

受抑全内反射的偏振分光器*

颜鹰,王聪,李晓平,史铁林

(华中科技大学微系统研究中心,湖北武汉430074)

摘要:概述了薄膜偏振分光器的研究现状及其主要特点,对不同于MacNeille设计原理的受抑全内反射偏振分光器进行了研究,这种偏振分光器基于受抑全内反射和薄膜干涉原理,当入射角大于临界角时,在宽波段宽角度范围内反射P偏振光,透射S偏振光。重点分析这种偏振分光器的设计原理,设计了波长范围为420~680 nm、空气中的入射角范围为 $\pm 10^\circ$ 、膜系的消光比为 $T_s/T_p \geq 1000$ 的用于背投系统的薄膜偏振分光器。

关键词:偏振分光器; 受抑全内反射; 消光比; 带宽

中图分类号:O484.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0406-04

Polarizing beam splitter based on frustrated total internal reflection*

YAN Ying, WANG Cong, LI Xiao-ping, SHI Tie-lin

(Institute of Microsystems, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing status and main characters of thin-film polarizing beam splitter (PBS) are presented and demonstrated. Frustrated total internal reflection and thin film interference are simultaneously employed to allow S-polarized light to be transmitted and P-polarized light to be reflected over a wide range of wavelengths and angles of incidence. The PBS is operated at angles greater than the critical angle. The basic design principle is emphatically analyzed. The design of PBS is applied in projection system. The spectral wavelength region of the design is 420~680 nm, with the range of incident angle of $\pm 10^\circ$ in air. The extinction ratios for the reflected and transmitted beams are over 1000.

Key words: PBS; FTIR (frustrated total internal reflection); Extinction ratio; Broadband

0 引言

偏振分光器是一种光学滤波器,将两种垂直偏振光分为不同方向。在滤波器中,S和P偏振光具有同样重要的作用。波长带宽、消光比、S和P偏振的反射

率和透射率、使用的入射角度范围是偏振分光器的主要性能指标。偏振分光器是重要的光学器件,广泛应用于光学仪器、激光、光电显示器、光学录音机等。

偏振分光器一般是基于MacNeille的设计原理^[1]在两种不同折射率的界面寻找一个满足Bruster角的

收稿日期:2004-08-10; 修订日期:2004-10-05

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50405033);国家重点基础研究(973计划)项目(2003CB716207)

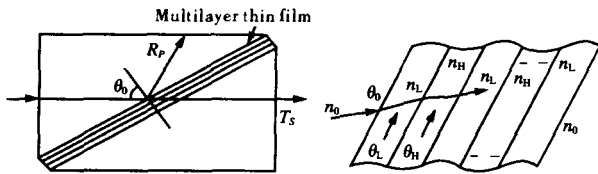
作者简介:颜鹰(1977-),女,湖北汉川人,硕士生,主要从事光学薄膜和MEMS器件设计等研究。

入射角,使P偏振光的反射完全消失。对S偏振光,设计膜系构成一个高反射膜系,使S偏振光全部反射。该偏振分光器入射角工作范围小,虽然提出了许多改进方法,但都需要在带宽和工作角度范围之间折衷选择^[2-5]。

对宽波段宽角度偏振分光器的设计,Li^[6]提出基于受抑全内反射和薄膜干涉原理,使P偏振光反射,S偏振光透射。基于这种原理,本文设计了用于背投系统中的偏振分光器,它在420~680 nm波段范围内,空气中的入射角为±10°,消光比高($T_S/T_P \geq 1000$),P偏振光反射,S偏振光透射,是一种性能优良的偏振分光器。

1 膜系设计原理

这种偏振分光器采用受抑全反射薄膜,Turner^[7]、Baumeister^[8]进行过这方面的研究。由于他们提出的



(a) 棱镜偏振分光器 (b) 多层膜参数
(a) Prism PBS (b) Multilayer thin film

图1 棱镜PBS及多层膜参数

Fig.1 Prism PBS and parameters of multilayer thin film

FRIR 薄膜对薄膜厚度和入射角的改变很敏感,这种设计没有得到广泛应用。但是经过Li等人^[6]的研究,利用FTIR和薄膜干涉原理能够设计高性能偏振分光器,图1是新的偏振分光器图。薄膜偏振分光器的入射角大于低折射率层的临界角。第*i*层膜的位相厚度 δ_i 由公式(1)给出:

