要求 $R/T = 1$ 的分光镜,银膜的厚度为 24nm 左右。其次再设计金属膜两侧的匹配膜系。银膜两侧介质材料相同,入射角相同,对同一厚度的银膜而言,介质折射率越大,偏振效应越小,光谱中性越好,同时考虑玻璃的消偏振,所以选在可见光区折射率 2.35 的 ZnS。

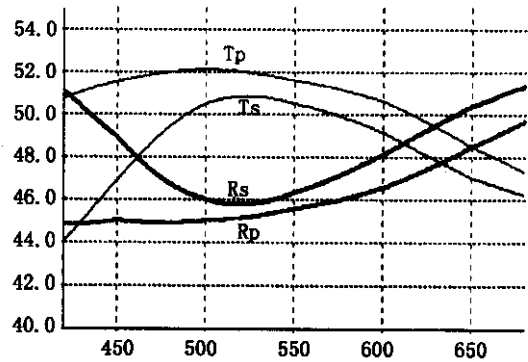
图 1 为单层银膜作为消偏振分光镜的特性曲线。S 和 P 分量的分离以及 R 和 T 的分离都较大。图 2 为在银膜两侧加上 ZnS 的消偏振特性曲线(入射角为 45°)。其 S 和 P 分量的最大分离约为 7%,R 和 T 的最大分离约 5%,这说明高折射率层对改善消偏振的带宽有很大的作用,且由于银膜的相移,其两侧的高折射率介质膜厚不等,入射侧的膜厚要高于出射侧的厚度。为进一步减小偏振效应,需要插入一些中间折射率材料,从制备工艺出发,选用 MgO 和 MgF₂ 两种材料,然后用 Needle-Tunneling 方法进行数值优化,并将 40°、45°和 50°的 R_p 、 R_s 和 T_p 、 T_s 均以不同权重放进评价函数。一个 12 层的膜系设计结果见图 3。在玻璃中以 45°入射时,在 420 ~ 680nm 波长上 S 和 P 分量的分离约为 0.7%,R 和 T 的最大分离约为 2%;40°入射时,S 和 P 分量的最大

分离约为 1.5%,R 和 T 的最大分离约为 3%;50°入射时,S 和 P 分量的最大分离约为 1.5%,R 和 T 的最大分离约为 2.5%。



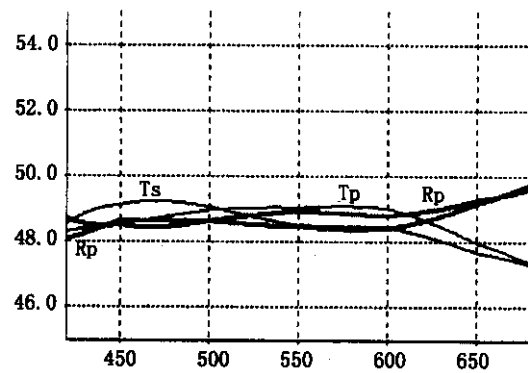
Reflectance/% and Transmittance/% vs Wavelength/nm

图 1 1.5λ Ag 1.52 立方棱镜单层银膜分光特性

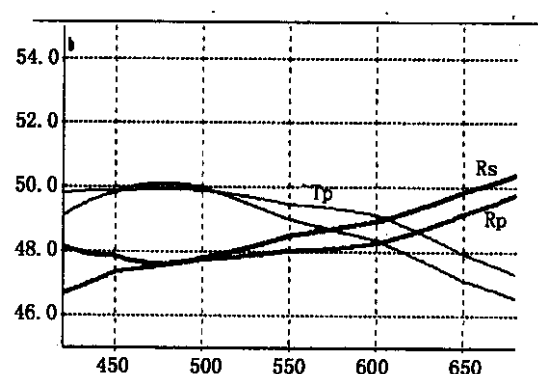


Reflectance/% and Transmittance/% vs Wavelength/nm

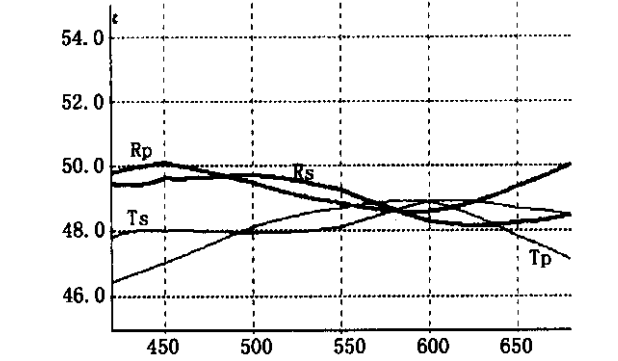
图 2 1.5λ ZnS / Ag / ZnS 1.52 立方棱镜三层膜系分光特性



Reflectance/% and Transmittance/% vs Wavelength/nm



Reflectance/% and Transmittance/% vs Wavelength/nm



Reflectance/% and Transmittance/% vs Wavelength/nm

图 3 1.52|MgO MgF₂ ZnS MgF₂ ZnS Ag MgO
ZnS MgF₂ ZnS MgF₂ MgO|1.52
(a)入射角 45° (b)入射角 40° (c)入射角 50°
立方棱镜宽波长宽角度消偏振膜系的分光特性

