

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1116-03

应用于投影显示系统的偏振分光镜的设计和制备

姚李英 易 葵 杨 健 汤兆胜 邵建达 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心, 上海 201800)

摘要: 讨论了应用于投影显示系统的满足宽光谱范围、大的入射角、高的消光比的偏振分光镜的设计和制备。提出了一种偏振分光镜的新的设计方法: 采用多对迈克尼尔对组合来满足宽入射角范围的要求, 采用多个中心波长不同的 $\lambda/4$ 膜堆来满足宽光谱范围。设计的偏振分光镜在 420 nm ~ 670 nm 的波段范围内, 在 $41.34^\circ \sim 48.66^\circ$ 的入射角范围内, 达到 p 偏振光的平均透过率大于 85%, s 偏振光的平均透过率与 s 光的平均透过率之比大于 1000。并给出了设计实例和样品的实测结果。

关键词: 投影显示; 偏振分光镜; 设计

中图分类号: O484.41; TN141.9 文献标识码: A

1 引 言

随着时代的进步, 人们对显示画面的尺寸要求也随着提升。要求阴极射线管(CRT)显示器的显示画面大于 1 m 是很困难的, 投影显示技术便是解决这个困难的有效途径之一。在现有的投影显示系统中, 有四种实现技术: 1) 采用阴极射线管作为图像发生源的大屏幕投影系统; 2) 采用液晶显示(LCD)作为图像发生源的大屏幕投影显示系统; 3) 采用数字微反射镜(DMD)作为图像发生源的数字光处理器(DLP)大屏幕显示系统; 4) 采用硅基液晶显示(LCOS)作为图像发生源的大屏幕投影显示系统。除了数字光处理器之外, 投影显示系统都要用到含有偏振分光镜的光学元件。偏振分光镜是上述投影显示系统中重要的薄膜元件, 它的性能直接影响到图像的对比度、色彩的一致性和光能的利用率。

目前国内虽有一些单位在研制投影系统的偏振分光镜(PBS)薄膜, 但总体性能不理想。与一般的偏振分光镜不同, 投影显示系统的偏振分光镜要求入射角容许范围较大和波段区间较宽, 其结构如图 1 所示, 传统的迈克尼尔型偏振分光镜在偏离设计角的条件下, 性能将严重下降。为达到高性能的偏振分光镜的要求, 人们提出了多种设计方法。在文献 [1] 中提出了一种依赖于数值计算的方法, 该方法是引进一个新的评价函数, 评价函数包含了在三个不同入射角的条件下 p 偏振和 s 偏振的透过率。在

文献 [2] 中提出了一种采用多个迈克尼尔对的方法, 但只是从理论的角度提出了一种新的设想, 由于受到实际制备条件的限制, 没有得到很好的实际应用。Li 等在文献 [3] 中提出一种基于抑制全反射的方法, 该方法得到的结果具有很高的透过率和消光比, 但由于采用很大的入射角, 给应用带来困难。

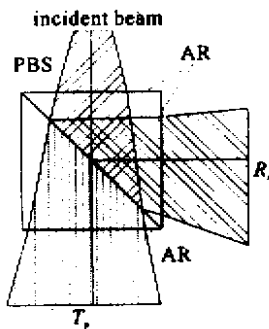


Fig. 1 Schematic of PBS cube with wideband and wide incident angle acceptance for projection display system

本文着重讨论应用于投影显示系统的高性能偏振分光镜的设计和制备。

2 设计方法

根据折射定律有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_H \sin \theta_H = n_L \sin \theta_L, \quad (1)$$

式中, n_H 为高折射膜层的折射率, θ_H 为该层的折射角; n_L 为低折射率膜层的折射率, θ_L 为该层的折射角, n_0 为入射介质的折射率, θ_0 为入射角。当满足布儒斯特角条件时, 即 $\theta_H + \theta_L = 90^\circ$, p 偏振光的反射率为 0, 而 s 偏振光则部分反射部分透过。当增

