

文章编号:1007-2780(2018)02-0101-08

蓝相液晶的旋光特性与消除

马红梅, 孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要:为了实现蓝相液晶中旋光能力性能的模拟计算,建立了蓝相液晶的一维模型,对蓝相液晶在正交线偏光片和正交圆偏光片下的旋光能力进行了模拟计算,并研究了蓝相液晶对外界环境光的反射特性。首先对胆甾相液晶的旋光特性进行了理论和模拟计算结果之间的对比。然后对比蓝相液晶与胆甾相液晶的结构特点,建立了高倾角的胆甾相液晶模型来作为蓝相液晶的一维模型,高倾角的角度由各向同性相的序参数来得到。利用该一维模型模拟计算了蓝相液晶的旋光特性,与实验结果相符,然后模拟计算了大螺距蓝相液晶在正交线偏光片和正交圆偏光片下的透过率,最后模拟计算了这两种情况下蓝相液晶对外界环境光的反射特性。模拟结果表明:使用正交圆偏光片,可以有效地消除大螺距蓝相液晶在可见光范围的旋光特性和 Bragg 反射,可见光整体旋光角度从 5.2° 降低到 0.06° 。结果将对提高蓝相液晶显示器的显示特性有很大的帮助。

关键词: 蓝相液晶; 旋光能力; 布拉格反射; 圆偏光片

中图分类号: TN27; TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183302.0101

Optical rotatory of blue phase liquid crystal and its elimination

MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to realize the simulation of optical rotatory of blue phase liquid crystal, the one-dimensional model is established, and the optical rotatory of blue phase liquid crystal between crossed linear or circle polarizers is simulated, and the reflection is investigated. The theoretical and simulated results of optical rotatory of cholesteric liquid crystal are compared. Compared with the structures of cholesteric and blue phase liquid crystal, the cholesteric liquid crystal with high tilt angle is founded as the one-dimensional model of blue phase liquid crystal, and the tilt angle can be obtained from the order parameter of isotropic phase. Based on the one-dimensional model, the simulated result of optical rotatory of blue phase liquid crystal agrees well with the experimental results. The transmittances of blue phase liquid crystal with large pitch between the crossed linear or circle polarizers are simulated, and the reflection for the ambient light is also simulated. The results show that the circle polarizers can effectively eliminate the optical rotatory and Bragg reflection of large pitch blue phase liquid crystal in visible light range, the average rotatory angle in the whole visible light range is less than 0.06° from 5.2° for crossed linear polarizers. The results will have significant effect on improving the display characteristics of blue phase liquid crystal display.

收稿日期: 2017-07-05; **修订日期:** 2017-08-12.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61475042, No.11304074)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61475042, No.11304074)

* 通信联系人, E-mail: sun_yubao@163.com

Key words: blue phase liquid crystal; optical rotatory; Bragg reflection; circle polarizer

1 引言

早在 1888 年,莱尼泽尔(L. Renitzer)发现胆甾醇材料从各向同性相状态降温的过程中,出现蓝色闪烁^[1],后来把这一现象对应的液晶相态称为蓝相。后来的研究中,确定蓝相液晶具有三维周期性结构和可见光范围内的 Bragg 反射特性,但整体光学效应为光学各向同性。蓝相液晶状态最初仅处于低于各向同性相温度几 K 的温度范围内^[2],在很长的时间内,关于蓝相液晶的研究,仅是在研究其中的晶格结构、电场致克尔效应和响应时间等内容^[3-7],但由于其存在温度范围实在太窄,没有被应用到液晶显示器中。2002 年, Kikuchi 教授提出使用聚合物稳定蓝相液晶结构,成功获得了温度范围超过 60 K 的稳定蓝相结构^[8],随后多年中,人们致力于提高电光克尔常数^[9-12],终于在 2008 年三星公司展出了第一台蓝相液晶显示器样机,并由此开始了蓝相液晶显示器的热点研究。

