

文章编号:1007-2780(2017)02-0097-07

液晶光谱偏振系统的透射谱研究

甘世奇, 陈向宁*, 刘 鹏, 孙 健

(中国人民解放军装备学院 光电装备系, 北京 101416)

摘要: 为了研究液晶光谱偏振系统的透过率特性, 在可见光波段下的对透射谱分布进行仿真分析。基于 Berreman 矩阵获得液晶旋光器透射光谱, 同时结合 Lyot 型可调谐滤光片以及液晶相位延迟器, 分析了不同偏振态入射光在垂直入射和斜入射两种条件下系统的透射光谱。结果表明, 垂直入射情况下在 540~680 nm 出现谷值, 斜入射情况下在 520~640 nm 出现谷值, 斜入射情况相对垂直入射情况光谱发生一定蓝移。当不同入射光通过系统时, 圆偏振光在谷值区域透过率接近 0, 而线偏振光在谷值区域透过率约为 0.25。通过对液晶偏振光谱系统的透射谱研究, 有利于分析入射光构成, 为深入研究系统以及提高系统性能奠定理论基础。

关键词: 透射谱; 液晶偏振光谱系统; Berreman 矩阵; Lyot 型液晶滤光片

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173202.0097

Transmittance spectrum in the liquid crystal spectro-polarimetric system

GAN Shi-qi, CHEN Xiang-ning*, LIU Peng, SUN Jian

(Department of Photoelectric Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to analyze the transmittance property of the liquid crystal spectro-polarimetric system, the research simulates the distribution of transmittance spectrum in the visible spectrum. The transmittance spectrum of liquid crystal polarizer is obtained based Berreman matrix. Meanwhile, by combining Lyot liquid crystal tunable filter and liquid crystal variable retarder, the transmittance spectrums of system are investigated with different polarization states in normal incidence and oblique incidence. The conclusion is that spectrum of system reaches its vale in 540~680 nm at normal incident angle, but in 520~640 nm at oblique incident angle. Spectral blue shift occurs in the oblique incidence relative to the normal incidence. When different incident light propagating through system, transmittance of circular polarized light is approximately 0 at vale, but linearly polarized light is around 0.25. By investigating the transmittance spectrum of the liquid crystal spectro-polarimetric system, the constitute forms of incident light are analyzed which can lay the foundation for measuring property enhancement and researching further.

Key words: transmittance spectrum; liquid crystal spectro-polarimetric system; Berreman matrix; Lyot liquid crystal filter

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2016-10-25.

基金项目: 国家 863 计划 (No. 2014AAXXX1072E)

Supported by National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (No. 2014AAXXX1072E).

* 通信联系人, E-mail: laser115@163.com

1 引言

自 1808 年 Malus 在试验中发现了光的偏振现象,人类对光的偏振特性与应用研究至今已有 200 多年的历史。随着光电技术的不断发展,单一地对偏振信息的探测已不能满足应用需求,结合光谱信息的成像光谱偏振技术作为一种新的目标探测手段,已成为当前遥感技术领域发展的前沿方向之一。光谱特性不仅可以描述目标运动特性,还可以反映目标组成成分,而偏振特性能够有效地反映代表目标本质属性的表面理化特性。光谱偏振技术就是有效地将二者结合,大大地拓宽探测获取信息的维度,为目标检测、跟踪、识别等提供了一种新的信息,具有巨大的发展空间与广泛的应用领域^[1-2]。