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos\theta_i \quad (1)$$

式中 λ 为入射光的波长; d_i 、 θ_i 和 n_i 分别为第*i*层膜厚度、入射角和材料的折射率。

1.1 膜系的特征矩阵

在数学上,三层对称薄膜结构 $n_0|ABA|n_0$ 可以等

效于一层薄膜结构 $n_0|(E,\Gamma)|n_0$ ^[7],其中 n_0 是基片的折射率,A和B分别代表折射率为 n_1 和 n_2 、厚度为 d_1 和 d_2 的薄膜层。 E 和 Γ 分别代表等效折射率和等效相位厚度。容易证明对称结构 $n_0|[ABA]^N n_0$ 与单层膜等效。

$$E = \left[\frac{\eta_1^2 \left[\sin 2\delta_1 \cos \delta_2 + \frac{1}{2} (\eta_1/\eta_2 + \eta_2/\eta_1) \cos 2\delta_1 \sin \delta_2 - \frac{1}{2} (\eta_1/\eta_2 - \eta_2/\eta_1) \sin \delta_2 \right]}{\left[\sin 2\delta_1 \cos \delta_2 + \frac{1}{2} (\eta_1/\eta_2 + \eta_2/\eta_1) \cos 2\delta_1 \sin \delta_2 + \frac{1}{2} (\eta_1/\eta_2 - \eta_2/\eta_1) \sin \delta_2 \right]} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\Gamma = \arccos \left[\cos 2\delta_1 \cos \delta_2 + \frac{1}{2} (\eta_1/\eta_2 + \eta_2/\eta_1) \sin 2\delta_1 \sin \delta_2 \right]$$

导纳 η 由下式给出:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= n_0 \cos \theta_0 & \eta_1 &= n_1 \cos \theta_1 & \eta_2 &= n_2 \cos \theta_2 \quad (S \text{ 偏振}) \\ \eta_0 &= n_0 / \cos \theta_0 & \eta_1 &= n_1 / \cos \theta_1 & \eta_2 &= n_2 / \cos \theta_2 \quad (P \text{ 偏振}) \end{aligned} \quad (3)$$

由折射定律

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

假设 $n_1 < n_2$,由于发生受抑全反射,低折射率层的厚度 d_1 很小。假设 d_2 也很小,这样可得 $\cos(\delta_1) \approx \cos(\delta_2) \approx 1$ 和 $\sin(\delta_1) \approx \delta_1$,把方程(1)、(3)和(4)代入方程(2),可简化方程(2)为:

$$\begin{aligned} E_S &= \left[\frac{2d_1(n_1^2 - n_0^2) + d_2(n_2^2 - n_0^2) + n_0^2 \cos^2 \theta_0}{(2d_1 + d_2)} \right]^{1/2} \\ \Gamma_S &= \arccos \left[1 - \frac{4\pi^2 d_1 d_2 (n_1^2 + n_2^2 - 2n_0^2 \sin^2 \theta_0)}{\lambda^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_P &= \left[\frac{(2d_1 n_1^2 + d_2 n_2^2) n_1^2 n_2^2}{(2d_1 + d_2) n_1^2 n_2^2 - (2d_1 n_2^2 + d_2 n_1^2) n_0^2 \sin^2 \theta_0} \right]^{1/2} \\ \Gamma_P &= \arccos \left[1 - 4\pi^2 d_1 d_2 \frac{\left(n_1^2 + n_2^2 \right) - \left(\frac{n_1^2}{n_2} + \frac{n_2^2}{n_1} \right) n_0^2 \sin^2 \theta_0}{\lambda^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 S分量

通常,对于偏振分光器的理想状况,当S偏振光对称膜系结构与基片的等效折射率相匹配时,S偏振光全部透射。当P偏振光等效折射率只有虚数部分时,对称结构可当作金属膜系,只要循环周期*N*和膜

层厚度足够大, P 偏振光可完全被反射。基于上述条件和方程(5)可得:

$$E_s = \eta_{os} \quad \text{如果 } d_2 = \frac{(n_1^2 - n_0^2)}{(n_0^2 - n_2^2)} 2d_1$$

$$\Gamma_s = \arccos \left[1 - \frac{8\pi^2 d_1^2 (n_1^2 + n_2^2 - 2n_0^2 \sin^2 \theta_0) (n_1^2 - n_0^2)}{\lambda^2 (n_0^2 - n_2^2)} \right] \quad (7)$$

