

文章编号:1007-2780(2015)03-0381-06

胆甾相与蓝相液晶的布拉格反射和旋光能力研究

窦 虎,于亚楠,马红梅,孙玉宝*
(河北工业大学 应用物理系,天津 300401)

摘要:采用时域有限差分法(FDTD)研究了胆甾相液晶与蓝相液晶的旋光能力。首先计算了圆偏振光在平面态胆甾相液晶与蓝相液晶中的布拉格反射现象,从晶格结构和分子排列的角度对模拟结果做了讨论,研究了液晶折射率和螺距对布拉格反射现象的影响。其次研究了胆甾相与蓝相液晶夹在两正交偏振片间的漏光情况,用液晶的旋光能力对二者的相似和不同的现象进行了解释。

关 键 词:蓝相;胆甾相;布拉格反射;旋光能力

中图分类号:TN141 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153003.0381

Bragg reflection and optical rotatory power of cholesteric and blue phase liquid crystal

DOU Hu, YU Ya-nan, MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

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

Abstract: The Bragg reflection and optical rotatory power of cholesteric liquid crystal (ChLC) and blue phase liquid crystal (BPLC) are studied using finite-difference time-domain (FDTD) method. Firstly, the Bragg reflection of ChLC and BPLC is calculated, and the simulation results are discussed from the aspects of lattice structures and molecular arrangement. The effect of refractive index and pitch of liquid crystal on the Bragg reflection is also studied. The light leakage of the ChLC and BPLC sandwiched by the crossed polarizers is calculated, and the similar and different phenomena are analyzed by the optical rotatory power of liquid crystal.

Key words: blue phase; cholesteric; Bragg reflection; optical rotatory power

1 引 言

胆甾相液晶与蓝相液晶在分子的排列^[1-2]上有着一定的相似性,关于胆甾相液晶某些光学性质在蓝相液晶中也有着类似的体现^[3-5]。在胆甾

相液晶和蓝相液晶中,对于特定波长的光波将会发生布拉格反射和旋光效应^[4-6],光波反射最大的波长区域中心处的波长称为布拉格中心反射波长,布拉格中心反射波长附近的光通过胆甾相液晶和蓝相液晶后有明显的不同,尤为显著的是光波的偏振方向偏转的角度不同,即所谓的旋光效

收稿日期:2014-09-04;修订日期:2014-10-22.

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

* 通信联系人,E-mail:sun_yubao@163.com

应^[6]。胆甾相液晶的分子排列是沿着一个螺旋轴发生偏转,而蓝相液晶为双螺旋结构。因为胆甾相液晶和蓝相液晶有着相类似的结构和光学特性,所以本文中通过类比胆甾相液晶和蓝相液晶的光学特性,来研究它们的布拉格反射和旋光特性,采用时域有限差分法^[7](FDTD)对液晶的光学特性进行模拟计算,对平面态和焦锥态胆甾相液晶,蓝相 II 液晶的反射和透射,以及它们在正交偏光片下的透光特性(即暗态漏光)进行计算,并采用旋光能力来解释了暗态漏光的性质。通过计算和分析这两种液晶的旋光特性,获得了蓝相液晶具有更低的旋光能力和暗态漏光,这个结果将对降低蓝相液晶显示器的暗态透过率有指导意义。

2 理论分析与模拟计算

在经典液晶物理中,胆甾相液晶的布拉格反射中心波长可以简单地写为 $\lambda_B = p \bar{n}$,其中 $\bar{n}$ 是液晶的平均折射率, p 是胆甾相液晶的螺距,反射波长范围的宽度为 $\Delta\lambda = \Delta n p$, Δn 为液晶材料的双折射率^[8]。如果平均折射率和螺距相同,蓝相液晶的布拉格中心反射波长和胆甾相液晶相同。但是,我们清楚地知道:胆甾相液晶和蓝相液晶具有结构上的明显差异,因此它们的布拉格反射效率和反射波带宽度应该不同。