液晶作为兼顾固体各向异性和液体流动性特点的物质,在外界激励下,对电磁波具有独特的响应并且易于被调制,可以较好地应用在偏振光谱成像系统中。光束通过液晶物质的光谱分析,通常采用两种经典的方法:琼斯矩阵法^[3-5]和 Berreman 4×4 矩阵法^[6-10]。两种方法都是将不均匀的液晶材料看做层状均匀薄片,介电常数与传播距离决定了传递矩阵^[6]。与琼斯矩阵法相比, Berreman 4×4 矩阵法由麦克斯韦方程直接推导,并考虑了界面处的多次反射,在薄膜和液晶光学中有着重要地应用。赵静等人基于 Berreman 4×4 矩阵对胆甾相液晶的 Bragg 反射带宽进行仿真研究^[8], Nastishin Yu. A 等人利用扩展 Jones 矩阵对光束斜入射通过液晶的透射光谱进行研究^[4]。除了上述方法,还有其他与液晶反射透射相关的模型被建立^[11-13]。本文基于 Berreman 4×4 矩阵法对液晶旋光器透射谱进行分析,同时结合六级级联 Loya 型可调谐滤波片和液晶相位延迟器,对三者组成的液晶偏振光谱系统在不同角度和偏振态入射光条件下的透射谱进行了研究。通过研究分析,有利于分析入射光构成,为深入研究系统以及提高系统性能奠定理论基础。

2 理论分析

液晶光谱偏振系统结构简图如图 1 所示,液晶器件均由胆甾相液晶构成,其中液晶选偏器以 $\theta = 2\pi f_0 t + \theta_0$ 的扫描速度进行 360° 全角度旋光, θ 为透振方向与 x 轴的夹角, θ_0 为波片的初始角度。系统将液晶相位延迟器固定在快轴与 x 轴夹角 45° 的位置,液晶可调谐滤波器的透射轴方向与 x 轴的夹角为 0° 。

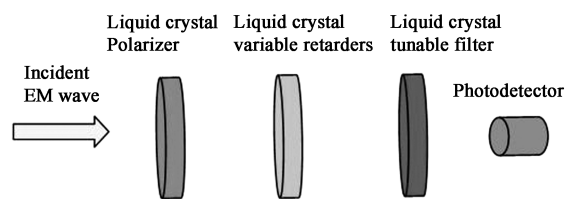


图 1 液晶光谱偏振系统结构示意图

Fig.1 Schematic structure of liquid crystal spectro polarimetric system

2.1 液晶旋光器透射谱

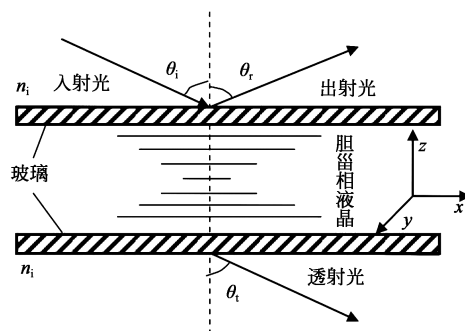


图 2 光在液晶旋光器中传播示意图

Fig. 2 Diagram of light propagation in liquid crystal polarizer

令入射光在 $x-z$ 平面入射,光在液晶旋光器中传播如图 2 所示,假设不存在自由电流和电荷,那么对平面电磁波表达式两边做时间微分并带入麦克斯韦方程组,我们可以得到

