

文章编号:1007-2780(2010)04-0538-04

胆甾型液晶彩色滤光片分析

何正红^{1,2}, 叶志成^{1*}, 苏翼凯¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240, E-mail:hezhenho@sjtu.edu.cn;
2. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 计算了掺有周期性介质层的胆甾型液晶 (CLC) 膜的反射光色品值, 分析了该膜用于滤光片的可行性。首先利用 Jones 矩阵法对其反射光谱进行了数值计算, 然后分析和比较了掺入周期性介质前后液晶膜的 CIE-1931 色品图。从数值计算可知, 在适当的液晶和介质厚度比例下, 改变斜入射角度对掺有周期性介质层的反射式胆甾型液晶滤光片的反射光色品值改变不大, 可以起到窄带滤光片的作用。

关 键 词: 滤光片; 色品图; 胆甾型液晶; Jones 矩阵
中图分类号: O753⁺. 2 **文献标识码:** A

Analysis of Cholesteric Liquid Crystal Color Filter

HE Zheng-hong^{1,2}, YE Zhi-cheng^{1*}, SU Yi-kai¹

(1. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China, E-mail:hezhenho@sjtu.edu.cn;
2. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The reflection chromaticity of cholesteric liquid crystals (CLCs) sandwiched periodic isotropic layers (PILs) was calculated, and the potential application of this structure as reflective color filters was discussed. First, the reflection spectra was calculated by Jones matrix method, and then the CIE-1931 chromaticity diagrams for CLC sandwiched with and without PILs were drawn. It is found that the reflection chromaticity can be insensitive to the incident angle with proper thickness ratio of CLC to PILs. This structure can be used as color filters.

Key words: filter; chromaticity diagram; cholesteric liquid crystal; Jones matrix

1 引 言

彩色滤光片已广泛用于平板显示、光通讯等领域,但是传统的吸收型滤光片有 60% 的光损耗,成为提高液晶显示光能利用效率的瓶颈。反射式滤光片是未来的研究方向,而胆甾液晶 (CLC) 源于其结构而产生的独有特性引起了众多

研究者的兴趣^[1-4], 利用其独有特性有可能制备出反射式的滤光片。CLC 最重要的是其选择性反射特性, 即与胆甾液晶螺旋轴具有同一旋光方向的圆偏振光被反射, 而其他光可以透过。由于这个滤光体系不吸收光线, 所以有可能用其制作出高光能利用效率的彩色滤光片或者偏振片。

本文通过向胆甾型液晶中掺入周期性各向同

收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-05-08
基金项目: 上海交通大学晨星计划 (No. A2687B); 国家自然科学基金 (No. 60906039); 上海市科学基金 (No. 09ZR14148000); 上海市曙光工程 (No. 09SG13)
作者简介: 何正红 (1973—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为液晶光子晶体。
* 通讯联系人, E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn

性介质层的方法设计了反射式滤光片,利用 Jones 矩阵计算了正入射和斜入射情况下该滤光片在可见光范围内的反射率,绘制出了相应的 CIE-1931 色品图,并对计算结果进行了分析和讨论。

2 胆甾液晶彩色滤光片设计原理

胆甾液晶的反射遵从布拉格定律即反射光波长^[5-6]

$$\lambda_{\varphi} = \lambda_0 \cdot \cos[\sin^{-1}(\sin\phi/\bar{n})] \quad (1)$$

其中 λ_0 是入射光线平行于胆甾液晶螺旋轴方向 ($\varphi=0$) 时反射的波长, $\bar{n}$ 是平均折射系数,随着 φ 增大,反射光移向短波长。对于常规入射,CLC 的最大选择反射波长由式(2)给出:

$$\lambda_0 = \bar{n} \cdot p \quad (2)$$

这里 $\bar{n}$ 是平均折射系数, p 是胆甾液晶螺距。 $\bar{n}$ 是液晶分子的一个固有属性,但 p 随温度、电场或磁场强度等变化,因此有可能通过调节 p 来选择