蓝相液晶显示器的优点已经获得了人们的认可,这些优点包括:(1)响应时间为亚毫秒量级,比向列相液晶显示器的响应时间至少快 10 倍;(2)制作工艺中不需要制作取向层,从而减少了取向层摩擦造成的缺陷;(3)暗态的光学各向同性和开态的多畴结构,使其具有视角宽而且对称的特点;(4)当液晶层厚度超过 5 μm ,透过率与液晶层厚度的关系不再敏感,从而降低液晶盒制作的难度。对于蓝相液晶显示器的研究主要为改进蓝相液晶显示器的缺点,这些缺点包括:(1)驱动电压高;(2)磁滞效应;(3)相对低的光利用率;(4)残留的双折射率^[13-19]。驱动电压高也是造成磁滞效应的主要因素,而驱动电压高与液晶材料的螺距和介电各向异性相关,残留的双折射率一般为高驱动电压作用后产生的结果。相对低的光利用率与器件的结构相关,所以通过改进器件结构来提高光利用率。对蓝相液晶显示器而言,高的驱动电压是造成磁滞效应和残留双折射率的主要原因,目前介电各向异性超过 400 的液晶材料依然不能够将驱动电压降到足够低,因此有必要通过增大液晶材料的螺距来降低驱动电压。但是较大的螺

距带来的可见光范围内的 Bragg 反射和旋光效应,使得液晶显示器的暗态存在漏光和降低器件的对比度。

本文中,我们通过建立蓝相液晶的一维模型,模拟计算了蓝相液晶在较大螺距情况下的旋光效应和 Bragg 反射特性,获得了在正交线偏光片和正交圆偏光片情况下,蓝相液晶的旋光特性和 Bragg 反射特性。

2 旋光效应

2.1 胆甾相液晶中的旋光效应

关于胆甾相液晶旋光能力的理论文献^[20, 21]中,所给出的旋光能力的方程为:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\frac{2\pi}{p} \frac{\alpha^2}{8\lambda'^2(1-\lambda'^2)}, \quad (1)$$

其中: p 为胆甾相液晶的螺距, $\lambda' = \lambda/(p\sqrt{\epsilon})$,由 $\lambda' = 1$ 发生 Bragg 反射,得知 $\sqrt{\epsilon}$ 为平均折射率,文中也定义了 $\epsilon = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 和 $\alpha = (\epsilon_2 - \epsilon_1)/(2\epsilon)$ 。

ϵ_1 和 ϵ_2 为液晶分子的短轴和长轴方向的介电常数,光频下即为折射率的平方 $\epsilon_1 = n_o^2$ 和 $\epsilon_2 = n_e^2$ 。因此上式写为我们常用的参数表达式为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{p} \frac{(n_e + n_o)^2}{(n_e^2 + n_o^2)} \frac{\Delta n^2}{8(\lambda/\lambda_B)^2[(\lambda/\lambda_B)^2 - 1]}, \quad (2)$$

选取一般胆甾相液晶使用的材料参数: $p = 360 \text{ nm}$, $n_e = 1.7$, $n_o = 1.5$, $\Delta n = 0.2$,则有 $\lambda_B = 576 \text{ nm}$,使用 TechWiz 1D 软件进行模拟计算,并与公式计算结果相比较。将以上材料参数代入式(2),对于 500 nm 的光而言,旋光率为

$$\varphi = 1.938 \frac{1}{(\lambda/\lambda_B)^2[(\lambda/\lambda_B)^2 - 1]} = -10.4344^\circ/\mu\text{m}(500 \text{ nm}), \quad (3)$$

模拟计算中使用的液晶层厚度为 3.6 μm ,分层数为 3 600 层,模拟计算结果如图 1 所示,横坐标为出射面的偏光片(检偏器)透光轴的方位角度,完全透光的角度即为旋光角度,从图中可以看到旋光角度为 -37.5° ,计算得到旋光度为: $\varphi = -10.417^\circ/\mu\text{m}(500 \text{ nm})$,与(3)式理论计算结果相近。

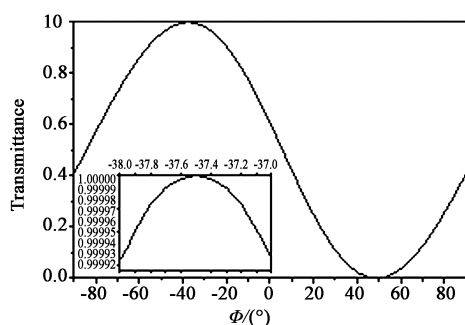


图1 胆甾相液晶的透过率与检偏器的方位角度之间的关系

Fig.1 Relationship of transmittance of cholesteric liquid crystal and azimuthal angle of analyzer

2.2 蓝相液晶中的旋光效应

对于蓝相液晶的旋光能力,文献[22]也对其做了详细的实验研究和计算拟合,所用拟合公式为:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{(\Delta n_s)^2}{\lambda^2 / \lambda_B^2 - 1}, \quad (4)$$