4 讨 论

4.1 膜系中有些膜层的厚度较薄 ,在制备工艺上给光学控制带来很大困难 ,但是用石英晶体控制应该是很方便的 ;

4.2 本设计是针对在玻璃中入射角范围 ± 5°进行的 ,即空气中的入射角 ± 8

4.3 设计中要求 $R_p = R_s = T_p = T_s = 50\%$;设计中由于金属膜的吸收效应 ,所以导致其值偏低。其吸收损耗约为 1.3% ;

4.4 膜系中 Ag 膜的厚度对消偏振特性的影响很大 ,所以在制备过程中对 Ag 膜厚度要求较高。因为 Ag 膜的制备条件要求低的基板温度 ,为了便于制备 ,设计中选择的匹配材料 ZnS、MgO 和 MgF₂ 都可以在低的基板温度下成膜 ,而且这些材料的膜层相互之间结合得较好。

参考文献 :

[1] H A Macleod. Thin-film optical filters[M] (second edition) , Bristol :Adam Hilger Ltd , 1986 335 - 343

[2] 唐晋发 ,郑权 .应用薄膜光学[M]上海 :科学技术出版社 ,1984 321 - 332

[3] 林永昌 ,卢维强 .光学薄膜原理[M]北京 :国防工业出版社 ,1990 :196 - 199

[4] V R Costich. Reduction of Polarization Effects in interference coatings[J]. Appl. Opt. , 1970 ,9(4) 866 - 870.

[5] H F Mahlein. Non-polarizing beam splitters[J]. Optica Acta , 1974 ,21(7) 577 - 583.

[6] Alfred Thelen. Non-polarizing interference films inside a glass cube[J]. Appl. Opt. , 1976 ,15(12) 2983 - 2985.

(上接第 296 页)

表 1 对图 2 所示的激光聚焦系统作三次鬼像分析的部分结果

反射次数	当前面	前一面	鬼像到当前面的距离/mm	鬼像到前一面的距离/mm	孔径角 u/rad	相对光通量
3	0	1	1.000e + 14	3.078e + 00	8.662e - 02	3.058e - 03
2	5	4	2.846e + 01	7.286e + 00	1.469e - 01	2.107e - 02
3	0	1	1.000e + 14	6.114e + 01	5.277e - 02	5.899e - 03
3	0	1	1.000e + 14	7.194e + 01	3.242e - 02	1.585e - 03
2	5	4	1.741e + 01	1.834e + 01	1.191e - 01	1.092e - 02
3	0	1	1.000e + 14	4.088e + 01	4.608e - 02	3.058e - 03
2	5	4	2.045e + 01	1.530e + 01	1.282e - 01	2.107e - 02
3	0	1	1.000e + 14	2.909e + 01	8.662e - 02	3.058e - 03
3	0	1	1.000e + 14	4.198e + 01	3.242e - 02	1.585e - 03
3	0	1	1.000e + 14	1.016e + 01	7.314e - 02	8.219e - 04
2	5	4	2.627e + 01	9.484e + 00	1.389e - 01	5.662e - 03

上表中“前一面”表示该束光的出射面“当前面”指该束光的入射面。0 表示物面 ,这里物面位于无穷远 ,该距离用 1.000e + 14 表示。5 表示聚焦面 ,其余类推。若当前面为 5 ,前一面为 4 ,则表明鬼像位于 4、5 面之间 ,可以根据表中第四、第五栏中的距离确定鬼像位置。本例中的相对光通量以物方入射光通量为 1 个单位计算 ,并设两块 GAAS 透镜均不镀膜。

4 结束语

实例计算表明 ,采用文中提出的数据结构与算法可以捕捉设计者所需要的鬼像 ,表 1 中即列出了一些实的鬼像。当然 ,也可以输出全部鬼像 ,进行迭加能量分析。根据表中给出的相对光通量和鬼光束

孔径角 ,可以计算出鬼光束相对亮度、鬼像处的相对照度等 ,为大功率激光光学系统的设计提供依据。

参考文献 :

[1] 朱启华 ,等 .多程放大系统总体光路的稳定性研究[J]. 强激光与粒子束 ,1999 ,11(6) 635 - 656.

[2] W H Lowdermilk ,J E Murray. The nultipass amplifier :Theory and numerical analysis [J]. J. Appl. Phys. , 1980 ,51(5) , 2436 - 2444

[3] 马毅勇 ,等 .高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法[J]. 强激光与粒子束 ,1999 ,11(1) 6 - 10.

[4] 严蔚敏 ,等 .数据结构[M].第 2 版 ,北京 :清华大学出版社 ,1992 :128 - 125.

[5] 李晓彤 .几何光学和光学设计[M].第 1 版 ,杭州 :浙江大学出版社 ,1997 9 - 17.