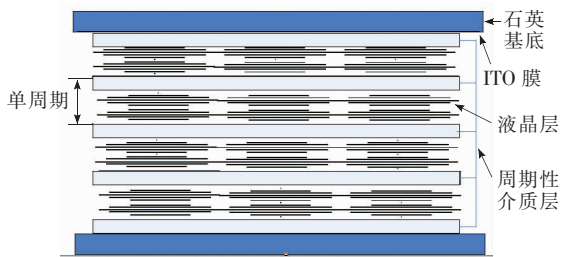


图 1 掺入周期性介质胆甾型液晶滤光片示意图

Fig. 1 Schematic structure of cholesteric liquid crystals sandwiched isotropic defect layers periodically

反射色^[7]。本文通过向胆甾型液晶中掺入周期性各向同性介质层的方法设计了胆甾液晶反射式彩色滤光片,所设计的彩色滤光片结构如图 1 所示。

3 滤光片反射光谱的数值计算

目前对 CLC 膜透、反射特性的数值计算方法主要有 Berranmn 矩阵法、Jones 矩阵法和有限元法等。本文利用 Jones 矩阵法并结合 MATLAB 程序对掺有周期性介质层的反射式胆甾液晶滤光片反射光谱进行数值计算。

3.1 琼斯矩阵一般形式^[8]

一般情况下,液晶层可以被当作 N 层双折射率介质层,每一层的光轴相对于相邻层的光轴有一微小的扭曲。现假设 N 足够大,以便于在每一层内其光轴可以认为是一常量。现在在液晶中掺入了等厚的各向同性介质层,该问题就演变成了光在单轴晶体中的传播问题。忽略两个单轴晶体的界面和边界匹配的问题,考虑改变各向同性层的折射率,光的折射可以用矩阵形式写成:

$$\begin{bmatrix} E_e \\ E_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(p,e) & R(s,e) \\ R(p,o) & R(s,o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

在式(3)中, E_p 、 E_s 是各向同性介质中电场分量的 p 向量和 s 向量, E_e 、 E_o 是单轴晶体中的 e 向量和 o 向量。 $R(p,e)$ 、 $R(s,e)$ 、 $R(p,o)$ 、 $R(s,o)$ 分别是相应向量的传播系数。所以,从各向同性介质到单轴晶体又到另一各向同性介质的光波传矩阵为:

$$\begin{bmatrix} E'_p \\ E'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(e,p) & R(o,p) \\ R(e,s) & R(o,s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(-ik\sigma_e h) & 0 \\ 0 & \exp(-ik\sigma_o h) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(p,e) & R(s,e) \\ R(p,o) & R(s,o) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

此时 J 是琼斯矩阵:

$$J = R_2 G R_1 \quad (5)$$

在方程(3)中, $R(e,p)$ 、 $R(o,p)$ 、 $R(e,s)$ 、 $R(o,s)$ 是从单轴晶体到各向同性介质的传播系数; σ_e 和 σ_o 是 o 光和 e 光在各向异性介质中的相位延迟; h 是层的厚度; E_p 、 E_s 是出射各向同性介质里的 p 、 s 向量的电场分量。矩阵里的系数 R_1 、 R_2 为:

$$\begin{aligned} R(p,e) &= R(e,p) = p \times e \\ R(s,e) &= R(e,s) = s \times e \\ R(p,o) &= R(o,p) = p \times o \\ R(s,o) &= R(o,s) = s \times o \end{aligned} \quad (6)$$

因此 $R_1 = R_2$ 。

3.2 斜入射情况下的琼斯矩阵^[8]

把液晶看成是一叠由 N 层单轴晶体组成的,则总的传播矩阵为:

$$J = J_n J_{N-1} \cdots J_n \cdots J_3 J_2 J_1$$

$$J_n = [R_2 G R_1]_n \quad (7)$$

并有

$$\begin{bmatrix} E_{Np} \\ E_{Ns} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_{1p} \\ E_{1s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