$$\frac{d\psi}{dz} = ik_0 \Gamma \psi, \quad (1)$$

其中:光场向量 $\Psi = [E_x \quad \eta_0 H_y \quad E_y \quad -\eta_0 H_x]^T$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} & 0 \\ \Delta_{21} & \Delta_{11} & \Delta_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Delta_{23} & \Delta_{13} & \Delta_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{11} &= -\chi \frac{\epsilon_{13} \cos \varphi - \epsilon_{23} \sin \varphi}{\epsilon_{33}}; \Delta_{12} = 1 - \frac{\chi^2}{\epsilon_{33}}; \\
 \Delta_{13} &= -\chi \frac{\epsilon_{13} \sin \varphi + \epsilon_{23} \cos \varphi}{\epsilon_{33}}; \\
 \Delta_{21} &= \left[\left(\frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}}{2} - \frac{\epsilon_{13}^2 - \epsilon_{23}^2}{2\epsilon_{33}} \right) \cos 2\varphi - \left(\epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{23}}{\epsilon_{33}} \right) \sin 2\varphi \right] + \left(\frac{\epsilon_{11} + \epsilon_{22}}{2} - \frac{\epsilon_{13}^2 + \epsilon_{23}^2}{2\epsilon_{33}} \right); \\
 \Delta_{43} &= - \left[\left(\frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}}{2} - \frac{\epsilon_{13}^2 - \epsilon_{23}^2}{2\epsilon_{33}} \right) \cos 2\varphi - \left(\epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{23}}{\epsilon_{33}} \right) \sin 2\varphi \right] + \left(\frac{\epsilon_{11} + \epsilon_{22}}{2} - \frac{\epsilon_{13}^2 + \epsilon_{23}^2}{2\epsilon_{33}} \right) - \chi^2; \\
 \Delta_{23} &= \left(\frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}}{2} - \frac{\epsilon_{13}^2 - \epsilon_{23}^2}{2\epsilon_{33}} \right) \sin 2\varphi + \left(\epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{23}}{\epsilon_{33}} \right) \cos 2\varphi \\
 \chi &= \frac{k_x}{k_o}
 \end{aligned} \tag{3}$$

上式中 Γ 矩阵称为 Berreman 矩阵,以液晶介电常数为变量同时与 z 值相关。对于任意相邻的液晶层中,在 z 附近产生微小变动 Δz ,由(1)可得:

$$\psi_j(z + \Delta z) = Q_j \psi_j(z), \tag{4}$$

其中:

$$Q_j = \exp(ik_0 \Gamma \Delta z), \tag{5}$$

上下两层玻璃的 Q_b 可以表示为:

$$Q_b = \exp(0.05ik_0 \Gamma_b), \tag{6}$$

其中

$$\Gamma_b = \begin{bmatrix} 0 & 1 - \frac{x^2}{n_0^2} & 0 & 0 \\ n_0^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & n_0^2 - x^2 & 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

根据电磁场边界条件,电磁场在边界的切线分量是连续的,当光通过液晶层薄片时,随 z 的改变而获得连续不同的 Q_j 值,我们可以得到

$$\Psi_T = \Psi_{n+1} =$$

$$Q_b Q_n Q_{n-1} \cdots Q_j \cdots Q_2 Q_1 Q_b \Psi_0 = Q_T \Psi_0, \tag{8}$$

式(8)中 Ψ_T 是透射光场, Ψ_0 是入射光场 Ψ_i 和反射光场 Ψ_r 的叠加。通过计算 Q_T 矩阵,可以获得透射光场,我们可以得到

$$\begin{cases} T_x = [(g_{32} + g_{42})E_x - (g_{12} + g_{22})E_y]/M \\ T_y = [-(g_{31} + g_{41})E_x + (g_{11} + g_{21})E_y]/M \\ R_x = (g_{11} - g_{21})T_x + (g_{12} - g_{22})T_y \\ R_y = (g_{31} - g_{41})T_x + (g_{32} - g_{42})T_y \end{cases}, \tag{9}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 M &= (g_{11} + g_{12})(g_{32} + g_{42}) - (g_{12} + g_{22})(g_{31} + g_{41}) \\
 g_{11} &= \frac{1}{2}(F_{11} + r_x F_{12}) \quad g_{12} = \frac{1}{2}(F_{13} + r_y F_{14}) \\
 g_{31} &= \frac{1}{2}(F_{31} + r_x F_{32}) \quad g_{32} = \frac{1}{2}(F_{33} + r_y F_{34}) \\
 g_{21} &= \frac{1}{2r_x}(F_{21} + r_x F_{22})g_{22} = \frac{1}{2r_x}(F_{23} + r_y F_{24}) \\
 g_{41} &= \frac{1}{2r_y}(F_{41} + r_x F_{42})g_{42} = \frac{1}{2r_y}(F_{43} + r_y F_{44})
 \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)中 F 为 Q 的逆矩阵,此时根据上述计算,我们可以获得的透过率为

