

用于投影显示的分色合色膜系的消偏振设计

陈卫斌 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 由于斜入射时, 光学薄膜存在一定的偏振效应, 将产生 S 和 P-偏振光的光谱分离. 在 Philips 棱镜系统中, 分色合色膜系通常分色时对 S-光应用, 合色时则对 P-光应用. 从提高光能利用率、减少杂散光和增加系统对比度等因素综合考虑, 要求分色合色膜系的 S 和 P-偏振光的分离尽可能小. 新设计方法采用宽带法布里-珀罗薄膜干涉滤光片中心波长两侧的干涉带作为长波通或短波通截止滤光片, 可实现 S 和 P-偏振分量的分离几乎为零.

关键词 薄膜光学; 分色合色; 干涉截止滤光片; 消偏振设计

中图分类号 O484 **文献标识码** A

0 引言

液晶投影显示系统中光学系统的核心之一就是分色合色系统. 分色合色系统可以将白光分成红绿蓝三基色, 分别由图像源对这三种颜色的光进行调制后, 再由合色系统合色投影到屏幕上产生彩色图像.

常见的分色合色系统有: 在透射式的液晶器件中, 有平板系统, “L” 棱镜系统和 X-cube 正方棱镜系统. 对于反射式液晶器件, 主要有 Philips 棱镜系统, X-cube 正方棱镜系统, 星形棱镜系统等等. 在这些分色合色系统中, 分色合色薄膜是影响系统各项性能指标最为关键的因素. 分色合色薄膜是在光线倾斜入射下使用的, 这就必然会有一些的偏振效应. 这是由于光在倾斜入射的情况下, 不但各层膜的有效厚度变薄, 而且薄膜对 S 和 P-偏振光表现出不同的有效折射率, 将不可避免地产生 S 和 P-偏振分量之间的光谱分离. 这种偏振效应很大程度上影响了整个分色合色系统的性能, 因此需要进行消偏振设计.

消偏振的方法主要有两种: 第一种是通过提高薄膜材料的折射率来降低膜系的偏振效应. 由于可见光区的高折射率材料很有限, 因此只能提高低折射率材料的折射率来实现. 这种采用缩小高低折射率比的方法虽然可以在一定程度上减少偏振分离, 但是为了得到一定的反射率和带宽, 必须增加膜层周期数^[1]. 另一种则是采用一些降低偏振效应的初始结构来减少偏振分离, 最有代表性的研究是 Thelen^[2,3]. 他提出了采用失谐滤光片的概念来设计消偏振的截止滤光片, 获得了较好的消偏振效果. 但是, 实际上要找一个完全消偏振的截止滤光片的初始结构并非轻而易举, 且其截止区和透射带的宽

度都非常有限.

本文提出的新方法是基于法布里-珀罗(F-P)干涉滤光片来构建消偏振的长波通或短波通截止滤光片. 由于采用较高级次的间隔层, 在 F-P 滤光片主极大透射峰两侧会产生次反射-透射带, 而这种次反射-透射带的过渡区常常呈现消偏振的特性.

1 Philips 棱镜分色合色系统

Philips 棱镜系统是反射式液晶投影显示常用的分色合色系统. 其结构如图 1.

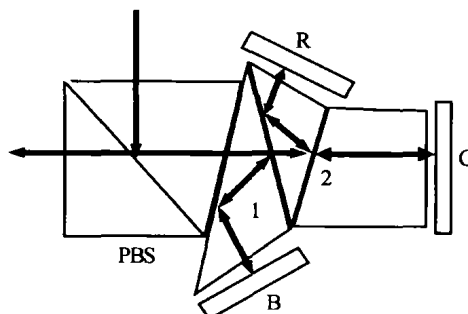


图 1 Philips 棱镜系统结构图

Fig. 1 Scheme of Philips prism system

Philips 棱镜材料为 K9 玻璃, $n=1.5163$. 第一个面的人射角为 16° , 镀制了反蓝透红绿分色薄膜, 其间是空气隙, 光线换算到空气当中的出射角为 24.8° . 第二个面入射角也是 16° , 镀制了反红透绿分色薄膜, 然后胶合.