为不失一般性,选取笛卡尔坐标系,使入射光矢 K_i 位于 XZ 平面,并且 XY 平面平行于液晶底面。

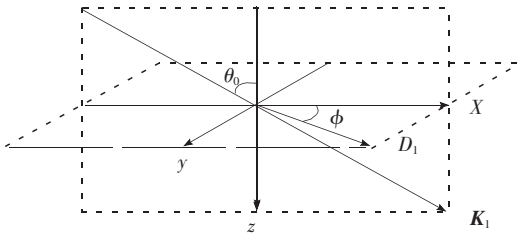


图 2 入射光的几何图
Fig. 2 Geometry of the input light

图 2 表示了该几何关系。

3.3 反射光色品值计算

由物理实验基础引入三刺激值 R 、 G 、 B ：

$$R = \int_{\lambda} kS(\lambda)r(\lambda)d\lambda \tag{9a}$$

$$G = \int_{\lambda} kS(\lambda)g(\lambda)d\lambda \tag{9b}$$

$$B = \int_{\lambda} kS(\lambda)b(\lambda)d\lambda \tag{9c}$$

即由 R 、 G 、 B 构成一个颜色空间。式中, $S(\lambda)$ 为待测光的光谱功率分布; $r(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ 、 $b(\lambda)$ 分别为标准观察者的光谱三刺激值。反射光三刺激值表示为：

$$R' = \int_{\lambda} kR(\lambda)S(\lambda)r(\lambda)d\lambda \tag{10a}$$

$$G' = \int_{\lambda} kR(\lambda)S(\lambda)g(\lambda)d\lambda \tag{10b}$$

$$B' = \int_{\lambda} kR(\lambda)S(\lambda)b(\lambda)d\lambda \tag{10c}$$

其中 $R(\lambda)$ 为光射到液晶表面上的反射率。由 R' 、 G' 、 B' 可导出色品坐标：

$$r' = R'/(R' + G' + B') \tag{11a}$$

$$g' = G'/(R' + G' + B') \tag{11b}$$

$$b' = B'/(R' + G' + B') \tag{11c}$$

由上述结果可以计算出 CIE-1931 色品图中对应的 x 、 y 值。

4 结果与讨论

假设胆甾型液晶是右手螺旋, 入射光分别为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 首先计算正入射情况下可见光范围内的透射率。在没有掺入人周期介质层情况下, 左旋圆偏振光透射, 右旋圆偏振光出现部分反射, 就是所谓的“光子晶体禁带”。然后改变入射角度, θ_0 从 0 增加到 $\pi/4$, 分别计算

了不同入射角度情况下的反射率, 并绘制出相应色品图, 发现在合适的厚度情况下, 胆甾型液晶的色差能得到减弱。在图 3 的色品图中, 单个周期内的液晶层厚度为 $0.5p$, $p=0.346\text{ }\mu\text{m}$, 入射光为标准白光。图 3(a) 为没有掺入介质层时可见光范围内的色品图。当入射角增加时, 反射光开始变成蓝光, 之后变成绿光。图 3(b) 为掺入周期性介质层后的色品图, 反射光停留在红光区域, 改变入射角度对反射光的色品值影响较小。