在蓝相液晶的应用中,为了解决蓝相液晶显示器驱动电压过高的问题,通过增大蓝相液晶的螺距从而降低驱动电压成为了一种趋势^[9],但是这种方法不可避免地会遇到布拉格反射波长在可见光波段,从而导致暗态漏光。对于暗态漏光的原理,现在可以用旋光能力来解释,对于胆甾相液晶的旋光能力 R 可用式(1)^[6]表示:

$$R = - \frac{\pi (\Delta n)^2 p}{4\lambda \left(1 - \frac{\lambda^2}{p^2 \bar{n}^2} \right)}, \tag{1}$$

式中: $\Delta n = n_e - n_o$, λ 为入射光波长。而蓝相液晶的旋光能力没有公式表达,我们采用对比它们的光学特性的方法,来获得蓝相液晶的旋光能力。

由于液晶是各向异性的,在用 FDTD 法模拟光学特性时不能用常规的电场强度 E 和磁场强度 H 进行迭代^[10-11],需要用 D (电位移矢量)和 H (磁场强度)进行迭代,再根据 $E = \epsilon_r^{-1} D$ 求

出电场强度 E ,其中 ϵ_r 为相对介电常数张量^[11]。我们选取的液晶为平面态胆甾相液晶(ChPLC)和蓝相液晶(BPLC),液晶的螺距 $p = 270 \text{ nm}$,液晶层厚度为 $9 \text{ }\mu\text{m}$,寻常光折射率 $n_o = 1.55$,非寻常光折射率 $n_e = 1.65$,同时单一改变平均折射率(寻常光折射率 $n_o = 1.45$,非寻常光折射率 $n_e = 1.55$)或螺距($p = 400 \text{ nm}$)来观察模拟结果的变化。

因为布拉格反射光的螺旋方向与液晶的螺旋方向相同,因此我们选择入射光的圆偏振方向与液晶的螺旋方向相同。为了模拟圆偏振光我们采取了双光源的方式:两个线偏振光的偏振方向分别为 x 轴方向和 y 轴方向,并且令这两个光的相位差为 90° 。在计算布拉格反射特性时,时间采样间隔为 $\Delta t = 5 \times 10^{-18} \text{ s}$,FDTD 网格尺寸 $D_x = D_y = D_z = 2.5 \text{ nm}$,在边界处理上对 x 、 y 方向采用周期性边界条件,对于 z 方向采用完美匹配层(PML)来吸收反射光波^[13]。光源为圆偏振光,波长选择 350 nm 到 800 nm 的波长范围。在蓝相液晶材料地选择上,我们用蓝相 II 态液晶^[14]进行模拟计算,仿真模拟的结构图如图 1 所示。

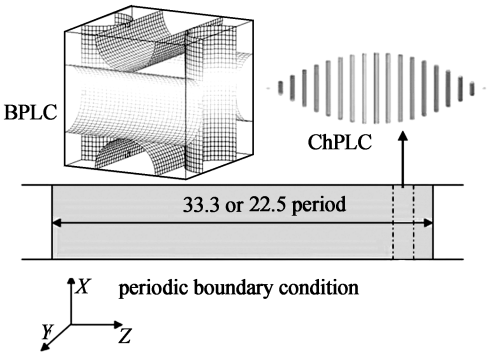


图 1 蓝相液晶或胆甾相液晶的模拟结构示意图和坐标系

Fig. 1 Structure diagram of blue phase and planar texture of cholesteric liquid crystal and the coordinate system

在胆甾相液晶和蓝相液晶漏光特性和旋光能力的模拟中,时间采样间隔为 $\Delta t = 2 \times 10^{-18} \text{ s}$,FDTD 网格尺寸 $D_x = D_y = D_z = 1.1 \text{ nm}$ 。在液晶旋光特性的计算中,我们选择线偏振的光作为光源,分别计算出光透过液晶层后的电场在 x 、 y 方向的分量,从而得出液晶的旋光量。