方程 (7) 表明在所有波长和入射角度范围内 E_s 和 η_{os} 都是完全匹配的。这种对称结构膜系的 S 偏振光全部透射。

1.3 P 分量

当 E_p 取负虚数解时, 由方程(6)可知, 对称膜系结构可相当于纯金属膜系, 总是反射 P 偏振光。这时 P 偏振光是由入射角、周期系数 N 、等效位相厚度 Γ_p 决定, 只要位相厚度足够大, P 偏振光可全部被反射。

$$E_p^2 < 0 \quad \text{如果 } \sin \theta_0 > \frac{n_1 n_2}{n_0 (n_1^2 + n_2^2 - n_0^2)^{1/2}} = \sin \theta_{LL}$$

$$\Gamma_p = \arccos \left[1 - \frac{8\pi^2 d_1^2 (n_1^2 - n_2^2) (n_1^2 - n_0^2) \left[1 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1 n_2} n_0^2 \sin^2 \theta_0 \right]}{\lambda^2 (n_0^2 - n_2^2)} \right] \quad (8)$$

2 宽波长宽角度薄膜偏振分光器的设计

由以上推导可知, 对于这种受抑全内反射偏振分光器, 其参数应满足以下条件:

(1) $n_1 < n_0 < n_2$ 或 $n_2 < n_0 < n_1$

(2) $d_2 = \frac{(n_1^2 - n_0^2)}{(n_0^2 - n_2^2)} 2d_1$

(3) $\theta_0 > \theta_{LL} = \sin^{-1} \left[\frac{n_1 n_2}{n_0 (n_1^2 + n_2^2 - n_0^2)^{1/2}} \right] > \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_0} \right)$ 或者 $\sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_0} \right)$

由以上分析可知, 设计这种偏振分光器薄膜时,

首先根据实际需要确定波长带宽、入射角角度范围、消光比; 再选择可得到的基片、膜系材料; 根据基片、膜系材料由条件(3)计算出最小入射角 (θ_{LL}); 选择厚度 d_1 和周期数 N , 厚度 d_2 从条件(2)中计算得到, 这样即得到了对称结构的初始设计 $n_0 [(n_1, d_1) (n_2, d_2) (n_1, d_1)]^N / n_0$, 最终膜系由计算机优化得到。

这里取参考波长 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, $n_H = 2.35$, $n_L = 1.38$, $n_{\text{sub}} = 1.70$, $d_L = 0.35 \text{ }\mu\text{m}$, 计算得 $\theta_{LL} = 64^\circ$, $d_H = 0.262 \text{ }\mu\text{m}$, 取 $N = 15$, 图 2 是按照设计得到的膜系折射率分布图。

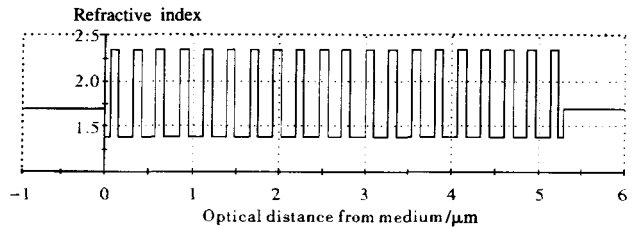


图2 膜系的折射率分布

Fig.2 Refractive index profile as a function of optical thickness

然后用软件 Macleod 8.5 优化设计, 通过在膜系两边采用对称优化的方法使膜系满足设计要求, 得到膜系的计算曲线^[9]。

从图 3 可以看到: 偏振分光器在玻璃中的入射角是 $65^\circ \sim 80^\circ$, $T_s/T_p = 99.85/0.000012 \approx 8.32 \times 10^6$, 远大于 1000, $T_s \geq 99.8\%$ 。在空气中入射角度为 $\pm 12.8^\circ$ 。

该设计结果完全满足背投系统的设计要求。

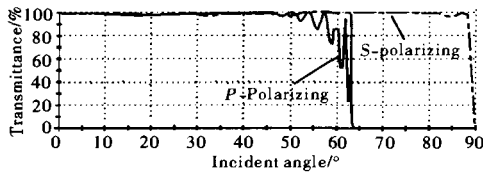
3 讨论

(1) 按照以上设计, 传统的沉积工艺同样适用于这种偏振分光器。由于入射角大于临界角, 这种薄膜偏振分光器的缺点是需要折射率较高的基片。

(2) 膜系是非规则的膜系, 有些膜层的厚度较薄。膜层厚度需要采用非极值监控。

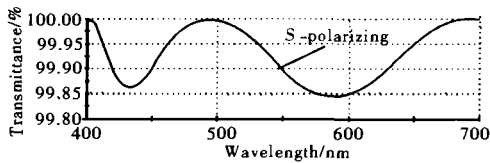
(3) 膜系设计中匹配的材料 MgF_2 和 ZnS 是性能优良的材料。基片材料选用 1.70 左右的玻璃材料。

