

文章编号 1004-924X(2003)06-0647-05

## 光学薄膜中的偏振效应

李 刚<sup>1</sup>, 孙连春<sup>1</sup>, 于兆波<sup>2</sup>, 王亚男<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 山东省济宁市育才中学, 山东 济宁 272000)

**摘要:**介绍了薄膜偏振效应的基本理论。光学薄膜在光倾斜入射时可等效为一偏振器和一位相延迟器, 这一特性可以用琼斯算法进行描述。利用薄膜的这一特性可以消除光学系统中不想要的偏振效应以保持光的偏振状态, 也可以用来制作薄膜位相延迟片。用琼斯算法对 YAG 激光用全反射角立方反射镜的偏振特性进行了分析, 并利用薄膜的偏振特性设计了两膜系对其进行了补偿; 最后对一全介质高反射膜的相移特性进行了分析和优化设计, 得到了一偏振保持高反射膜。

**关键词:** 光学薄膜; 偏振效应; 位相延迟; 琼斯算法; 角立方棱镜

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

## Polarization effects in optical thin films

LI Gang<sup>1</sup>, SUN Lianchun<sup>1</sup>, YU Zhaobo<sup>2</sup>, WANG Yanan<sup>2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Yucai High Middle School of Jining City, Jining 272000, China)

**Abstract:** Optical thin film at non-normal incidence is equivalent to a combination of a dichroic linear polarization and a retarder, and it can be described in Jones calculus. This feature can be used to cancel the unwanted polarization effect in an optical system, and to fabricate phase retarders. The polarization characteristics of the corner-cube prism for YAG laser are analyzed, and two kinds of optical thin films are designed to compensate its polarization properties. The phase shift of a dielectric media HR film is then analyzed and optimized to obtain a dielectric media polarization preserved HR film.

**Key words:** optical thin film; polarization effects; phase retarder; Jones calculus; corner cube prism

### 1 引言

许多现代光学系统为了实现像的旋转, 不同光路的叠加以及激光腔的折叠等, 其光轴都是弯曲的(即在光学系统中会遇到很多倾斜入射的光学元件)。光在倾斜入射时, 由于两个偏振状态的反射率、透射率和位相移动不同, 因此在反射光和透射光中会引入偏振效应。主要有以下 3 种情

况, (1) 在两个未镀膜的媒质界面上, 尽管两个偏振状态的位相差  $\delta(\delta_s - \delta_p)$  为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ , 但一般他们的反射率  $R_s$  和  $R_p$  以及透射率  $T_s$  和  $T_p$  是不同的; (2) 在全内反射(TIR)时, 有  $R_s = R_p = 100\%$ , 但位相差  $\delta$  可能为  $0^\circ$  与  $180^\circ$  之间的任意值; (3) 在金属镜以及单层或多层薄膜系统(无论是介质还是部分吸收)中, 一般两个偏振状态的反射率  $R$ 、透射率  $T$  以及相移  $\delta_s$  和  $\delta_p$  都是不同的。

在光学系统中为了控制光的偏振状态,一方面,可以利用薄膜的这一特性来消除光学系统中不想要的偏振效应以保持光的偏振状态,如全内反射棱镜偏振效应的补偿<sup>[2]</sup>;另一方面,可以利用薄膜的偏振特性来制作薄膜位相延迟片<sup>[3,4]</sup>,以代替传统的偏振光学元件如线偏振器和晶体位相延迟片等,使得光学系统更加紧凑,并为工程提供通过其他方法所不能得到的更多自由度,尤其是光学薄膜允许同时对光的两个偏振状态( $P$ 和 $S$ )的位相及反射率和透射率进行控制。

## 2 薄膜偏振效应的基本理论

对于任一多层膜堆,在倾斜入射时,一般 $P$ 光和 $S$ 光的反射率、透射率和位相移动不同,导致入射光的偏振状态在透射光与反射光中不能保持。此时,多层膜堆可等效为一二向性线偏振器和一位相延迟器。下面利用琼斯算法,对光的偏振状态进行计算和描述<sup>[5]</sup>。