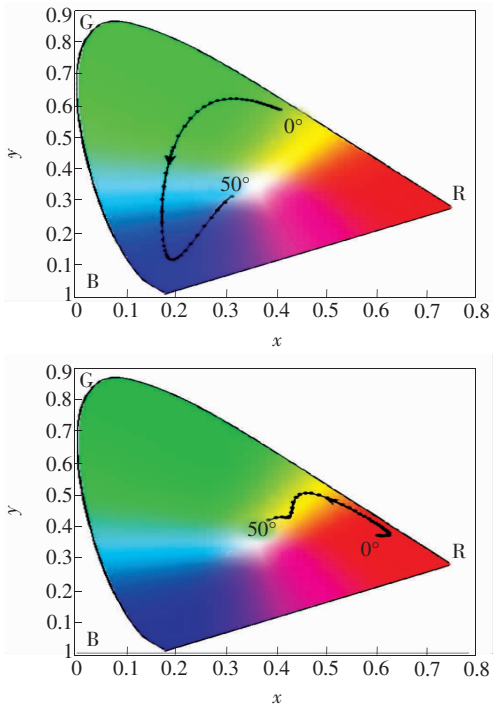


图 3 系统的反射光 CIE-1931 色品图, 连续线代表入射角度逐渐增加的反射光线色品, 箭头方向代表入射角度增加的方向。(a) $d=0$; (b) $d=0.1p$ 。

Fig. 3 CIE-1931 chromaticity diagram of the system, the continuous lines represent the trajectory of the reflected light chromaticity as the incidence angle is varied, the arrow shows the direction of increasing incidence angle. (a) $d=0$; (b) $d=0.1p$ 。

5 结 论

采用向胆甾型液晶中掺入周期性各向同性介质层的方法设计了反射式滤光片, 利用 Jones 矩阵计算了正入射和斜入射情况下该滤光片在可见光范围内的反射率, 绘制出了相应的 CIE-1931 色品图。研究表明, 适当地掺入周期性介质层, 入射角度对滤光片反射光的色品值影响不大, 所设计的反射式滤光片适合用做特定波长的滤光片。

参 考 文 献:

[1] Moriya N, Uchida T, Matsushima K. 用胆甾液晶制备的新型宽视角透过式彩色滤光片[J]. 现代显示,2004,41(1):42-44.

[2] 宋立涛,何杰,王华磊,等. 液晶利奥滤光片光学特性的数值分析[J]. 科学技术与工程,2009,9(1):16-19.

[3] 宋立涛,何杰,王华磊,等. 多级可调谐液晶滤光片的设计[J]. 科学技术与工程,2009,9(4):852-856.

[4] 何杰, 宋立涛,罗崇泰,等. 平行向列相液晶法-珀滤光片的光学特性分析[J]. 光电工程,2007,34(10):114-117.

[5] 王谦,余飞鸿,潘为民,等. 扭曲向列型 LCD 电光特性计算的理论研究[J]. 光子学报,2000, 29(4):330-339.

[6] 张大勇,李剑锋,刘仓理,等. 手性液晶滤光片研究[J]. 应用激光,2005,5(25):316-318.

[7] Yu F H, Kwok H S. Comparison of extended Jones matrices for twisted nematic liquid crystal displays at oblique angles of incidence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999,11(16):2772-2780.

[8] 邓罗根,赵找栗. 横向电场对平面织构胆甾相液晶螺距及反射特性的影响[J]. 物理学报,2009,58(11):7773-7780.



包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	名称	符号	SI 导出单位
			用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1 rad=1 m/m=1
立体角	球面度	sr	1 sr=1 m ² /m ² =1
频率	赫[兹]	Hz	1 Hz=1 S ⁻¹
力	牛[顿]	N	1 N=1 kg·m/S ²
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	1 Pa=1 N/m ²
能[量],功,热量	焦[耳]	J	1 J=1 N·m
功率,幅[射能]通量	瓦[特]	W	1 W=1 J/S
电荷[量]	库[仑]	C	1 C=1 A·S
电压,电动势,电位	伏[特]	V	1 V=1 W/A
电容	法[拉]	F	1 F=1 C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω=1 V/A
电导	西[门子]	S	1 S=1 Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1 Wb=1 V·S
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	1 T=1 Wb/m ²
电感	亨[利]	H	1 H=1 Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	1 ℃=1 K
[光]通量	流[明]	lm	1 lm=1 cd·Sr
光照度	勒[克斯]	lx	1 lx=1 lm/m ²
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	1 Bq=1 S ⁻¹
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	1 Gy=1 J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	1 Sv=1 J/kg