

胆甾相和蓝相液晶的透射和反射特性

窦虎 马红梅 孙玉宝

Transmittance and reflectance of cholesteric and blue phase liquid crystal

Dou Hu Ma Hong-Mei Sun Yu-Bao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 126101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.126101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.126101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于液晶和DSP的强光局部选通智能网络摄像系统研究

Study on the partial gating smart network camera for controlling strong light intensity based on DSP and liquid crystal

物理学报.2013, 62(21): 214210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214210>

一种液晶透镜盒间隙的测试方法

A measurement method of cell gap for liquid crystal lens

物理学报.2013, 62(17): 174210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174210>

低压驱动液晶透镜设计的研究

A design of liquid crystal lens with low voltage driving

物理学报.2013, 62(16): 164212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164212>

楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究

Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell

物理学报.2013, 62(4): 044219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044219>

基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的比较

Comparison of the resolutions of integral imaging three-dimensional display based on human vision

物理学报.2012, 61(8): 084212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.084212>

专题: 液晶光学及应用

胆甾相和蓝相液晶的透射和反射特性*

窦虎 马红梅 孙玉宝†

(河北工业大学应用物理系, 天津 300401)

(2014年12月24日收到; 2015年3月1日收到修改稿)

针对蓝相液晶显示器中的暗态漏光特性, 采用时域有限差分方法模拟计算了胆甾相液晶的平面态和焦锥态以及蓝相II态液晶的透射和反射特性, 得到了它们在正交和平行偏振片之间的漏光, 并提出了计算等效旋光能力的公式以比较它们的旋光能力. 通过对比焦锥态和蓝相液晶的旋光能力和漏光特性发现, 采用焦锥态替代蓝相液晶而得到良好的暗态特性是一种可行的方法. 通过研究它们的布拉格反射特性, 得知蓝相液晶的布拉格反射与平面态相似, 但反射强度小, 焦锥态无明显的布拉格反射特性.

关键词: 旋光能力, 蓝相液晶, 胆甾相液晶, 布拉格反射

PACS: 61.30.Mp, 42.79.Kr, 42.70.Df, 61.30.Cz

DOI: 10.7498/aps.64.126101

1 引言

蓝相液晶显示器具有亚毫秒级响应时间和宽视角特性, 解决了现有液晶显示器的难题, 被认为是下一代液晶显示技术^[1-4]. 蓝相液晶显示器至今未能产业化, 其主要原因是驱动电压高、磁滞效应和暗态漏光现象, 其中驱动电压和磁滞效应可以通过设计电极的形状来降低, 甚至消除; 暗态漏光是蓝相液晶本身的双螺旋结构造成的, 要消除暗态漏光则非常困难^[5,6]. Wu Shin-Tson教授研究组^[5]提出了应用胆甾相液晶的旋光能力来解释蓝相液晶的暗态漏光特性, 但是只给出了定量的拟合公式, 没有给出蓝相液晶与胆甾相液晶之间的差别, 也未提出合适的模拟计算. 相比于蓝相液晶, 胆甾相液晶的光学特性和旋光特性已经研究得比较详细^[7-10], 并且在双稳态胆甾相液晶显示器方面得到了广泛应用. 2009年, 邓罗根和赵找栗^[11]应用横向电场驱动平面织构胆甾相液晶, 研究了胆甾相液晶的螺距和反射特性, 获得了电场控制的反射式彩色显示, 但是尚未在动态响应的液晶显示器中得

到应用.

本文采用时域有限差分方法研究胆甾相液晶的平面态和焦锥态以及蓝相II态液晶的光学特性, 提出了计算蓝相液晶等效旋光能力的公式来研究胆甾相液晶和蓝相液晶的光学特性, 包括正交和平行偏振片下的透光特性, 并通过对比给出蓝相液晶、焦锥态与平面态旋光能力. 研究以上三种液晶态对圆偏振光的布拉格反射特性, 并讨论了焦锥态液晶应用于液晶显示器的可能.