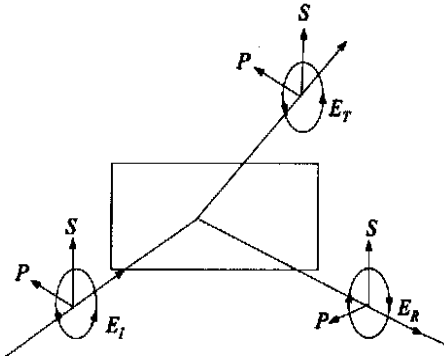


图 1 薄膜坐标系统的定义

Fig. 1 Coordinate system for the definition of thin film

采用如图 1 所示的薄膜法则,透射光与入射光相同,其 $P$ 分量和 $S$ 分量与波矢 $K$ 组成右手坐标系,而反射光的 $P$ 分量和 $S$ 分量与波矢 $K$ 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 $G_T$ 和 $G_R$ 。在薄膜系统的本征坐标系内(即 $P$ 分量与 $x$ 轴平行, $S$ 分量与 $y$ 轴平行), $G_T$ 的形式为

$$G_T = C_T P_T, \quad (1)$$

其中 $P_T$ 代表二向性线偏振器, $C_T$ 代表一位相延迟器:

$$P_T = \begin{pmatrix} T_P & 0 \\ 0 & T_S \end{pmatrix}, \quad C_T = \begin{pmatrix} e^{-i\delta_T/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_T/2} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$T_P$ 和 $T_S$ 分别为透射光中 $P$ 与 $S$ 分量的透射率,

$\delta_T = \delta_{TS} - \delta_{TP}$ ,  $\delta_{TS}$ 和 $\delta_{TP}$ 分别为透射光中 $P$ 与 $S$ 分量的相移。

如果薄膜系统的本征坐标系与所选择的参考坐标系不一致,而是沿着光的传播方向 $K$ 观看,入射面(为 $K \times n$ 的方向, $n$ 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 $\theta$ 角时,薄膜的透射琼斯矩阵为

$$G'_T = Rot^{-1}(\theta) G_T Rot(\theta), \quad (3)$$

$Rot(\theta)$ 为旋转矩阵:

$$Rot(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix},$$

$$Rot^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

由于在反射光中坐标系的变化,薄膜的反射琼斯矩阵引入了一因子 $M$ ,除此以外基本与透射光的形式相同。在本征坐标系中, $G_R$ 的形式为

$$G_R = M C_R P_R, \quad (5)$$

其中

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad P_R = \begin{pmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_S \end{pmatrix},$$

$$C_R = \begin{pmatrix} e^{-i\delta_R/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_R/2} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$R_P$ 和 $R_S$ 分别为 $P$ 与 $S$ 分量的反射率, $\delta_R = \delta_{R0} - \delta_{RP}$ ,  $\delta_{RS}$ 和 $\delta_{RP}$ 分别为反射光中 $P$ 与 $S$ 分量的反射相移。因子 $M$ 等效于一半波片。若沿着光的传播方向看,入射面与参考坐标系的 $xz$ 平面成角时,薄膜的反射琼斯矩阵与方程(3)的形式相同:

$$G'_R = Rot^{-1}(\theta) G_R Rot(\theta), \quad (7)$$

由于 $M$ 、 $C$ 和 $P$ 都是对角矩阵,因此它们在 $G_R$ 和 $G_T$ 中的顺序可以是任意的。

若在光学系统中,光波依次通过 $m$ 个偏振光学元件(传统的偏振光学元件或者为上述的薄膜偏振元件),每一光学元件的琼斯矩阵为 $G_j$ (在本征坐标系内),入射平面相对于参考坐标系转过角 $\theta_j$ ,则在参考坐标系内整个系统的琼斯矩阵为

$$G' = G'_m \dots G'_1, \quad (8)$$

一般情况下,光波通过一薄膜系统后,反射光和透射光的偏振状态会发生变化,因此在薄膜设计时,可以利用这一特性来改变光学系统中光的偏振,将光波控制在理想的偏振状态。例如,为了在透射光保持光的偏振状态必须满足,  $T_P =$

$T_S, \delta_T = 0$  (即  $\delta_{TS} = \delta_{TP}$ )。同样, 为了在反射光保持光的偏振状态则必须满足  $R_P = R_S, \delta_{RS} = \delta_{RP} \pm 180^\circ$ 。