其中: Δn_s 为蓝相液晶材料的电场诱导饱和双折射率, λ_B 为Bragg反射波长, λ 为入射光波长, φ_0 为拟合参数。如图2中所测得的实验数据,得到不同Bragg反射波长情况下的该类型蓝相液晶的旋光能力拟合参数 φ_0 为 $3.12^\circ/\mu\text{m}$ 。对于蓝相液晶材料,如图2所给出不同波长光的旋光能力与Bragg反射波长之间的关系,可以获得这几个波长情况下的双折射率分别为:0.205(457 nm), 0.195(517 nm)和0.183(633 nm)。

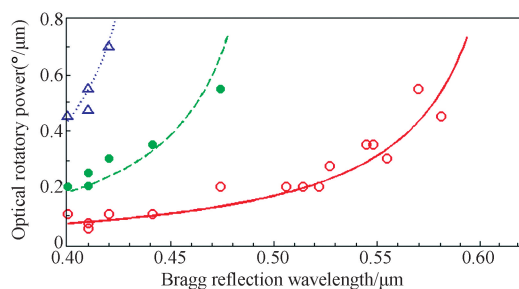


图2 Bragg反射波长与旋光能力的关系。红色圆圈为波长633 nm的光测量的结果,绿色圆点为514 nm的光测量的结果,蓝色三角为457 nm的光测量的结果^[22]

Fig.2 Relationship of Bragg reflection wavelength and the optical rotatory. Red circles is for 633 nm, green dots is for 514 nm, and blue triangles is for 457 nm

蓝相液晶与胆甾相液晶具有非常多的相似性,都具有螺旋结构和Bragg反射,不同之处在于胆甾相液晶的液晶分子垂直于单一螺旋轴,蓝相液晶中的液晶分子排列为双螺旋结构。双螺旋结构的蓝相液晶相比于单螺旋轴的胆甾相液晶来说,要复杂得多。从宏观角度上来看蓝相液晶,则通常认为其是光学各向同性材料,即液晶的序参数为零。假定以电场方向为基准方向,取垂直于电场方向的平面,在该平面上的任一方向折射率都是相同的,在电场强度为零时,该折射率为液晶的平均折射率。在此平面内任取一个方向,作为该平面内所有液晶分子的平均倾角的投影方向,不同的平面之间,投影方向呈现出单螺旋轴的变化。则有液晶分子的平均倾角在零电场强度情况下,可以由序参数方程^[23]来计算得到

$$S=0=\frac{1}{2}\langle(3\cos^2\theta-1)\rangle, \quad (5)$$

计算结果为:平均倾角为 54.74° 。仅考察垂直于液晶盒的方向的Bragg反射和其它光学特性,可以将蓝相液晶的简化模型中的螺旋轴设置为垂直于液晶盒平面,则与胆甾相液晶的平面态相同,不同之处为蓝相液晶简化模型中的液晶分子有与液晶盒平面的夹角,如图3所示。

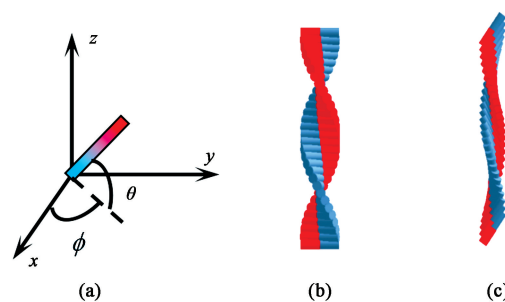


图3 胆甾相液晶和蓝相液晶一维模型的结构对比

Fig.3 Structures of cholesteric liquid crystal and the one-dimensional model of blue phase liquid crystal

将从图2中得到的结果设置到蓝相液晶的一维模型结构中,并模拟相同光波长的旋光能力和使用式(4)计算的结果相比较,如图4所示。模拟计算中考虑复杂光学计算,使用Berreman矩阵方法来计算,所得模拟结果与使用式(4)的计算结果相符。

由以上模拟计算可以得知:使用一维模型来计算蓝相液晶的旋光效应是可信的。

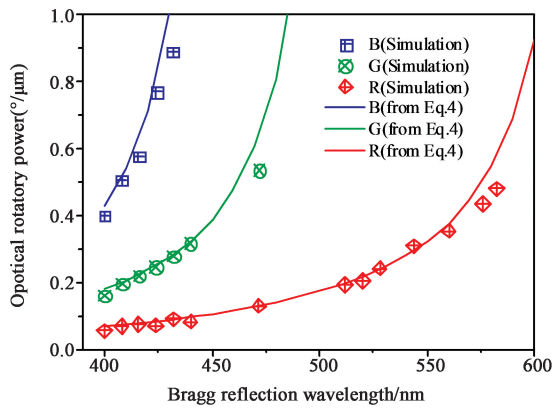


图 4 三个波长(457, 517 和 633 nm)的模拟结果与由式(4)计算结果的对比

Fig.4 Simulation results for the three wavelength (457, 517 and 633 nm) and the calculate results of equation (4)