$$T = (T_x T_x^* + T_y T_y^*) / (E_x E_x^* + E_y E_y^*). \tag{11}$$

2.2 液晶相位延迟器透过率

液晶相位延迟器的透过率是指在未加电压情况下,透过液晶相位延迟器的光强和加在液晶相位延迟器上的光强之比。液晶相位延迟器件的等效图如3所示,其中玻璃的折射率为1.52,液晶层的 n_e 为1.72,ITO的折射率为1.8。

根据菲涅尔公式,光正入射时的透射率:

$$T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \tag{12}$$

分别计算每一层界面的透过率,我们可以得到整个器件在没有镀增透膜的情况下的理论透射率为:

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 = 0.9027. \tag{13}$$

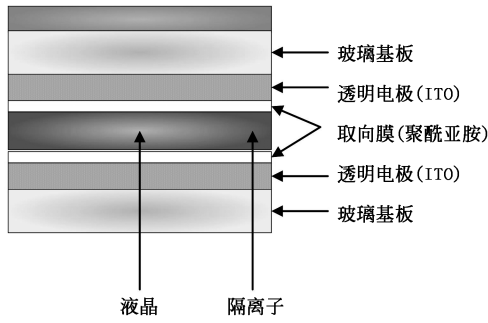


图 3 液晶相位延迟器结构图

Fig.3 Structure diagram of liquid crystal variable retarder

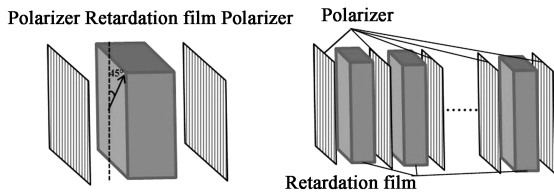
通过以上数据可以看出光束在空气与玻璃表面的反射损耗较大,可以通过在上下玻璃基板的外表面镀增透膜来减少反射。通过镀增透膜,玻璃基板透过率可以达到 99.99%,较大地增大了透过率。两玻璃基板内部所夹各层总透过率较大,反射损耗小,这样镀增透膜后液晶器件的理论透过率可达 97% 以上,即使实际器件中的散射、吸收等作用造成的光损失达到约 10%,也能实现透过率大约 90% 左右。

2.3 液晶可调谐滤波器透射谱

正单级 Lyot 型滤光片结构如图 4(a) 所示,其中前后偏振片偏振方向平行,中间相位延迟波片与偏振片透振方向夹 45° 。假设相位延迟波片 o 光和 e 光折射率差为 Δn ,厚度为 d ,当波长为 λ 的光通过该 Lyot 滤光片时,透过率 T 为

$$T = \cos^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \Delta n d\right). \quad (14)$$

在工程应用中,采用按照一定相位组合级联上述单级 Lyot 型滤光片的方式,如图 4(b) 所示。级联 Lyot 型滤光片由 $N+1$ 个偏振方向平行的偏振片(或偏振棱角)以及 N 个与偏振方向夹角



(a) 单级 Lyot 型滤光片 (b) 级联 Lyot 型滤光片

图 4 Lyot 型滤光片结构示意图

Fig.4 Structure diagram of Lyot liquid crystal tunable filter

45° 的延迟波片组成,级联结构中间的偏振片可以视为前一个延迟波片的检偏器也可以视作后一个延迟波片的起偏器。

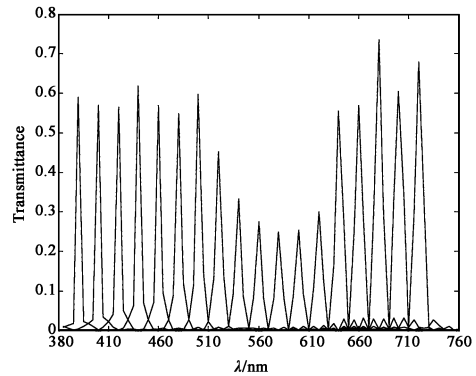
根据级联器件的透射率计算方法,我们可以得到级联 Lyot 型滤光片的透过率为

$$\begin{cases} T = T_1 T_2 \dots T_N = \cos^2 \frac{\Gamma_1}{2} \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} \dots \cos^2 \frac{\Gamma_N}{2} \\ \Gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d_i, i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