### 3 全内反射(TIR)角立方反射镜偏振特性的分析与补偿

#### 3.1 全内反射(TIR)角立方反射镜偏振特性的分析

光线经全内反射之后, 虽振幅保持不变, 但一般情况下光的偏振状态会发生变化<sup>[6]</sup>。

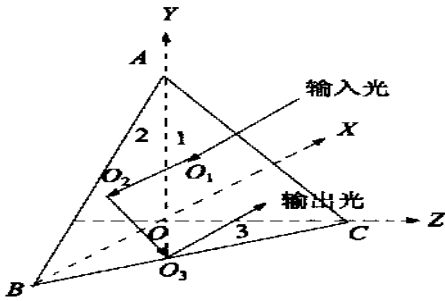


图 2 从  $ACO \rightarrow ABO \rightarrow BCO$  的光线传播轨迹  
Fig. 2 Light propagation trip for  $ACO \rightarrow ABO \rightarrow BCO$

下面以全内反射角立方棱镜为例进行分析<sup>[7]</sup>。如图 2 所示,  $ACO, ABO, BCO$  是角立方反射镜的三个平面, 分别设为面 1、2、3, 光线在每个平面的入射角为

$$\theta = \cos^{-1}(1/\sqrt{3}) = 54.7^\circ, \quad (9)$$

假设全内反射棱镜由 K9 玻璃制成, 则折射率  $n = 1.52$ , 由于全反射时,

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \theta_1 \sin^2 \theta_1 - n^2}{\sin^2 \theta_1}, \quad (10)$$

其中,  $n = n_2/n_1 = 1/1.52, \theta = 54.7^\circ$ , 经计算得到  $\delta = 142.84^\circ$ 。

由于在面 1、2、3 发生全反射, 所以对每一平面而言  $R_P = R_S = 1$ , 则各平面的琼斯矩阵变为

$$\begin{aligned} G_R &= M C_R P_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \exp(-i\delta/2) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \exp(i\delta/2) \\ \exp(-i71.42^\circ) & 0 & & \\ 0 & -\exp(i71.42^\circ) & & \end{pmatrix} \\ &= \end{aligned} \quad (11)$$

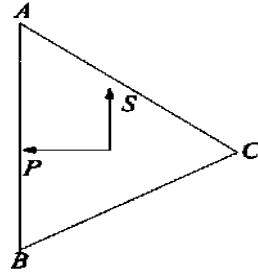


图 3 P, S 偏振的参考方向定义  
Fig. 3 Definition of the reference P and S polarization direction

规定光线的偏振参考方向如图 4 所示, S 光的偏振方向平行于角立方反射镜的底边  $AB$ , P 光的偏振方向与其垂直。于是光线按图 3 所示从  $ACO \rightarrow ABO \rightarrow BCO$  进行传播, 角立方反射镜总的琼斯矩阵为

$$G_R = Rot(-120^\circ) G_R Rot(60^\circ) G_R \cdot Rot(-60^\circ) G_R Rot(-60^\circ), \quad (12)$$

经计算得

$$G_R = \begin{pmatrix} -0.4618 - 0.8516i & -0.2479 \\ -0.2479 & 0.4618 - 0.8516i \end{pmatrix}, \quad (13)$$

其相应的本征向量为

$$V_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.2515 \end{pmatrix}, V_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -3.9762 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

相应的本征值为

$$D_1 = -0.5241 - 0.8516i, D_2 = 0.5241 - 0.8516i, \quad (15)$$

要想使任意偏振状态的光经角立方反射镜后偏振状态保持不变, 必须满足  $G_R = M C_R = I$ , 即  $\delta = \pm 180^\circ$ ; 要使出射偏振光的 P、S 分量位相差为  $180^\circ$ , 必须满足  $C_R = 1$ , 即  $\delta = 0^\circ$ 。

#### 3.2 用光学薄膜补偿全内反射(TIR)角立方反射镜的偏振效应<sup>[8]</sup>

对于 YAG 激光而言, 为使其经角立方反射镜后偏振状态保持不变, 可以采用光学薄膜对其偏振特性进行补偿。在此采用二氧化硅和二氧化锆作为高低折射率材料, 折射率分别为  $n_L = 1.45, n_H = 2.0$ , 利用 TFCalc 3.5 膜系设计软件进行了膜系优化设计 (Needle Optimization)。最后得到  $G_R = M C_R = I$  ( $\delta = \pm 180^\circ$ ) 的设计为 GLASS/2.355 H/2.3425 L/2.847 H/2.5775 L/