在蓝相液晶显示器中,为了避免蓝相液晶对外界环境光的 Bragg 反射影响液晶显示器的显示效果,通常将 Bragg 反射波长设置在紫外光范围,利用偏光片对紫外光的强吸收效应来达到消除环境光在液晶层中的反射效应。

描述蓝相液晶的电光特性的重要参数是 Kerr 常数, Kerr 常数越大,则同样电极结构下的驱动电压越低, Kerr 常数与螺距的平方成正比,因此增大螺距有助于 Kerr 常数的提高。但是蓝相液晶要求螺距又不能够太大,一般小于 400 nm,因此蓝相液晶的 Bragg 反射波长可以在可见光范围内,但必须研究可见光范围内,蓝相液晶显示器中消除 Bragg 反射和以上的旋光效应。文献[24]使用圆偏光片对显示器进行补偿,使蓝相液晶中不发生 Bragg 反射。下面利用蓝相液晶的一维模型和 TechWiz 软件对 Bragg 反射波长在紫外光和可见光范围内的蓝相液晶的旋光特性和对外界环境光的反射进行模拟计算。

将蓝相液晶的螺距设置为 200 nm,为了简化计算,液晶的折射率固定为 1.5 和 1.7,则蓝相液晶的 Bragg 反射中心波长为 320 nm,液晶的倾角为 54.74° ,蓝相液晶的层厚为 $10\ \mu\text{m}$,背光源为 LED,起偏器的角度为 0° ,检偏器的角度为 90° 。背光源的发光光谱如图 5 所示,可见光的透过率与波长的关系如图 6 所示,透过率一部分来自于偏光片自身的漏光,一部分来自于蓝相液晶的旋光特性。从图中可以看到:随着波长的增加,由蓝

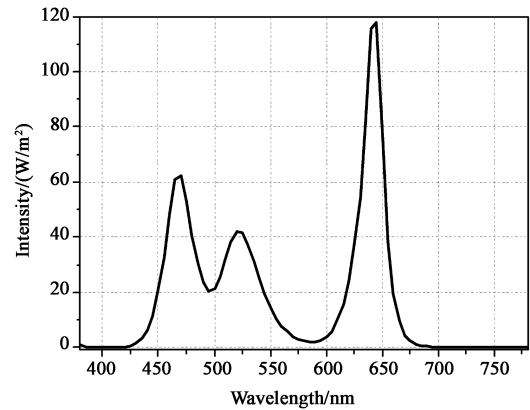


图 5 LED 背光源的发光光谱

Fig.5 Optic spectrum of LED back light

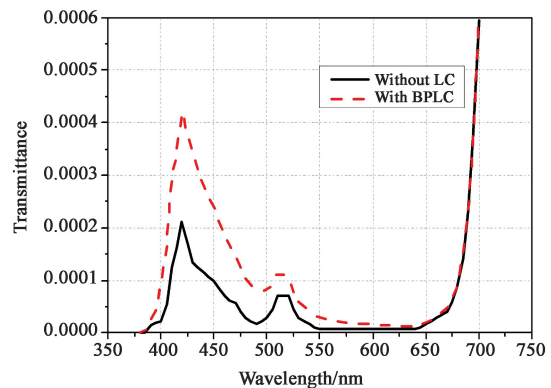


图 6 正交偏光片有无蓝相液晶时的透过率

Fig.6 Transmittance of the crossed linear polarizers with and without blue phase liquid crystal

相液晶旋光特性引起的漏光效应逐渐减小。

具体到正交偏光片下蓝相液晶的旋光特性,整体透过率随检偏偏光片方位角度的变化如图 7 所示,当检偏器旋转 0.5° ,透过率达到最低值。图 8 中给出了该 $10\ \mu\text{m}$ 厚蓝相液晶层的旋光角度与光波长之间的关系,随着波长的增加,旋光角度下降很快,最后趋于零。

下面计算 Bragg 反射中心波长在可见光范围内的情况,设置蓝相液晶的螺距为 340 nm, Bragg 反射中心波长为 544 nm,为了方便计算,将液晶层厚度设置为 8.5 mm(等于 25 个螺距),偏光片有两种设置:(1)正交线偏光片,(2)正交圆偏光片,使用宽频带四分之一波片。计算得到正交线偏光片和正交圆偏光片的透过率光谱图,如图 9 和 10 所示,正交线偏光片下,在发生 Bragg 反射中心波长位置的光透过率比较大,而正交圆偏光