3 仿真分析

液晶滤波片各级玻片高透过率且透过率能达到 0.95,并以 20 nm 光谱波段为步长,取六级 Lyot 型玻片级联。令液晶旋光器的 $n_o = 1.52$, $n_e = 1.82$,螺距 $p = 0.366 \mu\text{m}$,液晶厚度为 $h = 10 \mu\text{m}$,上下层玻璃厚度为 $h_b = 0.05 \mu\text{m}$,液晶层每层厚度 $h_i = 0.01 \mu\text{m}$,并假设液晶相位延迟器对光谱影响忽略不计。对不同偏振态入射光分别以 30° 和垂直入射两种情况进行仿真分析。

当入射光为水平 x 轴线偏振光并分别以 30° 入射角和垂直入射时透射光谱如图 5 和图 6 所示。从图 5 中可以看出,六级级联 Lyot 型滤波片半高峰宽度为 9 nm,斜入射时在可见光波段透过率在 0.25~0.75 范围内,且在不同波段透过率不同,其中在 520~640 nm 范围内透过率较低。与斜入射相对比,垂直入射透射谱如图 6 所示,与斜入射相比,垂直入射透过率在低频范围内有一定的提高,透射谱谷值区域出现在 560~680 nm 范围,与斜入射相比发生一定红移,不同频率透过率均不同。

图 5 水平 x 轴线偏振光以 30° 入射系统的透射光谱Fig.5 Transmittance spectrum of horizontal linear polarization light at 30° incident angle

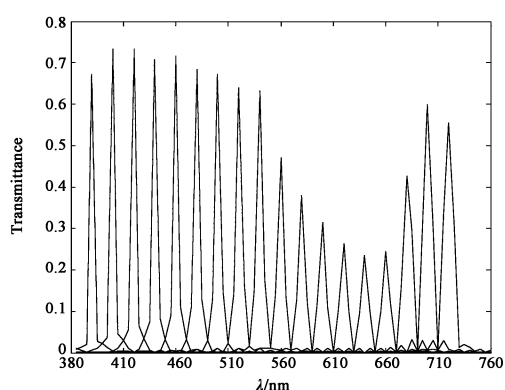


图6 水平 x 轴线偏振光垂直入射系统的透射光谱
Fig.6 Transmittance spectrum of horizontal linear polarization light at normal incident angle

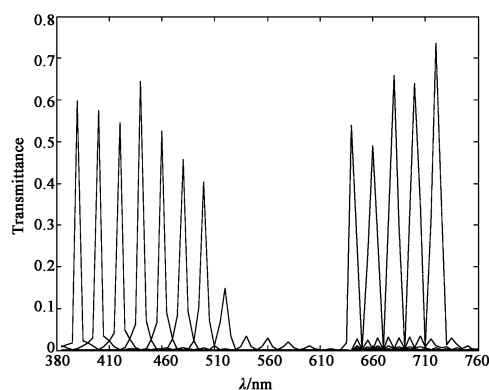


图7 右旋圆偏振光以 30° 入射系统的透射光谱
Fig.7 Transmittance spectrum of right circular polarization light at 30° incident angle