照明光束经 PBS 反射后, S-偏振光进入 Philips 棱镜, 蓝光由 1 面反射后, 再由 3 面全反射到达 B 液晶光阀; 红光由 2 面反射后经 1 面全反射到达 R 液晶光阀; 绿光透射. R、G、B 三色光分别经三块液晶光阀调制后, 转变为椭圆偏振光, 再通过 Philips 棱镜合色后, 其中 P-偏振分量经 PBS 出射, 由投影物镜在屏幕上形成彩色图像. Philips 棱镜在系统中既是分色元件又是合色元件, 分色合色系统对 S 和 P-偏振光的要求实际上是一致的. 分色合色薄膜同时

承担着分色和合色的任务. 分色时, 棱镜工作在 S-偏振分量, 而合色时, 棱镜工作在 P-偏振分量, 因此 Philips 棱镜总的透过率为 S-和 P-偏振分量透过率的乘积. 由于薄膜的偏振效应, S-和 P-分量的光谱曲线分离是不可避免的. 其结果是不仅使 S-和 P-分量之间光谱分离波段的部分光能量无法利用, 而且这部分光将在 Philips 棱镜内部多次反射而形成杂散光. 因此减少偏振分离的分色合色膜系既可提高光能利用率, 又可减少杂散光的干扰而提高系统的对比度.

2 设计原理

典型的 Philips 分色合色长波通和短波通膜系是 $G/(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^n/A$ 和 $G/(\frac{L}{2}H\frac{L}{2})^n/G$, 其中 H 表示 $\lambda/4$ 的高折射率膜层, L 表示 $\lambda/4$ 的低折射率膜层, n 为周期数. 这些长波通或者短波通分色膜系的偏振分离比较大, 光能损失比较严重. 图 2 表示这两种膜系的偏振分离, 其在玻璃中的入射角为

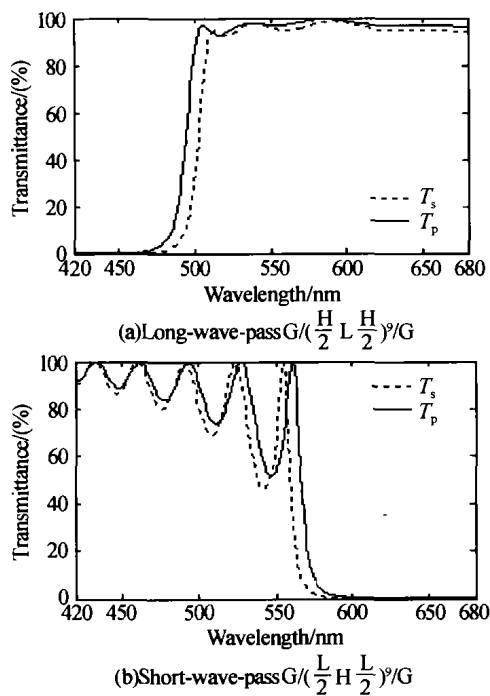


图 2 截止滤光片的分光透射率曲线
Fig. 2 The transmittance curves of dichroic filters

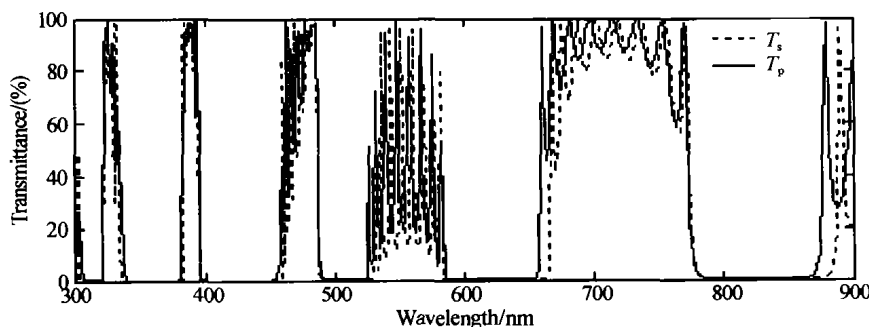


图 3 膜系 $G/(HLH2L2H2LHLHL)9^A$ 在 45° 角入射时 S-和 P-偏振分量的分光透射率曲线
Fig. 3 The transmittance curves of s- and p-polarization components for $G/(HLH2L2H2LHLHL)9^A$ at 45° incidence

16° , 膜层材料为 TiO_2 和 SiO_2 . 可见, 对于长波通(图 2(a))和短波通(图 2(b))分色膜系, 对应于透射率 50% 时的 S-和 P-偏振分量的光谱分离分别为 8.2 nm 和 7 nm. 假设从 PBS 出射后进入 Philips 棱镜的光为 S-偏振光, 从 494.1 波段到 502.3 波段的光经长波通膜系反射后入射到 B 液晶光阀, 经过液晶光阀调制后变为 P-偏振光, 但是由于 P-偏振光在此波段的反射率很低, 因而光线无法沿原光路返回, 成为杂散光. 同样, 短波通膜系从 559.4 到 566.4 波段的光也无法沿原光路返回, 成为无法利用的光能. 可见这种偏振分离对光学系统的性能是非常不利的, 它增加了杂散光, 降低了光能利用率和系统对比度. 为了提高系统对比度以及光能利用率, 必须进行消偏振设计.