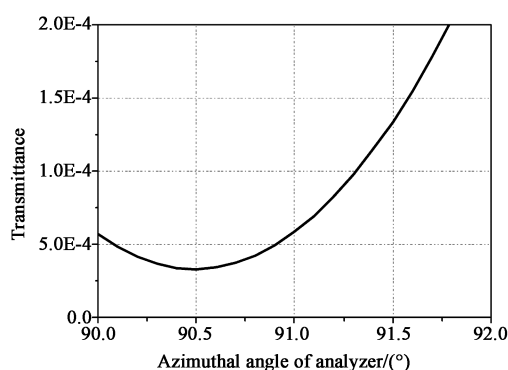


图7 小螺距蓝相液晶整体透过率随检偏器角度的变化
Fig.7 Average transmittance vs. azimuthal angle of analyzer

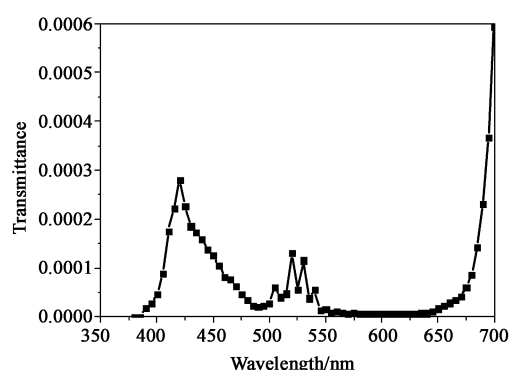


图10 正交圆偏光片情况下透过率光谱图
Fig.10 Transmittance spectrum of blue phase liquid crystal between the crossed circle polarizers

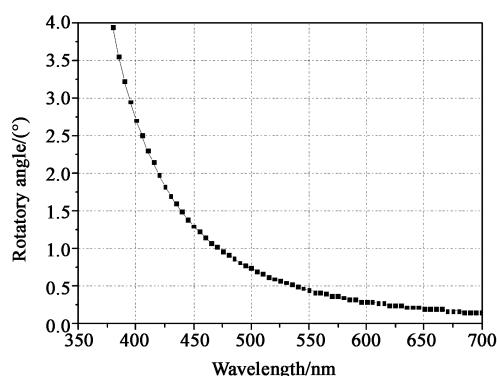


图8 旋光角度与光波长的关系
Fig.8 Optical rotatory angle vs. wavelength

片下,不同波长的光透过率都很小。在此计算中,通过圆偏光片的光是左旋还是右旋,对透过率影响很小,只给出其中的一种情况。

通过旋转检偏器的角度,来获得整体透过率最低的情况,也就可以得到该蓝相液晶的旋

光特性,计算结果如图11和12所示。在线偏光片情况下,蓝相液晶中可见光整体的旋光角度为 5.2° ,并且透过率不会很低(大于 0.035);在圆偏光片情况下,蓝相液晶中可见光整体的旋光角度为 0.06° ,透过率很低($<5 \times 10^{-5}$)。因此,蓝相液晶显示器的 Bragg 反射中心波长如果设置在可见光范围,则需要正交圆偏光片来获得高的对比度。

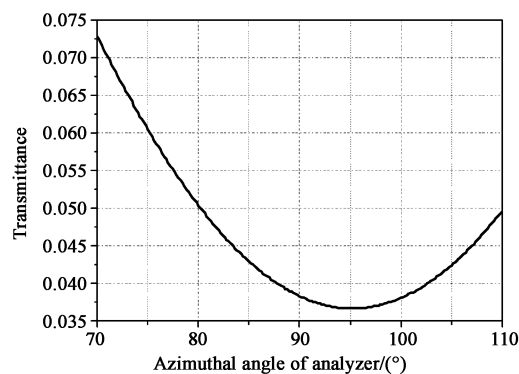


图11 整体透过率随检偏器角度的变化(正交线偏光片)
Fig.11 Average transmittance vs. azimuthal angle of analyzer (the crossed linear polarizers)

