

文章编号: 0253-2239(2005)05-696-5

投影光学系统中的偏振像差分析

陈卫斌 顾培夫 郑臻荣

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 当光束斜入射时,光学薄膜存在一定的偏振效应。在飞利浦棱镜系统中,当一定大小孔径角的照明光束斜入射到分色合色薄膜后,S偏振分量和P偏振分量存在一定的相位差,使得线偏振光变成椭圆偏振光。利用琼斯矩阵偏振光线追迹的方法,分析了投影光学系统中由于两偏振分量相位差引起的偏振像差,以及它与暗态泄漏光强和系统衬比度的关系。得出了系统出瞳面上的光波偏振特性,以及在不同大小孔径角的照明光束入射下偏振像差的变化。分析了膜厚监控误差对光学系统偏振像差的影响,发现膜厚监控误差对偏振像差和系统衬比度有很大的影响。所使用的分析方法可以应用于其他大口径光学系统。

关键词: 薄膜光学; 偏振像差; 琼斯矩阵; 投影显示; 膜厚监控误差

中图分类号: O484 文献标识码: A

Analysis of Polarization Aberration in Projection System

Chen Weibin Gu Peifu Zheng Zhenrong

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

Abstract: Optical thin films exhibit inevitable polarization effects at oblique incidence. When illuminating light with a large numerical aperture incident on dichroic thin films at a non-normal angle in Philips prism system, linear polarized light is turned into elliptical polarized light because of the difference of the phase shift between s- and p-polarization component. Polarization aberration in projection display system is analyzed based on the theory of Jones matrix polarization ray tracing. The dark-state output and extinction ratio of system are also calculated. Furthermore, the character of polarized light on the exit pupil is given out, and the variation of polarization aberration at different F-number illumination light is analyzed. At last, the influence of monitoring errors of thin film on the polarization aberration is analyzed. The monitoring errors have great impact on the polarization aberration and contrast of the system. The method can be applied to other large aperture optical systems.

Key words: thin film optics; polarization aberration; Jones matrix; projection display; monitoring error of thickness of thin film

1 引言

当进行光线追迹和衍射计算的时候,一般都默认光瞳波面上的光振幅是一致的(或是高斯分布)且偏振态恒定。这种假设只有在光的两正交偏振分量的振幅变化和波前差足够小以至可以忽略的时候才是有效的,对于大多数光学系统来讲这都是很好的近似。但对于有些光学系统而言,并不满足这一假设,此时必须考虑光的偏振特性,即光的偏振像差^[1]。

偏振像差主要是由光学系统中光学元件引入的残余偏振所产生的,如偏振器、反射镜、薄膜等。由

于任意偏振和延迟的出现将会使两正交偏振分量之间相互耦合,因此残余偏振是光学系统中不希望出现的偏振效应,它同波前像差一样会降低光学系统的成像能力。其中光学系统中普遍应用的薄膜是引起偏振像差的主要因素。

光学薄膜对投影显示系统成像质量的影响主要有两个方面:一是斜入射时 S,P 偏振光谱分离造成的杂散光对光学系统性能的影响,可以通过消偏振设计的长波通和短波通膜系来解决这个问题,这种消偏振滤光片对光通信也有着非常重要的意义^[2~10]。二是

作者简介: 陈卫斌(1981~),男,浙江温岭人,硕士,主要从事光学薄膜和偏振器研究。E-mail: wbchen@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-05-24;收到修改稿日期: 2004-10-09

孔径光束入射时 S, P 偏振分量相位差引起的偏振像差,造成系统暗态光强泄漏从而降低了衬比度。

本文采用琼斯矩阵偏振光线追迹的方法,分析了投影光学系统中由分色合色薄膜引起的偏振像差。采用数值仿真计算的方法,计算了一定大小孔径角的照明光束入射分色合色膜系后 S, P 偏振分量的相位差,以及由于这种偏振效应引起的暗态泄漏光强和它对系统衬比度的影响,并且分析了薄膜监控误差对偏振像差的影响。