加交替膜层的周期数时, s 偏振光的反射率将接近 1, p 光的透过率也接近于 1。根据 (1) 式并结合布儒斯特角条件, 得到如下关系式

$$n_H^{-2} + n_L^{-2} = L^{-2}, \quad (2)$$

其中 $L = n_i \sin \theta_i$, 我们称满足 (2) 式的 n_H 和 n_L 为迈克尼尔对 (Macneille Pair)。

在 (2) 式中, 不显含波长和厚度因子, 可以将 s 偏振光的反射带安排在任何光谱区间, 仍保持 p 光 100% 透过。因此, 为了在提高 s 光的反射率的同时, 保持 p 光透过率, 采用多个中心波长不同的 $\lambda/4$ 膜堆, 而且不同波长处的膜堆 $(HL)^{m_i}$ 或者 $(ML)^{m_i}$ 的幂指数不超过 4, 从而实现宽带偏振分光镜的设计, 同时采用两对迈克尼尔对也提高了入射角的变化范围。由此得到的普遍比较适用的膜系是: $G/X_1(ML)^{m_1}X_2(ML)^{m_2}X_3(ML)^{m_3}X_4(ML)^{m_4}X_5(ML)^{m_5}X_6(HL)^{m_6}X_7H/G$ 。其中 H 、 M 、 L 是制备时选取的材料, G 表示基底, X_i 是设计时选取的系数, m_i 是基本周期的幂指数。

3 设计举例

给定设计参量及指标如表 1 所示。

Table 1. Parameters and targets required by PBS

refractive indexes of substrate, incidence medium and exit medium	1.64
spectrum range	420 nm ~ 670 nm
incidence angle range	$41.34^\circ < \theta < 48.66^\circ$
ratio between p and s polarization's average transmittance	$T_p : T_s > 1000:1$
the average transmittance of p polarization	$T_p > 85\%$

不妨假定选定 SiO_2 作为低折射率材料, 其 $n_L = 1.46$ 根据 (2) 式来寻找 p 分量反射率为 0 的迈克尼尔对 n_H , 针对不同的设计角度, 我们得到如下结果:

当 $\theta = 45.00^\circ$, $n_0 = 1.64$, $n_H = 1.91$ 。

当 $\theta = 41.34^\circ$, $n_0 = 1.64$, $n_H = 1.61$ 。

当 $\theta = 48.66^\circ$, $n_0 = 1.64$, $n_H = 2.28$ 。

为了便于实际制备, 本文采用了两对迈克尼尔折射率对, 所以需要从上面计算出的三对迈克尼尔折射率对中选最佳的两对。三对迈克尼尔折射率对共有三种组合, 即 $\theta = 45.00^\circ$ 和 $\theta = 41.34^\circ$ 、 $\theta = 45.00^\circ$ 和 $\theta = 48.66^\circ$ 以及 $\theta = 41.34^\circ$ 和 $\theta = 48.66^\circ$ 时的折射率对组合。经过计算发现, 采用 $\theta = 45.00^\circ$

和 $\theta = 48.66^\circ$ 的迈克尼尔组合对设计出的膜系性能最好。所以在样品制备中选取的三种材料确定为: $n_H = 2.3$, $n_M = 1.92$, $n_L = 1.46$, 为了增加带宽, 采用了多个中心波长不同的 $\lambda/4$ 膜堆组合。结合本文给出的通用膜系, 最后设计出的膜系在 $\theta = 41.34^\circ$ 、 45.00° 、 48.66° 时的透过率曲线见图 2 和图 3, 性能指标见表 2。该设计结果达到预期目标。