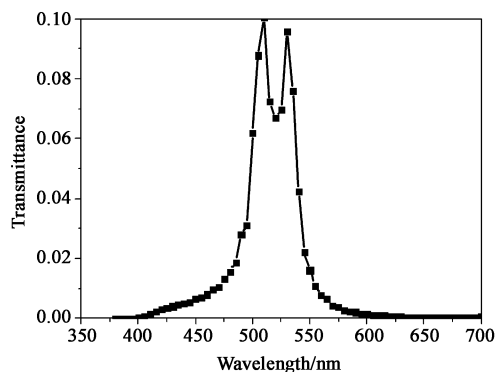


图9 正交线偏光片情况下蓝相液晶透过率光谱图
Fig.9 Transmittance spectrum of blue phase liquid crystal between the crossed linear polarizers

对于蓝相液晶处于正交偏光片和正交圆偏光片之间的情况,当 Bragg 反射中心波长在可见光范围内,线偏光片情况下发生的旋光效应要远大于圆偏光片情况,计算给出两种情况下的该蓝相液晶层中不同波长光的整体旋光角度,如图13和图14所示。由图13中看到蓝相液晶对线偏振光有强烈的旋光效应,距离 Bragg 反射中心波长越近,旋光效应就越强;由图14中看到蓝相液晶对

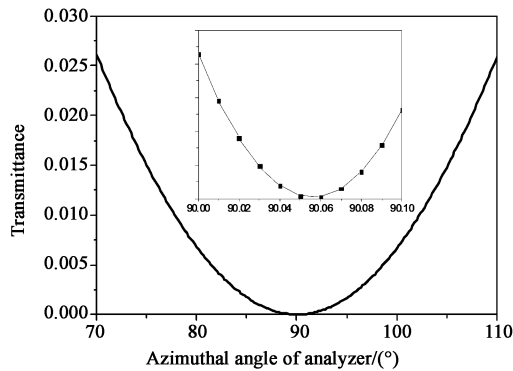


图 12 整体透过率随检偏器角度的变化(正交圆偏光片)

Fig.12 Average transmittance vs. azimuthal angle of analyzer(the crossed circle polarizers)

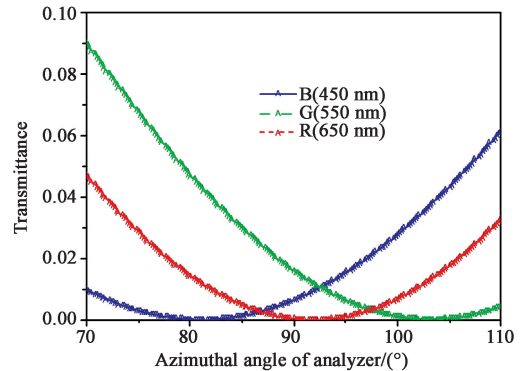


图 15 三原色透过率与检偏器角度的关系(正交线偏光片)

Fig.15 Transmittance of three primary colors vs. azimuthal angle of analyzer (the crossed linear polarizers)

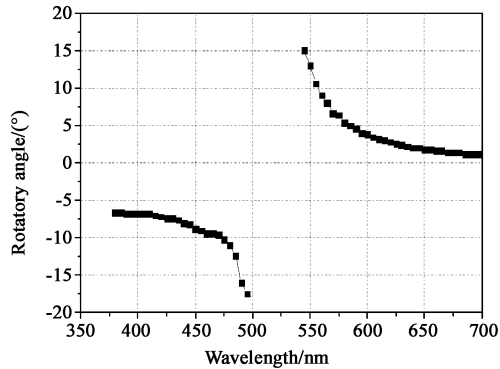


图 13 旋光角度与光波长的关系(正交线偏光片)

Fig.13 Optical rotatory angle vs. wavelength (the crossed linear polarizers)

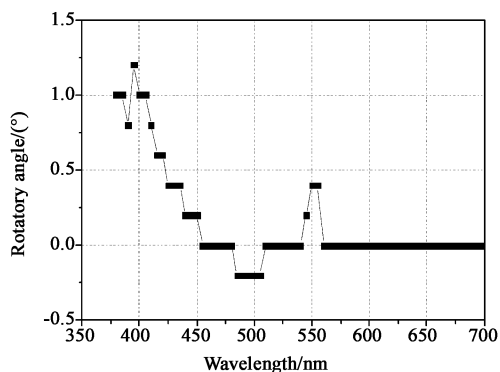


图 14 旋光角度与光波长的关系(正交圆偏光片)

Fig.14 Optical rotatory angle vs. wavelength (the crossed circle polarizers)