3 胆甾相与蓝相液晶的光学特性

3.1 布拉格反射

胆甾相液晶的分子取向垂直于螺旋轴,并沿着螺旋轴方向呈周期性变化,分子旋转角度与分子所在 z 轴的位置关系呈线性关系,即通常所说的平面态胆甾相液晶(ChPLC)。对于蓝相液晶我们采用液晶分子晶格全空间排列的模型来模拟^[15]。将光源的圆偏振方向与液晶分子的旋转方向设置为相同,单一变化平均折射率和螺距,得到的透过率与波长的关系如图 2~4 所示。从图 2~4 可以看出:对于胆甾相液晶,当圆偏振光的旋转方向与液晶的旋转方向相同时,在某个波长范围内的光波透过率几乎为零,即被反射回去,而其它波长的光几乎全部透射;对于蓝相液晶,其反射中心波长与胆甾相液晶的反射中心波长相等,但是反射率要低,反射光的带宽也窄。

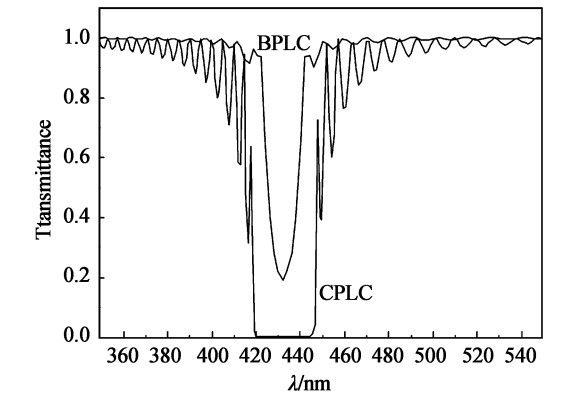


图 2 圆偏振光通过平面态胆甾相液晶或蓝相液晶的透过率与波长的关系图 ($n_o = 1.55, n_e = 1.65, p = 270 \text{ nm}, d = 9 \text{ mm}$)

Fig. 2 Transmittance vs. wavelength for circularly polarized light passes through ChPLC or BPLC

相比于蓝相液晶的反射现象,胆甾相液晶的布拉格反射现象更加明显。出现这种现象的主要原因是蓝相液晶的分子双螺旋排列方式与胆甾相液晶的平面态排列方式的不同。在理想状态下,蓝相液晶晶格内有分别沿着 x 、 y 、 z 3 个方向排列的圆柱,圆柱体内的液晶分别平行于这 3 个方向旋转了 90° ,当光沿着 z 轴穿过液晶层时,只有少

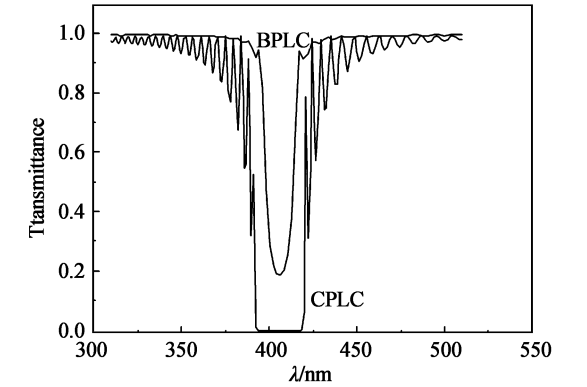


图 3 圆偏振光通过胆甾相液晶与蓝相液晶的波长和透过率图 ($n_o = 1.45, n_e = 1.55, p = 270 \text{ nm}, d = 9 \text{ mm}$)

Fig. 3 Transmittance vs wavelength for circularly polarized light passes through ChPLC or BPLC