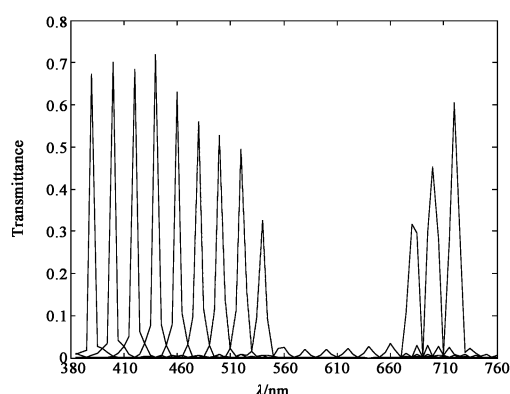


图8 右旋圆偏振光垂直入射系统的透射光谱
Fig.8 Transmittance spectrum of right circular polarization light at normal incident angle

当入射光为右旋圆偏振光并分别以 30° 入射角和垂直入射时透射光谱如图7和图8所示,通

过对比可以看出,斜入射和垂直入射的透过率在 $0\sim 0.75$ 范围内且不同光谱波段波动较大,当斜入射时,如图7所示,透射谱在 $520\sim 640$ nm范围内出现谷值,透过率接近0。当垂直入射时,如图8所示,此时透射谱在 $540\sim 680$ nm范围内,相比斜入射发生一定程度红移,且光谱范围有所增加,透过率接近为0。

令入射光为平均偏振态入射光,其 Stokes 矢 $\vec{s}$ 为 $\left[1, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}}\right]$, 图9和图10分别表示该入射光以 30° 入射系统和垂直入射系统的透射光谱。相比于线偏振光和圆偏振光,平均偏振态入射光既包含线偏振分量又包含圆偏振分量且为完全偏振光,不论垂直入射还是斜入射,透过率分布介于前两种偏振光中间。斜入射时,透射率谷值出现在 $520\sim 640$ nm范围,透过率约为0.25,基本与线偏振光谷值相同;垂直入射时,透射率谷值

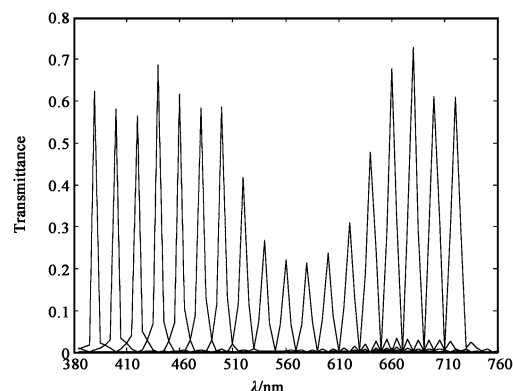


图9 平均偏振态入射光以 30° 入射系统的透射光谱
Fig.9 Transmittance spectrum of average polarization light at 30° incident angle

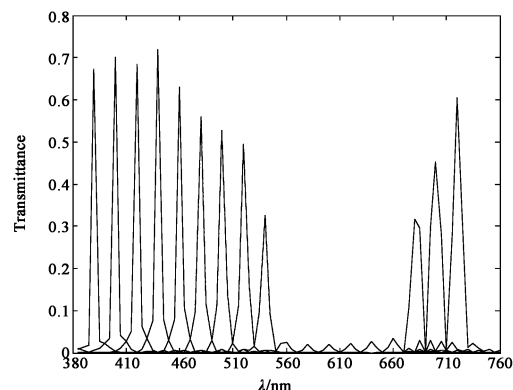


图10 平均偏振态入射光垂直入射系统的透射光谱
Fig.10 Transmittance spectrum of average polarization light at normal incident angle

同样发生红移动,谷值区域出现在 540~680 nm 范围内,透过率约为 0.25。

4 结 论

利用 Berreman 矩阵对液晶旋光器透过率进行计算,结合 Lyot 型可调谐液晶滤波片的透射谱和液晶相位延迟器的透过率,对系统整体的透射谱进行分析。仿真结果表明:1)在可见光范围内,液晶偏振光谱系统不同波段的透过率不同,不同偏振态入射光透过率在 0~0.75 范围内浮动。2)对于垂直入射和 30°入射角斜入射两种情况,斜入射透射率谷值出现在 520~640 nm 范围,垂直