圆偏振光的旋光效应很弱。线偏光片情况下,三原色(450 nm, 550 nm 和 650 nm)随着检偏器角度变化而变化的图,如图 15 所示,结果也是图 13

的旋光效果的具体表现。因此,使用圆偏光片可以实现很好的暗态特性。

3 蓝相液晶显示器的外反射

液晶显示器在使用的情况下,必然受到外界环境光的影响,普通的向列相液晶由于没有反射,所以只考虑偏光片的外表面反射就可以了,通过设计一些防反射膜结构,可以将表面反射降低很多,从而达到提高液晶显示器观看对比度的作用。在蓝相液晶显示器中,由于蓝相液晶具有 Bragg 反射,所以如果 Bragg 反射波长设置在可见光范围内,需要考虑外界环境光在蓝相液晶中的反射情况。在模拟计算中,固定偏光片的角度为 90° ,偏光片的实数折射率为 1.5,圆偏光片分为两种情况,以外界环境光向液晶中传播时为正方向,有右旋和左旋圆偏振光两种情况,蓝相液晶的螺旋为其中的一种螺旋结构。

模拟计算外界环境光在蓝相液晶显示器中的反射光情况,如图 16 所示,图(a)中给出了在线偏光片下,有无液晶层时的反射率与波长的关系。当无液晶时,偏光片表面的反射率为 0.04;当有液晶时,可以看到在 500~540 nm 之间有很强的反射率,这来自于蓝相液晶中的 Bragg 反射效应,当线偏振光进入蓝相液晶后,可以分为等强度的左旋和右旋圆偏振光,与蓝相液晶螺旋方向相反的圆偏振光透射,对反射无贡献;与蓝相液晶螺旋方向相同的圆偏振光有 Bragg 反射效应,反射回来

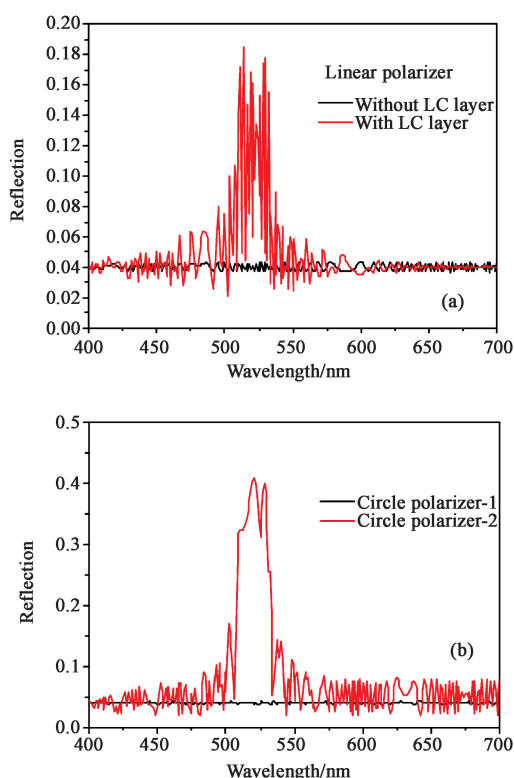


图 16 (a)线偏光片情况下有无液晶层的反射率, (b)两种圆偏光片情况的反射率

Fig.16 (a) Surface reflection and the reflection of LC layer with linear polarizer, (b) reflections of the two circle polarizer states

的圆偏振光经过线偏光片,有部分透射,即得到了图(a)中的反射率结果。图(b)中给出了两种圆偏光片情况下的反射率与波长的关系,其中与蓝相液晶螺旋方向相同的圆偏振光具有强烈的 Bragg 反射效应,相反方向的圆偏振光反射很弱。由此可以得到:蓝相液晶显示器设计中,如果设计的 Bragg 反射波长在可见光范围内,则上圆偏光片的设计为无 Bragg 反射效应的结构,可以得到无外反射的蓝相液晶显示器件。