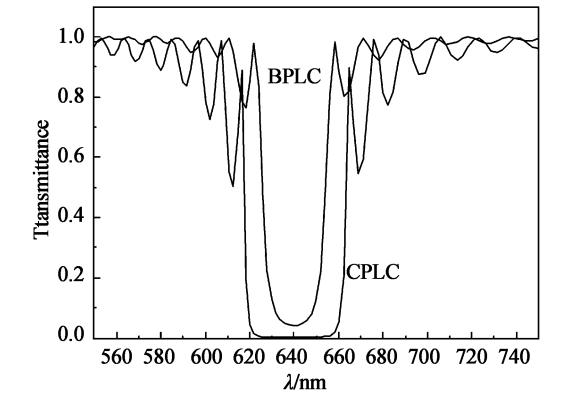


图 4 圆偏振光通过平面态胆甾相液晶与蓝相液晶的透过率与波长的关系图 ($n_o = 1.55, n_e = 1.65, p = 400 \text{ nm}, d = 9 \text{ mm}$)

Fig. 2 Transmittance vs. wavelength for circularly polarized light passes through ChPLC or BPLC

量位置的液晶分子严格按照胆甾相液晶排列方式进行排列,大部分的液晶有倾角和方位角的偏差,从而导致蓝相液晶的布拉格反射没有胆甾相液晶那么明显。

从图 2~4 中,我们还可以得到:蓝相液晶的布拉格反射中心波长与胆甾相液晶的反射中心波长是相等的,即: $\lambda_B = \bar{n} p$;蓝相液晶的反射波长的带宽也比胆甾相液晶反射波长的带宽也窄。其主要原因还是来自于蓝相液晶和胆甾相液晶排列结构上的差别。

3.2 正交偏光片下的漏光

胆甾相液晶和蓝相液晶的螺旋结构使得它们在被正交偏光片夹着的时候,不能够完全掩光,即有少量光漏过。在模拟中,我们将液晶放在理想的正交偏振片之间,液晶的材料参数为:寻常光折射率 $n_o=1.55$,非寻常光折射率 $n_e=1.65$,螺距 $p=270\text{ nm}$ 。光源采用电场偏振沿 x 轴方向的线偏振光,在光通过液晶层后,我们分别计算电场在 x 、 y 轴上分量的强度(模的平方),即漏过的光强,与入射光强的比值即为透过率。通过计算得到的胆甾相液晶和蓝相液晶的透过率与波长的关系,如图 5 和图 6 所示。

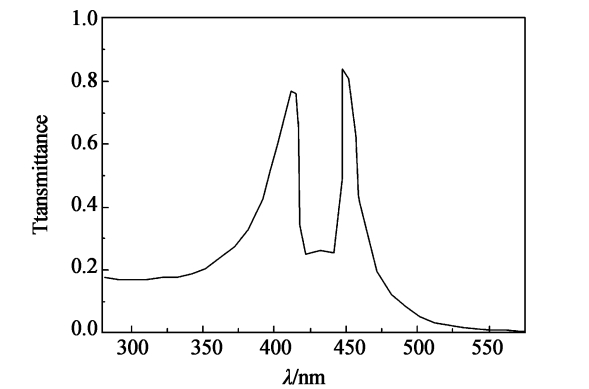


图 5 线偏振光通过加在正交偏振片中的胆甾相液晶后的透过率与波长的关系图

Fig. 5 Transmittance vs wavelength for linearly polarized light passes through ChPLC layer which is sandwiched by the crossed polarizers

从图 5 和 6 中可以看到:胆甾相和蓝相液晶的漏光情况有明显的差异,在产生布拉格反射的波段范围内,胆甾相的漏光会突然减少,并在这个波长范围内维持漏光的稳定性,而蓝相液晶则无此变化。胆甾相液晶与蓝相液晶的漏光还有以下几点相似点:(1)光波长越靠近布拉格反射中心波长,漏光量越大。(2)光波长越靠近布拉格中心反射波长,漏光量的变化越明显。(3)当光波长远离布拉格反射中心波长时,短波长方向的光透过率要大于长波长方向的光透过率,这也是蓝相液晶显示器中通常选择短螺距的一个原因。