图 3 是一个 F-P 滤光片以 24.8° 入射时 S-偏振和 P-偏振分量的分光透射率曲线. 作为例子, 其膜系为: $G/(HLH2L2H2LHLHL)9^9/A$, 参考波长为 400 nm. 可以看出, 在滤光片中心波长主透射峰两侧各有一个过渡区消偏振的长波通和短波通区, 以此作为初始膜系, 经过适当的膜层厚度优化, 即可获得消偏振的截止滤光片, 这在显示领域和光通讯的应用中具有重要的使用价值^[4~8].

依据上述原理, 选取膜系 $G/(HLH2L2H2LHLHL)9^9/A$ 作为设计长波通的初始结构, 膜层中的入射角为 16° , 空气中为 24.8° . 监控波长为 440 nm, 通过优化, 最后得到 54 层的消偏振长波通分色膜系. 同样, 选取膜系 $G/(HLH2L2H2LHLHL)9^9/G$ 作为设计短波通的初始结构, 入射角为 16° , 监控波长为 310 nm, 膜层优化后, 得到 64 层的消偏振短波通分色膜系. 长波通和短波通分色合色膜系如图 4. 对于长波通和短波通膜系, 在透射率 50% 出 S-和 P-偏振分量的分离分别为 0.16 nm 和 0.1 nm, 具有及其优良的消偏振特性, 而且过渡带大大缩短, 提高了截止度. 长波通膜系最终结构为 $G/(HL)27^27/A$, 短波通膜系最终结构为 $G/(HL)32^32/G$, 表 1 列出了设计所得膜系各层膜的物理厚度, 表 2 列出了设计使用材料的折射率.

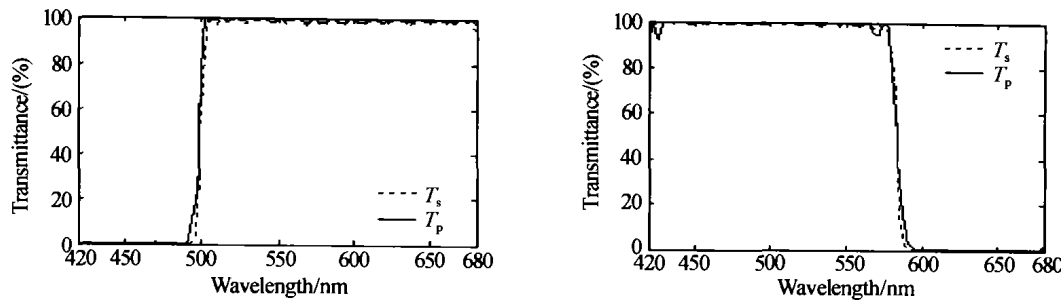


图 4 (a)由膜系 $G/(HLH2L2H2LHLHL)^9/A$ 构成的长波通和(b)由膜系 $G/(HLH2L2H2LHLHL)^9/G$ 构成的短波通分色合色膜系分光透射率曲线

Fig. 4 The transmittance curves of (a) long-wave-pass for the design of $G/(HLH2L2H2LHLHL)^9/A$ and (b) short-wave-pass dichroic filters for the design $G/(HLH2L2H2LHLHL)^9/G$

表 1 设计所得长波通和短波通膜系的详细结构

Layer	Thickness/nm		Thickness/nm		Thickness/nm		Thickness/nm				
Glass	Long	Short	Long	Short	Long	Short	Long	Short			
1	133.05	94.3	17	156.23	42.13	33	132.83	31.39	49	95.47	46.75
2	86.48	121.36	18	72.61	84.77	34	129.66	34.28	50	169.47	78.03
3	20	89.22	19	26.08	40.12	35	108.13	38.83	51	79.95	27.36
4	277.81	100.9	20	88.98	34.01	36	137.99	85.39	52	217.01	34.94
5	37.1	86.16	21	148.32	30.19	37	94.48	43.64	53	31.14	41.71
6	238.7	120.41	22	75.41	81.93	38	174.31	37.94	54	331.38	80.67
7	173.66	69.77	23	129.76	48.82	49	80	26.54	55		33.81
8	60.69	157.51	24	345.19	47.62	40	189.05	77.68	56		30.82
9	34.12	48.36	25	119.64	21.5	41	80.02	50.3	57		36.32
10	72.68	65.9	26	117.81	68.31	42	178.05	54.32	58		81.83
11	46.05	20.55	27	117.74	59.95	43	92.04	20.61	59		42.47
12	79.29	45.46	28	125.3	68.59	44	150.98	60.9	60		25.63
13	39.52	50.32	29	104.92	21.73	45	106.99	50.6	61		30.57
14	60.81	79.64	30	163.67	47.31	46	126.98	70.23	62		87.69
15	41.5	28.81	31	100.37	48.78	47	109.54	22.28	63		99.71
16	268.54	33.86	32	20	82.67	48	139.16	44.25	64		145.69

表 2 设计使用材料的折射率

λ/nm	400	450	500	550	600	650	700
TiO ₂ (n)	2.52	2.469	2.422	2.385	2.351	2.337	2.328
SiO ₂ (n)	1.467	1.463	1.459	1.455	1.452	1.45	1.446

3 结论

虽然分色合色膜系折算成在空气中的入射角为 24.8° ,但是设计原理依然适用于更大的入射角. 采用 2L2H2L 或 2H2L2H 等作为窄带滤光片的间隔层,可以适当调节 S-和 P-偏振分量的主透射峰位置,从而使二个偏振分量即使在倾斜入射时的中心波长仍然保持重叠^[9].