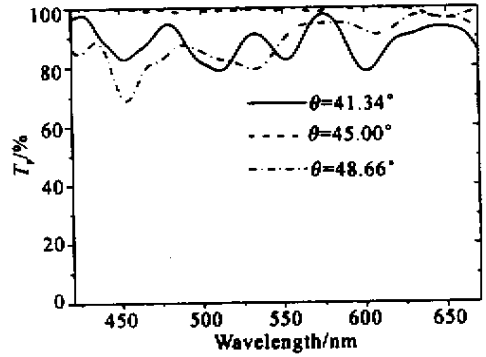


Fig. 2 Transmittance of p polarizing beam for designed PBS

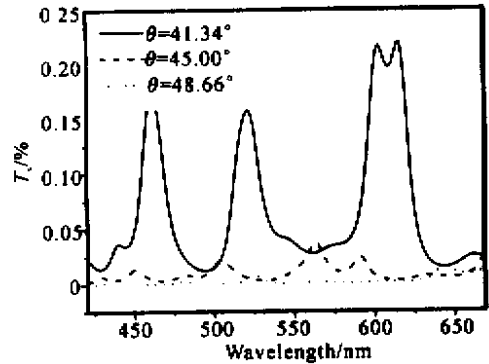


Fig. 3 Transmittance of s polarizing beam for designed PBS

Table 2. Performances of the designed PBS at different incidence angle

incidence angle $(^\circ)$	average of p polarization transmittance $T_p / \%$	average of s polarization transmittance $T_s / \%$	ratio between p and s polarizations average transmittance $T_p : T_s$
41.34	88.532	0.064	1383:1
45.00	98.931	0.010	9893:1
48.66	88.207	0.003	31502:1

4 制备和测量

偏振分光镜膜的实际制备是在 Balzers500 型真空镀膜机上进行的, 采用电子束蒸发, 膜厚控制采用光强法。

为了验证理论设计, 测量了 $\theta = 45^\circ$ 时的 s 和 p 偏

振光透过率曲线。实际测量的结果见图 4 及图 5。

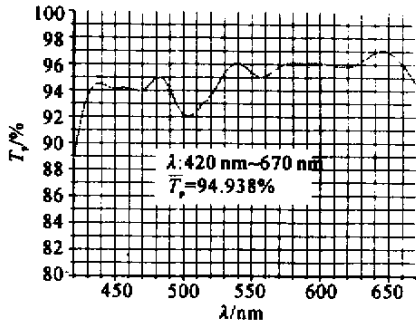


Fig. 4 Transmittance of p polarizing beam at 45.00° for prepared sample PBS

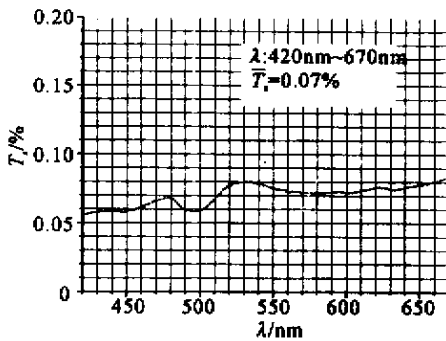


Fig. 5 Transmittance of p polarizing beam at 45.00° for prepared sample PBS

从图中可以看到,在 420 nm ~ 670 nm 的范围内, s 光的实测平均透过率为 0.07%, p 偏振光的实测平均透过率为 94.938%, $T_p : T_s = 1356:1$, 该测量结果证明了本文提出的新的设计方法是实际可行的。

结论 本文提出了采用两对或多对迈克尼耳对组合,采用多个中心波长的 $\lambda/4$ 膜堆组合来设计宽带宽角偏振分光镜的设计方法,按该设计方法制备出的偏振分光镜在 420 nm ~ 670 nm 的波段范围内,在 $41.34^\circ \sim 48.66^\circ$ 入射角范围内,有 $\bar{T}_p > 85\%$, $\bar{T}_p : \bar{T}_s > 1000:1$ 。实验证明本文中介绍的设计方法对制备投影显示用的偏振分光镜薄膜具有实用意义。

参 考 文 献

- [1] Li Li, Dobrowolski J A. Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2221 ~ 2225
- [2] Baumeister P. Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(16): 3610 ~ 3613
- [3] Li Li, Dobrowolski J A, Sullivan B T *et al.*. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3634**: 52 ~ 62

Design and Fabrication of Polarizing Beam Splitter for Projection Display System

Yao Liying Yi Kui Yang Jian Tang Zhaosheng Shao Jianda Fan Zhengxiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 19 September 2001; revised 6 December 2001)

Abstract: The application of polarizing beam splitter for projection display system was reviewed. A new method was described for the design of polarizing beam splitter to meet the requirement of wideband and wide incident angle acceptance. Multiple Macneille Pairs were used and multiple central wavelength for $\lambda/4$ layer stacks combination were adopted in the design. The experimental results illustrated that the method was practicable.

Key words: projection display; polarizing beam splitter; design