为了分析产生以上现象,我们采用液晶的旋光特性进行研究,根据图 5 和 6 中的透过率,计算得到胆甾相液晶对不同波长光的旋光能力,结果如图 7 所示。图 7 中同时给出了使用经典公式(1)计算

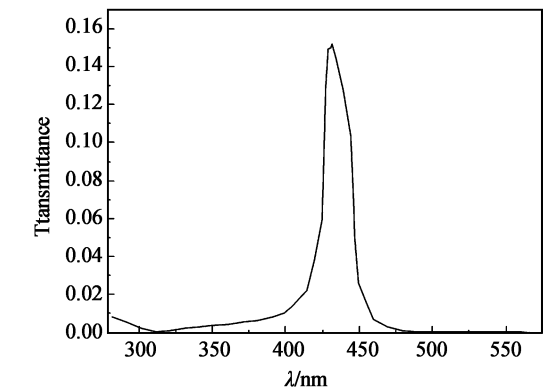


图 6 线偏振光通过加在正交偏振片中的蓝相液晶后的透过率与波长的关系图

Fig. 6 Transmittance vs wavelength for linearly polarized light passes through BPLC layer which is sandwiched by the crossed polarizers

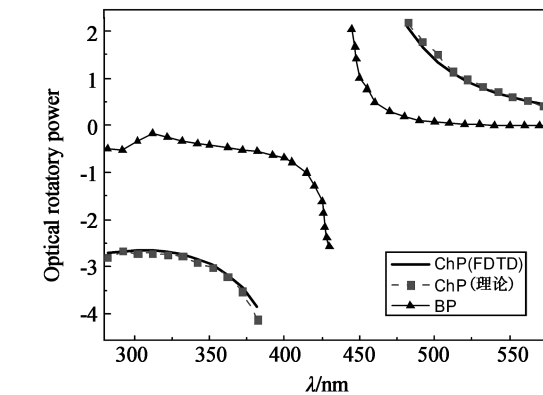


图 7 平面态胆甾相和蓝相液晶的旋光能力和波长关系图

Fig. 7 Optical rotatory power vs wavelength of ChPLC and BPLC

得到的旋光能力的结果。由于蓝相液晶是三维晶格结构,晶格平面上不同位置的旋光特性并不相同,旋光性难以描述^[16],所以通过和胆甾相液晶的旋光能力的对比,利用透过率来相似地计算出蓝相液晶的平均旋光能力,结果如图 7 所示。

在图 7 中,我们可以看到:对于胆甾相液晶,通过经典公式计算出的旋光能力与模拟结果是相符的。对于图 5 中,透过率在布拉格反射波段的降低并比较稳定的情况,可以如下解释:当线偏振光进入胆甾相液晶后,分为等量的左旋和右旋的圆偏振光,其中与液晶具有相同旋转方向的光被完全反射,另外一个圆偏振光的旋光能力很强(图

7中没有表示出来),当旋光变得非常大时,电场在 x 、 y 轴方向上的分量统计平均会基本相同,因此就只有入射光强的四分之一透过检偏器,如图5所示。图7中可以看出:蓝相液晶在旋光能力上远低于胆甾相液晶,所以它在布拉格反射波段内的透过率都很小,并且布拉格反射光对正交偏光片下的透过率影响很小。

4 结 论

本文通过对比研究了胆甾相液晶和蓝相液

晶的布拉格反射和在正交偏光片中的透光特性。布拉格反射结果表明蓝相液晶具有与胆甾相液晶相类似的光学特性,布拉格反射中心波长相同并且反射率较小,蓝相液晶的布拉格反射波带宽度小于胆甾相液晶,这是由于蓝相液晶的双螺旋结构和近似各向同性结构造成的。在正交偏光片中的透过率结果表明:蓝相液晶的旋光能力相比于胆甾相液晶很小,但是作为液晶显示器应用时仍然不能忽视。本文结果将有助于理解蓝相液晶的光学特性和改善蓝相液晶显示器的暗态漏光。