入射谷值出现在 540~680 nm 范围,垂直入射相对于斜入射发生一定红移。3)线偏振光通过系统后,谷值区域的透过率约为 0.25,而圆偏振光在谷值区域接近 0,平均偏振态入射光透过率大小介于二者之间。利用 Berreman 4×4 矩阵法,从麦克斯韦方程组出发,分析了液晶光谱偏振系统的透射谱,在不同波段下,获得不同偏振态入射光以垂直和斜入射两种情况的透过率,有利于进一步分析光源构成,为更加深入研究该系统以及提高系统性能奠定基础。此外,该分析方法也验证了 Berreman 4×4 矩阵法对于分析各向异性复杂液晶系统光学性质的可行性,为研究光在液晶器件传输特性提供了新思路。

参 考 文 献:

- [1] ZHAO Y, ZHANG L, ZHANG D, *et al.* Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(8): 855-866.
- [2] ZHAO Y Q, GONG P, PAN Q. Object Detection by spectropolarimetric imagery fusion [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, 46(10): 3337-3345.
- [3] JONES R C. A new calculus for the treatment of optical systems: III. The sohncke theory of optical activity [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, 31(7): 500-503.
- [4] NASTISHIN Y A, NASTYSHYN S Y. Explicit representation of extended Jones matrix for oblique light propagation through a crystalline slab [J]. *Ukr. J. Phys. Opt.*, 2011, 12(4): 191-201.
- [5] YANG D K, MI X D. Modelling of the reflection of cholesteric liquid crystals using the jones matrix [J]. *J. Phys. D*, 2000, 33(6): 672-676.
- [6] BERREMAN D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, 62(4): 502-510.
- [7] WOHLER H, BECKER M E. Numerical modelling of LCD electro-optical performance [J]. *Opto-Electron. Rev.*, 2002, 10(1): 23-33.
- [8] WÖHLER H, HAAS G, FRITSCH M, *et al.* Faster 4×4 matrix method for uniaxial inhomogeneous media [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, 5(9): 1554-1557.
- [9] 赵静,李庆丽,许利军.基于 Berreman 4×4 矩阵对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的模拟研究[J].液晶与显示,2015,30(5):777-783.
ZHAO J, LI Q L, XU L J. Simulation research on Bragg reflection bandwidth of cholesteric liquid crystal based on Berreman 4×4 matrix [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 777-783. (in Chinese)
- [10] LU K H, SALEH B E A. Reducing berreman's 4×4 formulation of liquid-crystal-display optics to 2×2 Jones vector equations [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(22): 1557-1559.
- [11] HONG Q, WU T X, WU S T. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method [J]. *Liq. Cryst.*, 2003, 30(3): 367-375.
- [12] CHRISTOU M A, POLYCARPOU A C, PAPANICOLAOU NC. Modal analysis and solution of electromagnetic wave propagation in cholesteric liquid crystal cells [C]//*Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. Chicago, IL, USA: IEEE, 2012: 1-2.
- [13] 杨傅子.从晶体光学到液晶光学—液晶物理的光学研究方法进展[J].液晶与显示,2016,31(1):1-39.
YANG F Z. From crystal optics to liquid crystal optics-the development of optical techniques for studying liquid crystal physics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 1-39. (in Chinese)

作者简介:甘世奇(1991—),男,新疆奇台人,硕士,2010年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2010至今就读于中国人民解放军装备学院光学工程研究生,主要液晶器件的偏振成像方面的研究。E-mail:15134556671@163.com.
陈向宁(1962—),男,江西崇仁人,工学博士,现任解放军装备学院光电装备系教授,博士生导师,国家遥感中心遥感软件测评专家,从事光学工程学科光学遥感领域研究。E-mail:laser115@163.com