由于滤光片经过厚度优化,故原则上它是一个非规整的任意厚度膜系. 长波通膜系的最小物理厚度为 20 nm,短波通膜系的最小物理膜厚为 21 nm. 采用计算机辅助的膜厚监控技术或采用石英晶体膜厚监控系统进行厚度控制是很方便的.

消偏振分色合色膜系的设计步骤可简单归纳为

1) 选择一个适当的 F-P 宽带滤光片,调节其间隔层级次和反射膜堆的反射率,寻找较宽截止区和透射带宽度的消偏振长波通或短波通截止滤光片的

初始膜系结构;

2) 通过监控波长的选择,将初始膜系的消偏振过渡区调节到所需的波长;

3) 对初始膜系进行厚度优化,减小透射带波纹,并增加反射带宽度.

采用上述方法可以非常快捷地得到性能优良的消偏振截止滤光片.

Philips 棱镜长波通、短波通膜系的设计思想和设计方法可以应用到投影显示用的其他分色合色光学系统中,例如平板分色合色系统,正方棱镜分色合色系统等等.

参考文献

- 1 Browning, Stephen D , LeFebvre, *et al.* Thin film dichroic color separation filters for color splitters in liquid crystal display systems. US Patent, Patent number 5914817,1999
- 2 Thelen A. Avoidance or enhancement of polarization in multilayers. *J Opt Soc Am*, 1980,70(1):118~121
- 3 Thelen A. Nonpolarizing edge filters. *J Opt Soc Am*, 1981,71(3):309~314
- 4 顾培夫,杨毓铭,陈海星,等. 用于波分复用系统的多峰

- 干涉滤光片. 光子学报, 2003, 32(7):837~839
Gu P F, Yang Y M, Chen H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(7):837~839
- 5 顾培夫, 白胜元, 李海峰. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计. 光学学报, 2002, 22(7):794~797
Gu P F, Bai S Y, Li H F, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7):794~797
- 6 杨立功, 顾培夫. 液晶投影显示中分色合色膜系空间角度特性研究. 光子学报, 2003, 32(1):117~120
Yang L G, Gu P F. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1):117~120
- 7 杨毓铭, 顾培夫, 刘旭. DWDM用薄膜窄带滤光片的容差特性模拟分析. 光子学报, 2003, 32(3):352~356
Yang Y M, Gu P F, Liu X. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3):352~356
- 8 黄腾超, 陈海星, 李海峰. 可调谐液晶法-珀滤光片的研究. 光子学报, 2003, 32(12):1438~1441
Huang T C, Chen H X, Li H F. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12):1438~1441
- 9 顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进. 光学学报, 2003, 23(3):377~380
Gu P F, Li H F, Zhang Y G, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3):377~380

Design of Nonpolarizing Thin Film Edge Filters Used for Color-separation and Color-recombination in Projection Display System

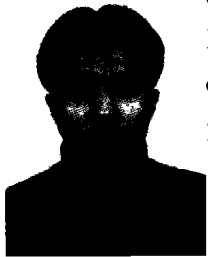
Chen Weibin, Gu Peifu

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

Received date: 2004-04-20

Abstract Optical thin films exhibit inevitable polarization effects at oblique incidence, which leads to the spectral splitting of s- and p-polarization components. Generally, s-polarized light initially enters Philips prism, and then the light is modulated to p-polarized light by liquid crystal light valves if they are in "on state". Consequently, minimum splitting of s- and p-polarization components is required to gain optimum efficiency and improve contrast of the system. The novel design method is based on a broad-band F-P thin film interference in which both sides of transmittance band can be used for long-wave-pass or short-wave-pass filters, and through suitable refinement it is possible to achieve zero separation between two polarization components.

Keywords Thin film optics; Color-separation and color-recombination; Interference edge filter; Nonpolarizing design



Chen Weibin was born in 1981. He received the Bachelor degree in the Department of Mechanical Engineering in Zhejiang University in 2002. Currently he is a M. S. candidate of the Optical Engineering Department, Zhejiang University. His research is focused on polarization effects in optical thin films and polarizing elements.