(4) 与传统的偏振分光器设计不同, 该设计采用 P 偏振光反射, S 偏振光透射, 在空气中的入射角为 $\pm 12.8^\circ$, 在玻璃中入射角为 $65^\circ \sim 80^\circ$ 。



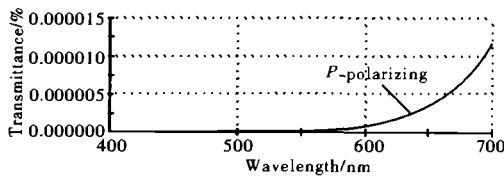
(a) 在参考波长 550 nm 偏振光随角度变化的透射率

(a) Transmittance as a function of the incident angle of the designed PBS at 550 nm



(b) 在入射角 70° 时, S 偏振光的透射率

(b) Transmittance of S polarization as a function of wavelength at 70° incident angle



(c) 在入射角 70° 时, P 偏振光的透射率

(c) Transmittance of P polarization as a function of wavelength at 70° incident angle

图 3 计算的 P、S 透射率曲线图

Fig.3 Curve graph of calculated transmittance of P and S polarization

4 结束语

文中研究的偏振分光器不同于 MacNeille 的设计

原理,利用受抑全内反射和薄膜干涉原理设计,在宽波段宽角度范围内反射 P 偏振光,透射 S 偏振光。基于该原理,设计了用于背投系统的偏振分光器,并通过在膜系两边采用对称优化的方法使膜系满足设计要求,得到了令人满意的结果。

参考文献:

- [1] MacNeille S M.Beam Splitter[P].US Patent:2 403 731,1946-07-09.
- [2] Mouchart J,Begel J,Duda E.Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field[J].Appl Opt,1989,28(14):2847-2853.
- [3] Li Li,Dobrowolski J A.Visible broadband wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter [J].Appl Opt, 1996,35 (13): 2221-2225.
- [4] Philip Baumeister.Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance[J].Appl Opt,1997,36(16):3610-3613.
- [5] Shokooh-Saremi M,Nourian M,Mirsalehi M M.Design of multilayer polarizing beam splitters using genetic algorithm [J].Optics Communications,2004,233:57-65.
- [6] Li Li,Dobrowolski J A.High performance thin film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle[J].Appl Opt,2000,39(16):2754-2771.
- [7] Turner A F.Some current developments in multilayer optical filters [J].J Phys Radium,1950,11:440-460.
- [8] Baumeister P W.Optical tunneling and its application in optical filters[J].Appl Opt,1967,6:897-905.
- [9] TANG Jin-fa,ZHENG Quan.Applied Thin Film Optics[M].Shanghai:Shanghai Scientific and Technology Publisher(唐晋发,郑权.应用薄膜光学.上海:上海科学技术出版社),1984.90-95.

(上接第 390 页)

红外光学系统的消热差设计.光学学报),2000,20(10):1392-1395.

- [7] HU Yu-xi,ZHOU Shao-xiang,XIANGLI Bin,et al.Design of athermal optical system[J].Acta Optica Sinica(胡玉禧,周绍祥,相里斌,等.消热差光学系统设计.光学学报),2000,20(10):1386-1391.
- [8] LI Xiao-tong. Gemetroy optic and optical design[M].Hangzhou: Zhejiang University Press(李晓彤.几何光学和光学设计.杭州:浙江大学出版社),1997.
- [9] WU Xiao-jing,SUN Chi-quan,MENG Jun-he.Relationship between

athermalizing infrared optical system and zoom lens [J].Infrared and Laser Engineering(吴晓靖,孙赤全,孟军和.红外光学系统无热化设计与变焦距镜头的关系.红外与激光工程),2002, 31(3): 249-252.

- [10] WU Xiao-jing, MENG Jun-he. Approach of athermalizing infrared optical systems[J].Infrared and Laser Engineering(吴晓靖,孟军和.红外光学系统无热化设计的途径.红外与激光工程), 2003,32(6):572-576.