4 结 论

本文中首先模拟计算了胆甾相液晶的旋光能力,与理论公式计算结果相符。然后结合实验结果,建立蓝相液晶的一维模型,并计算了蓝相液晶的旋光能力,模拟结果与实验和公式结果相符。接下来应用一维模型模拟计算了蓝相液晶显示器在正交偏光片和正交圆偏光片情况下的透过率特性和旋光特性,得到在适当的圆偏光片情况下,蓝相液晶的 Bragg 反射波长可以设计到可见光范围内,仍可以得到传统液晶显示器的暗态效果,同时也无外环境光的 Bragg 反射,从而保证蓝相液晶显示器的高对比度特性。研究结果对设计高性能蓝相液晶显示器件有重要的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] EINITZER F. Beiträge zur kenntniss des cholesterins [J]. *Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften*, 1888, 9(1): 421-441.
- [2] LEHMAN O. Stoffe mit drei flussigen zustanden, einem isotrop und zwei kristallinisch-flussigen [J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1906, 56: 750.
- [3] WRIGHT D C, MERMIN N D. *Crystalline liquids: the blue phases* [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1989, 61 (2): 385-432.
- [4] FUKUDA J I, ZUMER S. Novel defect structures in a strongly confined liquid-crystalline blue phase [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(1): 017801.
- [5] KITZEROW H S, BAHR C. *Chirality in Liquid Crystals* [M]. New York: Springer, 2001: 186-222.
- [6] DEMUS D, GOODBY J, GRAY G W, et al. *Handbook of Liquid Crystals: Fundamentals* [M]. New York: Wiley-Vch, 1998: 129-130.
- [7] OSWALD P, PIERANSKI P. Blue phases: a second example of a frustrated mesophase [M]//OSWALD P, PIERANSKI P. *Nematic and Cholesteric Liquid Crystals: Concepts and Physical Properties Illustrated by Experiments*. London: Taylor & Francis Group, 2005: 493-552.
- [8] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, et al. Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [9] HASEBA Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, et al. Large electro-optic Kerr effect in nanostructured chiral liquid-

- crystal composites over a wide temperature range [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(19): 2311-2315.
- [10] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(1): 96-98.
- [11] CHOI S W, YAMAMOTO S I, HASEBA Y, *et al.* Optically isotropic-nanostructured liquid crystal composite with high Kerr constant [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 043119.
- [12] YONEYA M, TAKADA S, MAEDA Y, *et al.* Electro-optic response of cubic liquid crystal compounds in Kerr cell geometry [J]. *Liquid Crystals*, 2008, 35(3): 339-342.
- [13] CHEN K M, GAUZA S, XIANYU H Q, *et al.* Submillisecond gray-level response time of a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(2): 49-51.
- [14] YAN J, RAO L H, JIAO M Z, *et al.* Polymer-stabilized optically isotropic liquid crystals for next-generation display and photonics applications [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(22): 7870-7877.
- [15] LU L, HWANG J Y, CHIEN L C. P-130: Effect of IPS cell structure on the electro-optical property of a room-temperature blue phase liquid crystal [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 1608-1610.
- [16] YANG Y C, BAO R, LI K X, *et al.* 39.3: Sub-millisecond liquid crystal mode utilizing electro-optic Kerr effect comprising polymer-stabilized isotropic liquid crystals [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009 40(1): 586-589.
- [17] KIM M S, KIM M, JUNG J H, *et al.* P-132: Blue phases liquid crystal cell driven by strong in-plane electric field [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 1615-1618.
- [18] KIKUCHI H, HIGUCHI H, HASEBA Y, *et al.* 62.2: Invited Paper: Fast electro-optical switching in polymer-stabilized liquid crystalline blue phases for display application [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, 38(1): 1737-1740.
- [19] LEE H, PARK H J, KWON O J, *et al.* 11.1: Invited Paper: The world's first blue phase liquid crystal display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 121-124.
- [20] DE VRIES H. Rotatory power and other optical properties of certain liquid crystals [J]. *Acta Crystallographica*, 1951, 4(3): 219-226.
- [21] BAESSLER H, LARONGE T M, LABES M M. Electric field effects on the optical rotatory power of a compensated cholesteric liquid crystal [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1969, 51(8): 3213-3219.
- [22] LIU Y F, LAN Y F, ZHANG H X, *et al.* Optical rotatory power of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131102.
- [23] 堀浩雄, 铃木幸治. 彩色液晶显示 [M]. 金轸裕, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 14.
HORI H, SUZUKI K. *Color Liquid Crystal Display* [M]. JIN J Y, Trans. Beijing: Science Press, 2003: 14. (in Chinese)
- [24] YAN J, LUO Z Y, WU S T, *et al.* Low voltage and high contrast blue phase liquid crystal with red-shifted Bragg reflection [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(1): 011113.

作者简介: 马红梅 (1975—), 女, 河北邢台人, 博士, 副教授, 2003 年于河北工业大学获得硕士学位, 2017 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学应用物理系主任, 主要从事液晶物理与液晶器件物理方面的研究。E-mail: mhmtj@163.com

孙玉宝 (1975—), 男, 河北沧州人, 教授, 博士生导师, 1999 年于河北工业大学获得学士学位, 2010 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学应用物理所所长, 主要从事液晶显示器件方面的研究。E-mail: sun_yubao@163.com