AIR;  $G_R = MC_R = M(\delta = 0^\circ)$  的设计为 GLASS/1.3603 H/1.1216 L/0.9509 H/AIR。两种设计的反射相移随波长的理论变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。

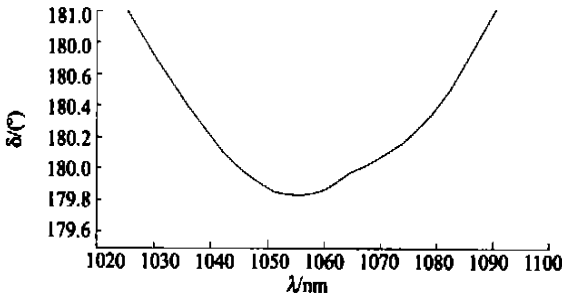


图 4 反射相移随波长的变化曲线  
Fig. 4 Phase shift on reflection

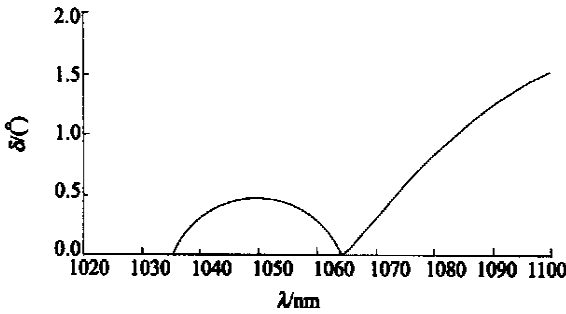


图 5 反射相移随波长的变化曲线  
Fig. 5 Phase shift on reflection

### 4 全介质薄膜中的偏振效应

下面以一双波长全介质高反膜为例对薄膜中的偏振效应进行分析。

对于 YAG 激光( $\lambda = 1\ 065\ \text{nm}$ ) $45^\circ$  入射用高反射镜, 在中心波长  $1\ 065\ \text{nm}$  处高反的同时要求在可见区大约  $500\ \text{nm}$  处有高的反射率, 为此采用了 2:1 的设计膜系<sup>[9]</sup>。膜系结构为 GLASS/700(1.069H2.2928L)<sup>10</sup>1.069H/AIR, 其反射率与相移随波长的变化分别如图 6 和图 7 所示, 可见相移在中心波长  $1\ 065\ \text{nm}$  处为  $193.1^\circ$ , 为使反射光的偏振状态保持不变, 对膜系进行了优化设计(采用 Needle Optimization), 优化后的膜系为 GLASS/700(1.069H2.2928L)<sup>10</sup>1.4666H/AIR, 反射率基本保持不变, 相移随波长的变化曲线如图 8 中的曲线所示, 在中心波长  $1\ 065\ \text{nm}$  处为

$180.3^\circ$ 。

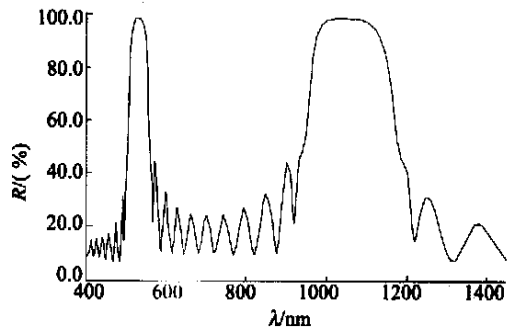


图 6  $45^\circ$  入射  $1\ 065\ \text{nm}$  高反射镜的反射率曲线  
Fig. 6 Reflectance vs wavelength curve for  $1\ 065\ \text{nm}$  HR mirror at  $45^\circ$  incidence