2 薄膜偏振特性分析的基本理论

对任一多层膜堆,在倾斜入射时,一般 S 光和 P 光的反射率、透射率和相位变化是不一样的,导致入射光的偏振状态在透射光与反射光中不再一致^[1]。采用图 1 所示的薄膜法则,透射光与入射光相同,其 S 和 P 分量与波矢 \mathbf{K} 组成右手坐标系,而反射光的 S 量和 P 量与波矢 \mathbf{K} 组成左手坐标系。与透射光和反射光相对应的琼斯矩阵分别为 \mathbf{M}_T 和 \mathbf{M}_R 。在薄膜系统的本征坐标系内(即 P 量与 x 轴平行, S 量与 y 轴平行), \mathbf{M}_T 的形式为

$$\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} \sqrt{T_S} \exp(i\delta_T/2) & 0 \\ 0 & \sqrt{T_P} \exp(-i\delta_T/2) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 T_S 和 T_P 分别为透射光中 S, P 分量的透射率, $\delta_T = \delta_{T_S} - \delta_{T_P}$, δ_{T_S} 和 δ_{T_P} 分别为透射光中 S 与 P 分量的相移。

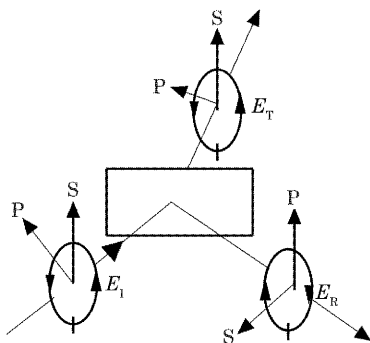


图 1 薄膜坐标系统的定义

Fig. 1 Definition of coordinate

如果薄膜系统的本征坐标系与选择的参考坐标系不一致,沿着光的传播方向 \mathbf{K} 观看,入射面(为 $\mathbf{K} \times \mathbf{n}$ 的方向, \mathbf{n} 为入射面的法线方向)与参考坐标系的 xz 平面(参考坐标系的 y 轴方向)成 θ 角时,薄膜的透射琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}'_T = \mathbf{O}^{-1}(\psi) \mathbf{M}_T \mathbf{O}(\psi), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{O}(\psi)$ 为旋转矩阵:

$$\mathbf{O}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于在反射光中坐标系的变化,薄膜的反射矩阵引入了一半波因子 \mathbf{H} ,此外基本与透射光的形式相同,其中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若在光学系统中,光波依次通过 m 个偏振光学元件,每一光学元件的琼斯矩阵为 \mathbf{M}_j (在本征坐标系内),入射平面相对于参考坐标系转过 ψ_j ,则在参考坐标系内整个系统的琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}' = \mathbf{M}'_m \cdot \dots \cdot \mathbf{M}'_1. \quad (5)$$

3 投影光学系统中的偏振像差

液晶投影显示的光学引擎器件主要有:飞利浦(Philips)棱镜系统,“L”棱镜系统,X-cube 正方棱镜系统,星形棱镜系统等。这些元件表面都镀有光学薄膜,有一定的偏振效应,必须加以考虑。

飞利浦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 2 所示。飞利浦棱镜材料为 K9 玻璃,折射率 $n=1.5163$ 。第一个面的入射角为 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入射角为 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。

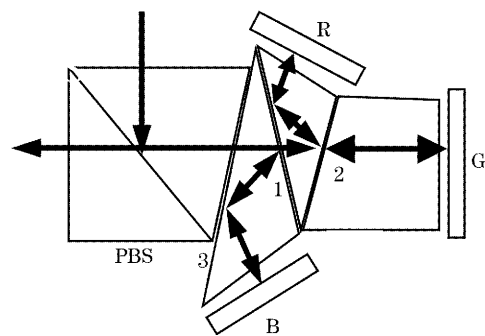


图 2 飞利浦偏振分色合色系统

Fig. 2 Diagram of Philips prism system

照明光束经偏振分束镜(Polarizing beam splitter, PBS)反射后, S 偏振光进入飞利浦棱镜,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,再通过飞利浦棱镜合色后,其中 P 偏振分量经偏振分束镜出射,由投影物

镜在屏幕上形成彩色图像。

飞利浦棱镜系统既是分色系统又是合色系统。当一定大小孔径角的照明光束入射到偏振分束镜时,偏振面方向将发生变化。如图 3 所示,由不同的空间角 θ 和 ϕ 定义的入射光线,有着不同的 S 偏振面方向。在斜入射时,光学薄膜存在一定的偏振效应,使得在使用飞利浦棱镜时,必须考虑薄膜对系统偏振度带来的影响。当一定大小孔径角的照明光束入射到飞利浦棱镜系统分色合色薄膜时,由于光学薄膜对 S 和 P 光存在一定的相位差,使得斜入射光线产生额外的偏振效应,线偏振光变为椭圆偏振光。