2 胆甾相液晶的平面态、焦锥态和蓝相II态液晶的光学特性

2.1 等效旋光能力

胆甾相液晶的平面态在科学研究和应用研发方面已有广泛的应用. 由于平面态的选择性反射现象对于液晶的螺距非常敏感, 所以可以通过调节温度或电场^[10-13]来改变胆甾相液晶的螺距, 从而控制反射式胆甾相液晶器件发射不同颜色的光. 当胆甾相液晶处于焦锥态时, 液晶层中形成很多小碎

* 国家自然科学基金(批准号: 61475042, 11304074, 11274088)和教育部新世纪优秀人才计划项目(批准号: NCET-11-0931)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sun_yubao@163.com

畴, 每个液晶碎畴的螺旋轴是任意排列的. 当胆甾相液晶处于平面态时, 由于其周期性的排列结构, 会反射某个特定波长范围内的光, 这种现象被称为布拉格反射, 反射波带的中心波长称为布拉格中心反射波长, 波长范围宽度称为波带宽度, 满足(1)式^[14], 式中, \bar{n} 是液晶材料的平均折射率, Δn 是液晶材料的双折射, p 是胆甾相液晶的螺距. 布拉格反射现象是由于液晶层旋光能力的变化而导致的, 根据经典液晶物理理论, 平面态胆甾相液晶的旋光能力满足(2)式^[15].

$$\lambda_B = \bar{n}p, \quad \Delta\lambda = p\Delta n, \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{\pi p}{4\lambda} \frac{(\Delta n)^2}{(\lambda^2/\lambda_B^2 - 1)}, \quad (2)$$

式中, λ_B 为布拉格中心反射波长, $\Delta\lambda$ 为布拉格反射波长波段, R_0 为胆甾相液晶层的旋光能力. 旋光能力在布拉格反射中心波长两侧分别为正负值, 代表着左旋和右旋.

如图1所示, 晶格结构为简单立方的蓝相II态液晶, 其晶格结构如图1(a)所示, 在这些圆柱内的液晶分子呈双螺旋排列^[1-3]; 整个晶格内液晶的分布如图1(b)所示, 图中的红线表示圆柱中心的分子排列.

在液晶的光学仿真模拟中常用的方法是矩阵式法, 主要有琼斯矩阵法、拓展琼斯矩阵法和 4×4 Berreman 法. 矩阵式法是将液晶分子沿光的传播方向分层, 计算各层液晶对光的相位调制情况, 其实质是只考虑了光在一维方向的传播而完全忽略了光波在传播过程中的折射效应, 适合于液晶变化很简单的系统, 比如单畴液晶器件、共面转换液晶器件和多畴垂面排列液晶器件等^[16], 对蓝相液

晶这种具有复杂液晶分布的系统, 光在其中传播时存在复杂的折射过程, 因此采用传统光学计算方法难以得到精确的结果. 时域有限差分法^[17-20]是采用麦克斯韦微分方程来计算光传播过程的变化情况, 把光在介质中的传播过程分解为电场强度 \mathbf{E} 和磁场强度 \mathbf{H} 在空间上相互迭代的形式, 并在时间轴上逐步推进求解, 从而可以准确得到光波在任意时刻的衍射、散射、折射等特性. 为了将该方法引入到液晶这样的各向异性介质中, Kriezis 和 Elston^[18] 提出了时域有限差分法的另一种差分迭代形式: 采用电位移矢量 \mathbf{D} 和磁场强度 \mathbf{H} 进行空间迭代, 再根据 $\mathbf{E} = \epsilon_r^{-1}\mathbf{D}$ 求出电场强度 \mathbf{E} , 其中 ϵ_r^{-1} 为相对介电常数张量, 与待计算介质系统的详细情况有关, 对于蓝相液晶或者胆甾相液晶来说, 就是它们在很小的尺度 (Yee 元胞) 内的液晶分布情况. 我们已经研究了蓝相II态液晶中的液晶分子的分布情况^[21], 胆甾相液晶的平面态是比较简单的分层结构, 焦锥态可以从平面态结构得到, 将在下文中给出. 计算中, 把同一个液晶层夹在两正交或两平行偏振片之间, 设液晶盒的起偏器沿着 x 方向, 那么通过正交理想偏光片后的透过率就可以用 $|\mathbf{E}_y|^2 = I_y$ 来表示, 其中 \mathbf{E}_y 表示光通过液晶层后在 y 方向上的电场分量. 同理, 通过平行理想偏光片后的透过率就可以用 $|\mathbf{E}_x|^2 = I_x$ 来表示, 其中 \mathbf{E}_x 表示光通过液晶层后在 x 方向上的电场分量. 蓝相液晶分子的排列在同一个周期横截面内的不同位置上是不同的, 因此在不同的位置处透光性能也不同, 表现的旋光性能也不同. 采用上面的旋光能力公式描述时, 对于不同的位置, 旋光能力的描述也是复杂的, 并且因为每个周期的尺寸约为 $0.2 \mu\text{m}$, 在使用普通光学显微镜观察时, 不可能观察到每个