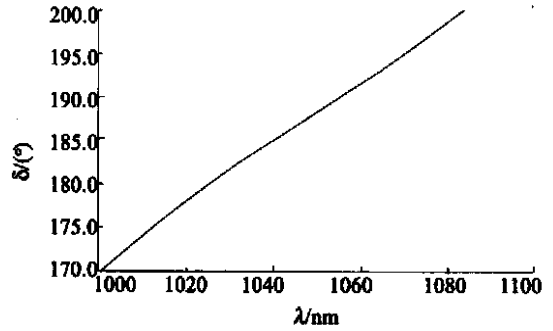


图 7  $45^\circ$  入射  $1\ 065\ \text{nm}$  高反射镜的反射相移曲线  
Fig. 7 Phase shift on reflection vs wavelength curve for  $1\ 065\ \text{nm}$  HR mirror at  $45^\circ$  incidence

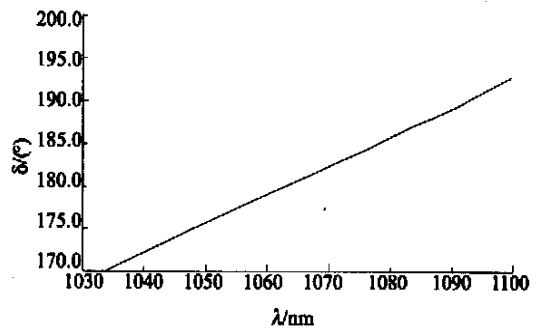


图 8  $45^\circ$  入射  $1\ 065\ \text{nm}$  高反射镜优化后的反射相移随波长的变化曲线  
Fig. 8 Phase shift on reflection vs wavelength curve after optimization for  $1\ 065\ \text{nm}$  HR mirror at  $45^\circ$  incidence

## 5 结 论

在倾斜入射时,光学薄膜可等效为一偏振元件,一方面,可以利用薄膜的这一特性来消除光学系统中不想要的偏振效应以保持光的偏振状态;另一方面,可以利用薄膜的偏振特性来制作薄膜位相延迟片,以代替传统的偏振光学元件如线偏

振器和晶体位相延迟片等,其特性可用琼斯算法进行描述。本文利用琼斯算法分析了全内反射角立方棱镜的偏振特性,并利用光学薄膜的偏振特性设计出了两种膜系,以补偿全内反射角立方棱镜的偏振特性,使得经角立方棱镜后光的偏振状态保持不变;同时对一全介质高反射膜的相移特性进行了分析与优化设计,得到了一全介质偏振保持高反射膜。

## 参考文献:

- [1] WANG Z P, SUN W M, RUAN S L, *et al.* Polarization preserving totally reflecting prisms with a single medium layer [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(13): 2802-2806.
- [2] COJOCARU E. Analytical relations for thin film total internal reflection phase retarders[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(31): 7425-7430.
- [3] 初国强. 大功率 CO<sub>2</sub> 激光器薄膜 1/4 波片的制备及薄膜位相延迟的初步研究[J]. 光学机械, 1991, (2): 47-59.  
CHU G Q. Fabrication of quarter film phase retarder for big power CO<sub>2</sub> laser and study of film retarder[J]. *Optics and Mechanics*, 1991, (2): 47-59. (in Chinese)
- [4] 顾培夫,唐晋发. 薄膜四分之一波片的设计与制备[J]. 仪器仪表学报, 1985, 6(1): 91-96.  
GU P F, TANG J F. Design and fabrication of quarter film phase retarder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1985, 6(1): 91-96. (in Chinese)
- [5] Rabinovitch K. Polarization effects in optical thin films[J]. *SPIE*, 1994, 2253: 89-102.
- [6] DEMCHENKO V A, KOROTAEV V V, PANKOV E V. Polarization properties of reflecting prisms and mirrors[J]. *Sov J Opt Technol*, 1993, 60(6): 423-427.
- [7] LIU J, AZZAM R M A. Polarization properties of corner-cube retroreflectors: theory and experiment[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(7): 1553-1559.
- [8] RABINOVITCH K. The application of thin films technique to compensate polarization effects on total internal reflection [J]. *SPIE*, 1998, 1038: 337-348.
- [9] 孙连春,刘亚辉,白继迅. 倍频反射膜的研究[J]. 光学学报, 1983, 3(5): 476-479.  
SUN L C, LIU Y H, BAI J X. The study of multiple frequency reflection film[J]. *Acta Optics Sinica*, 1983, 3(5): 476-479. (in Chinese)

作者简介:李刚(1977-),男,山东淄博人,中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究方向为薄膜光学。  
联系电话: 0431-5261907, E-mail: ligciomp@yahoo.com.cn