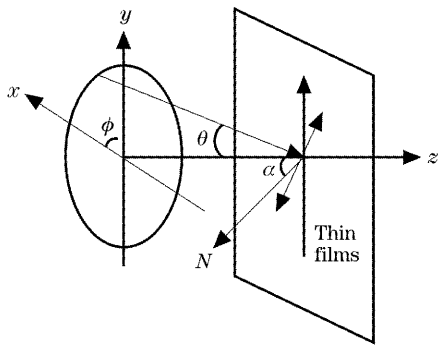


图 3 斜光束入射到薄膜偏振面的示意图
Fig. 3 Diagram of cone beam incident on thin films at oblique angle

典型的飞利浦分色合色长波通和短波通膜系是 $G \left| \left(\frac{H}{2} L \frac{H}{2} \right)^n \right| A$ 和 $G \left| \left(\frac{L}{2} H \frac{L}{2} \right)^n \right| G$, 其中 G 表示玻璃基板, A 表示空气, 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。对于 $F=3$ 的照明光束, 中心光线入射角为 16° , 光线的最大入射角为 22.4° , 最小入射角为 9.6° 。由不同空间角 θ 和 ϕ 定义的入射光线, 有着不同的膜层入射角, 从而有着不同的 S, P 相位差。长波通膜系和短波通膜系在入射角为 $22.4^\circ, 16^\circ, 9.6^\circ$ 时的透射光路 S, P 相位差如图 4 所示。

下面利用琼斯偏振光线追迹的方法对飞利浦分色合色系统的绿光透射光路的偏振像差进行仿真计算。模型中以一定数量的光线代替整个入射光束, 光线的选取依据单位立体角内光线数量相等的原则。如图 3 所示, 入射光线由角 θ 和 ϕ 定义。对于 $F=3$ 的照明光束, 入射光的孔径角约为 9.6° 。则 θ 的范围是 $[0, 9.6^\circ]$, ϕ 的范围是 $[0, 360^\circ]$ 。为了计算方便, 以等角度间隔选取光线, 同时对每一条光线赋予相应的权重系数。光线的样本为 θ 每隔 1.2° 取一个值, ϕ 每隔 20° 取一个值。每条光线的权重系数为

$$\text{val}(\theta, \phi) = \cos \theta. \quad (6)$$

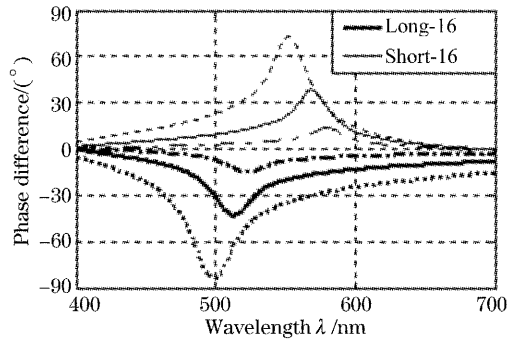


图 4 长波通 $G|(H/2 L H/2)^9|A$ 和短波通 $G|(L/2 H L/2)^9|G$ 分色膜系透射光路 S, P 偏振相位差

Fig. 4 The curve of transmittance phase difference between S- and P- polarization component for long-wave-pass $G|(H/2 L H/2)^9|A$ and short-wave-pass $G|(L/2 H L/2)^9|G$ dichroic filters

对应不同的 θ 和 ϕ 的入射光线, 有着不同的 S 偏振面方向, 而且分色合色膜系对 S, P 偏振分量有着不同的相位差。假设从 500 nm 到 580 nm 波段的绿光透射光路各波长的入射光能平均分布, 归一化为 1, 则计算得到的暗态透射光强如图 5 所示。