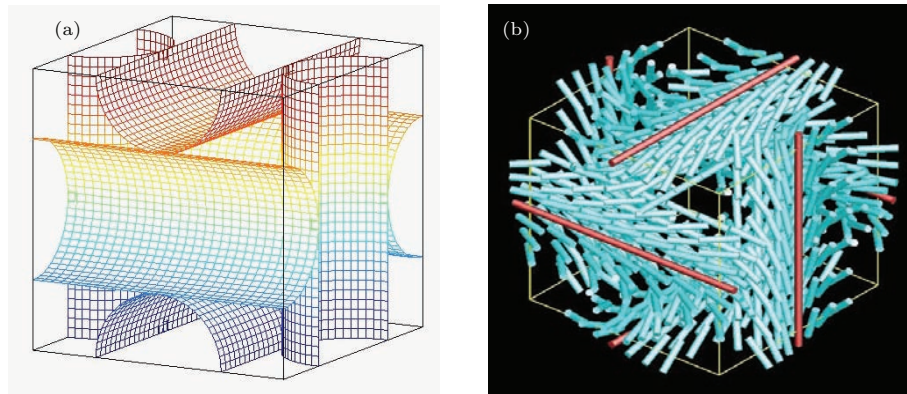


图1 (a) 蓝相II态液晶分子的晶格示意图; (b) 晶格内液晶的双螺旋分子排列

Fig. 1. (a) Schematic of blue phase liquid crystal II; (b) liquid crystal molecules arrangement in a lattice.

周期中的光学变化, 而只能观察到整体的光学透过率. 因此, 我们采用等效旋光能力来描述蓝相液晶的整体旋光特性. 液晶的旋光性会使通过该液晶后的偏振光发生偏振方向的变化, 在液晶层的厚度一定时这种变化的程度就是它的旋光能力. 因此在偏振片正交的液晶盒中液晶的旋光能力将直接影响液晶盒的漏光量, 基于液晶的旋光能力与漏光特性的这种紧密联系, 在实验中可以利用便于测量的液晶盒的透过率来计算出液晶的旋光能力, 称为等效旋光能力. 对于液晶盒横截面内旋光能力不尽相同的复杂液晶系统, 等效旋光能力是横截面内各处旋光能力的统计平均值. 在计算中, 等效旋光能力可以使用透过光在 x 和 y 方向的电场分量来定义, 旋转方向可以使用检偏器的旋转来寻找, 当旋光量处于 $\pm 90^\circ$ 范围内, 液晶层的厚度为 d , 偏振光通过单位厚度的液晶层后偏振方向发生改变的角度即是这个液晶盒的等效旋光能力, 可以用 (3) 式表示:

$$R_0 = \frac{1}{d} \tan^{-1} \left(\frac{E_y}{E_x} \right) = \frac{1}{d} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{I_y}{I_x}} \right), \quad (3)$$

R_0 为该液晶的旋光能力. 实际测量中, 可以测量正交和平行偏光片下的平均透过率来得到旋光能力的大小.

2.2 平面态胆甾相液晶的透光特性和旋光能力

在模拟计算中, 平面态胆甾相液晶的螺旋轴垂直于基板, 在平行于基板的平面内的液晶分子处于相同的排列状态, 因此在采用时域有限差分方法的 Yee 元胞分割时, 只考虑液晶层厚方向的液晶分子排列状态的变化. 液晶层厚度为 $9 \mu\text{m}$, 液晶材料的寻常折射率 $n_o = 1.55$, 异常折射率 $n_e = 1.65$, 螺距 $p = 270 \text{ nm}$. 在光的传播方向使用完全匹配层来终止计算空间和吸收反射波, 在 x 和 y 方向上, 使用周期性边界条件来模拟液晶的周期结构. Yee 元胞的大小为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10 \text{ nm}$, 计算中采用的时间步长 $\Delta t = 1.6 \times 10^{-17} \text{ s}$, 这样在每个时间步长中, 光的传播距离小于元胞的尺寸, 从而可以保证计算的准确性 [19,20].

平面态胆甾相液晶的透过率如图 2 所示, 图中黑线对应正交偏振片, 红线对应平行偏振片的情况. 使用 (3) 式计算得到整个液晶盒的旋光量在 $\pm 90^\circ$ 范围内的等效旋光能力, 如图 3 中黑线所示;

作为对比, 使用 (2) 式计算得到的胆甾相液晶的旋光能力, 如图 3 中红线所示. 从图 3 可以看出, 等效旋光能力和理论计算得到的旋光能力相符.