参 考 文 献:

- [1] Ogawa Y, Fukuda J, Yoshida H, *et al.* Finite-difference time-domain analysis of cholesteric blue phase II using the Landau-de Gennes tensor order parameter model [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(17): 3380-3383.
- [2] Ma J, Zheng Z G, Liu Y G, *et al.* Electro-optical properties of polymer stabilized cholesteric liquid crystal film [J]. *Chin. Phys. B.*, 2011, 20(2): 024212.
- [3] 李昌立,孙晶,蔡红星,等. 胆甾相液晶的光学特性[J]. 液晶与显示, 2002, 17(3): 193-198.
Li C L, Sun J, Cai H X, *et al.* Optical properties of cholesteric liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2002, 17(3): 193-198. (in Chinese)
- [4] 刘厚通,李国华,郝殿中. 螺旋相液晶旋光特性理论模拟与实验研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 329-334.
Liu H T, Li G H, Hao D Z. Theoretical simulation and experimental research of cholesteric liquid crystal optical rotatory characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 329-334. (in Chinese)
- [5] 范志新,于天池,黄欢,等. 胆甾相液晶电控螺旋畸变导致的布拉格反射特性[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 744-748.
Fan Z X, Yu T C, Huang H, *et al.* Bragg reflection properties of electrically controlled helix distortion in cholesteric liquid crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 744-748. (in Chinese)
- [6] 刘厚通,范志新,周军. 胆甾相液晶温控旋光色散特性的研究[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 352-355.
Liu H T, Fan Z X, Zhou J. Study of cholesteric liquid crystal temperature-control ORD characteristic [J]. *Optical technique*, 2008, 34(3): 352-355.
- [7] Ppokopidis K P, Zografopoulos D C, Kriezis E E. Rigorous broadband investigation of liquid-crystal plasmonic structures using finite-difference time-domain dispersive-anisotropic models [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2013, 30(10): 2722-2730.
- [8] 周其凤,王新久. 液晶高分子[M]. 北京:科学出版社,1999:230-238.
Zhou Q F, Wang X J. *Liquid Crystal Polymer* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 230-238. (in Chinese)
- [9] Yan J, Luo Z, Wu S T, *et al.* Low voltage and high contrast blue phase liquid crystal with red-shifted Bragg reflection [J]. *App. Phys. Lett.*, 2013, 102(1): 011113.
- [10] Kriezis E E, Elston S J. Finite-difference time domain method for light wave propagation within liquid crystal devices [J]. *Opt. Communications*, 1999, 165(1): 99-105.
- [11] Prokopidis K P, Zografopoulos D C, Kriezis E E. Rigorous broadband investigation of liquid-crystal plasmonic structures using finite-difference time-domain dispersive-anisotropic models [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2013, 30(10): 2722-2730.
- [12] Kriezis E E, Elston S J. Light wave propagation in liquid crystal displays by the 2-D finite-difference time-domain method [J]. *Opt. Communications*, 2000, 177: 69-77.
- [13] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *J. Comp. Phys.*, 1994,

114;185-200.

[14] Thieme M, Saupe A, Heppkeb G, *et al.* Surface-imaging of frozen blue phases in a discotic liquid crystal with atomic force microscopy Anton Hauser [J]. *J. Mater. Chem*, 1997, 7(11): 2223-2229.

[15] 窦虎,于亚楠,马红梅,等. 蓝相Ⅱ液晶态结构及其光学特性[J]. *液晶与显示*,2015, 30(1):16-21.
Dou H, Yu Y, Ma H, *et al.* Structure and optical profile of blue phaseⅡ [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1):16-21.

[16] Liu Y, Lan Y F, Zhang H X,*et al.* Optical rotatory power of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *App. Phys. Lett.*, 2013, 102(13): 131102.

作者简介:窦虎(1990—),男,河北邯郸人,硕士研究生,从事液晶器件方面的研究。E-mail:1103322765@qq.com