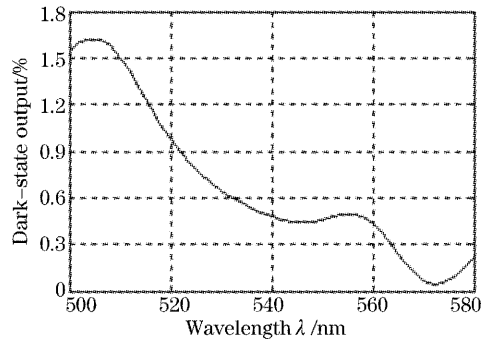


图 5 绿光光路暗态泄漏光强

Fig. 5 Green channel dark-state output

光学系统出瞳面上的光波特性如图 6 所示, 分析波长为 550 nm, 图中心点为主光轴方向, 垂直方向表

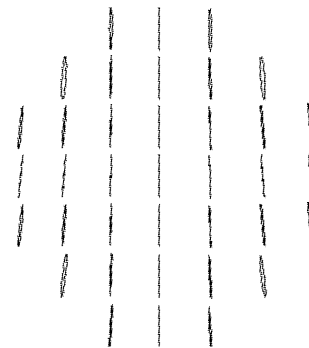


图 6 光束出射飞利浦棱镜系统后的偏振态

Fig. 6 Polarization state in exit pupil of Philips prism system (550 nm)

示 x 方向,水平方向为 y 方向,图上各点对应着出瞳上的不同位置,也即对应着不同 θ 和 ϕ 的入射光线经过分色合色膜系后出射的光波偏振特性,由图可见, x 轴方向由于偏振面没有旋转,所以仍然为线偏振光。对于偏离 x 轴的光线,而随着孔径角的增大,线偏振光变为椭圆偏振光,且椭圆度越来越大。

不同孔径角的照明光束($F/5, F/4, F/3, F/2$)入射时的暗态光强如图 7 所示,各孔径照明光束下的平均暗态泄漏光强为 0.26%,0.43%,0.685%,2.17%。衬比度约为 384,232,145,45。可见随着入射光束孔径角的加大,由于偏振像差引起的暗态泄漏光强将显著增加,系统衬比度将快速下降。这也可以用来作为衡量光学系统分色合色薄膜角度特性的一个指标。

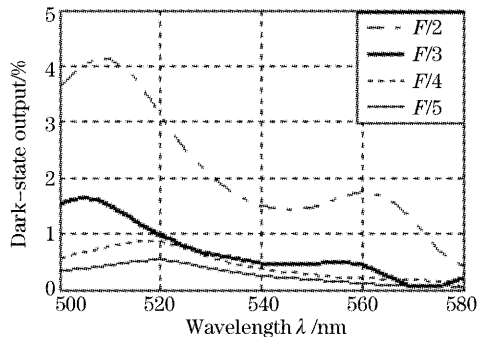


图 7 不同数值孔径入射光束入射时的暗态泄漏光强
Fig. 7 Green channel dark-state output for illuminating light with different numerical aperture

对于薄膜干涉滤光片,镀制过程中可能影响膜系光学性能的参量有薄膜厚度误差、折射率误差和膜层均匀性误差。下面以膜厚监控误差为例来分析飞利浦分色合色系统偏振像差的容差特性。

由膜厚监控引起的误差,可能对透过率、反射率影响不是很大,但是对 S 和 P 两个偏振分量的相位差会有非常大的影响。对于膜层较多的膜系,比如多于 30 层,膜厚变化 1%,相位差可能会发生数十度甚至上百度的变化。特别是当入射角较大的时候,相位差对膜厚变化将更加敏感。

对于薄膜厚度在 1% 范围内变化,16° 入射条件下的长波通和短波通分色合色薄膜对 S, P 偏振分量的相位差变化如图 8 所示。由于膜层只有 19 层,入射角也不大,所以相位变化不是很大。但是这也足够引起暗态泄漏光强较大的变化。如图 9 所示,平均暗态泄漏光强在 0.56% 到 0.81% 的范围内变化,系统衬比度在 178 到 122 内变化,可见膜厚监控误差对光学系统的成像特性有着较大的影响。

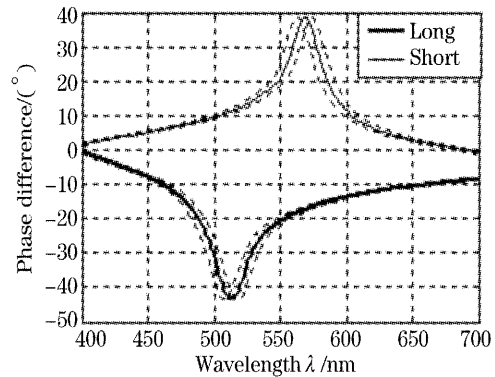


图 8 膜厚监控误差在 1% 以内时, S, P 偏振光的透射相位差变化曲线

Fig. 8 The variation curve of the difference of transmittance phase shift between S- and P-polarization component with 1% deviation of random monitoring errors of thickness of thin films

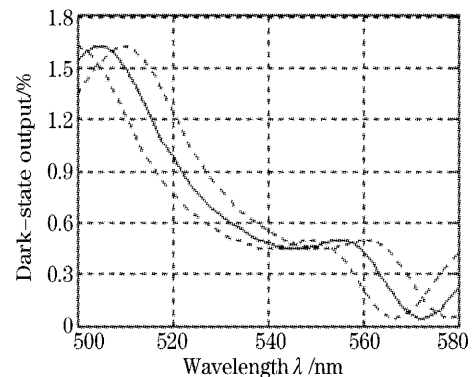


图 9 膜厚监控误差在 1% 以内时,绿光光路暗态泄漏光强的变化曲线

Fig. 9 The variation curve of green channel dark-state output within 1% deviation of random monitoring error of thickness of thin films

4 结 论

进一步提高飞利浦棱镜分色合色系统衬比度的方法可以采用小相位差的薄膜设计,或在飞利浦棱镜中加上相位补偿板,以抵消由分色合色薄膜产生的 S, P 相位差。补偿的方法可以采用波片或者补偿薄膜。由于飞利浦棱镜中分色合色薄膜的设计各不相同,其相位差也不同,因此设计专门的补偿薄膜是一个可行的方法。

由仿真计算结果可见,偏振像差对投影显示系统光学性能有着重大的影响。对于一定孔径角照明光束入射的光学系统,由于对薄膜界面有着不同的入射角,以及不同的 S, P 偏振分量相位差,光束各部分的出射偏振态是不一样的。对于实际应用中的各种投

影显示系统或者大口径激光系统等等,系统中可能会有其他引起偏振像差的光学元件,比如波片,延迟器等等,只要表示出这些光学元件的琼斯矩阵,利用本文的数学模型同样可以非常方便地计算系统中的偏振像差,并分析它的角度特性和容差特性。

参 考 文 献

- 1 Russell A Chipman. Polarization analysis of Optical System[J]. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(2): 90~99
- 2 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin-film interference filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797 (in Chinese)
顾培夫, 白胜元, 李海峰 等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 794~797
- 3 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380 (in Chinese)
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[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 377~380
- 4 Gu Peifu, Yang Yuming, Chen Haixing *et al.*. Interference filters with multiple transmittance peaks used for wavelength division multiplexing system[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(7): 837~839 (in Chinese)
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[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 837~839
- 5 Gu Peifu, Lu Wei, Chen Haixing *et al.*. Effect of spectral width of thickness-monitoring system on performance of narrow-band filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 251~254 (in Chinese)
顾培夫, 陆 巍, 陈海星 等. 膜厚监控系统的光谱宽度对窄带滤光片性能的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 251~254
- 6 Gu Peifu, Chen Haixing, Lu Wei *et al.*. Temperature stability of the central wavelength for WDM thin film bandpass filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 33~36 (in Chinese)
顾培夫, 陈海星, 陆 巍 等. 波分复用薄膜带通滤光片的中心波长温度稳定性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 33~36
- 7 Chen Haixing, Gu Peifu, Li Haifeng *et al.*. Design of interleaver with cascaded thin film filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 62~64 (in Chinese)
陈海星, 顾培夫, 李海峰 等. 薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 62~64
- 8 Lu Wei, Gu Peifu, Liu Xu. Designing of a reflective phase compensator for DWDM thin film filter's group delay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1123~1126 (in Chinese)
陆 巍, 顾培夫, 刘 旭. 密集波分复用薄膜滤光片的群延迟补偿设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1123~1126
- 9 Yang Ligong, Gu Peifu. Effect of broad conic angle incidence on color reproducibility of dichroic filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 724~728 (in Chinese)
杨立功, 顾培夫. 宽锥角光束对分色膜色再现性能的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 724~728
- 10 Haixing Chen, Jianpu Wang, Weidong Shen *et al.*. Design of tunable wavelength microcavity organic electroluminescent diode with liquid crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 550~552
- 11 K. Rabinovitch, G. Toker. Polarization effects in optical thin films[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2253**: 89~102