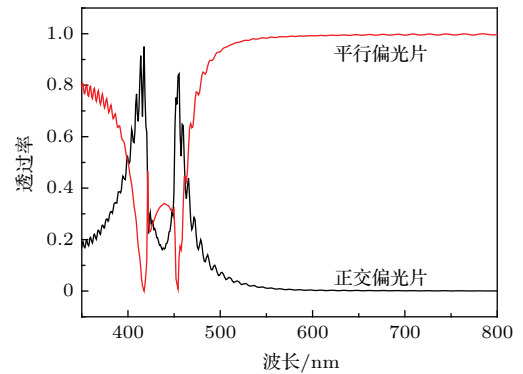


图 2 透过平面态胆甾相液晶层后的光波长和透过率的关系
Fig. 2. Transmittance versus wavelength of the light transmitting planar state cholesteric liquid crystal.

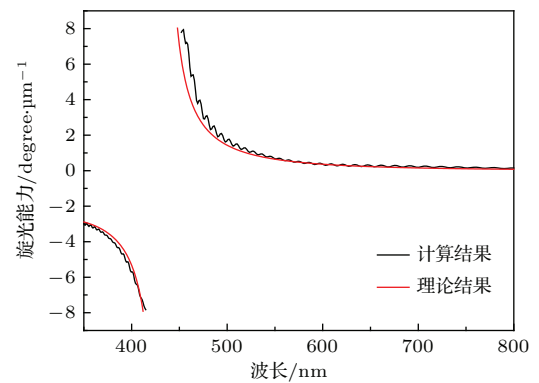


图 3 平面态胆甾相液晶的旋光能力和波长的关系
Fig. 3. Optical rotatory power of planar texture cholesteric liquid crystal versus wavelength.

2.3 蓝相 II 态液晶和焦锥态胆甾相液晶的透光特性和旋光能力

液晶盒中蓝相液晶结构为图 1 所示的晶格结构的堆叠; 焦锥态的建立过程为: 将平面态胆甾相液晶截断为很多小段, 每个小段尺寸约为 1 个螺距, 将每个小段在空间随机排列, 即螺旋轴方向为随机方向, 达到焦锥态结构的要求. 计算中所用液晶材料参数与 2.2 节中的液晶参数相同, 正交和平行偏振片下的透光特性如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示, 并采用 (3) 式得到蓝相 II 态液晶和焦锥态液晶的等效旋光能力. 为了方便比较, 只考虑旋光能力的大小, 不分正负号, 结果如图 5 所示. 与平面态胆甾相液晶相比, 蓝相液晶和焦锥态液晶在正交偏振片之间的漏光量、等效旋光能力都大幅降低. 通过计算结果的对比可以得知: 在正交偏光片情况下, 蓝相液

晶有明显的漏光, 而焦锥态液晶的整体透过率小; 在平行偏光片情况下, 焦锥态在不同的波长情况下透过率都很好. 如果将焦锥态每个小段的尺寸调得更小, 则各向同性特性会更好, 可以实现更好的暗态效果.

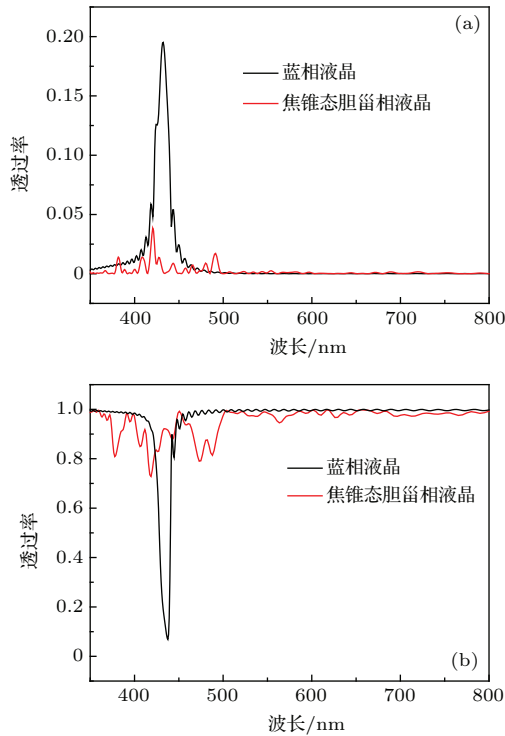


图4 蓝相液晶盒和焦锥态胆甾相液晶盒的透过率 (a) 两偏振片垂直; (b) 两偏振片平行
Fig. 4. Transmittance of blue phase and focal conic texture cholesteric liquid crystal cells: (a) the crossed polarizers; (b) the parallel polarizers.

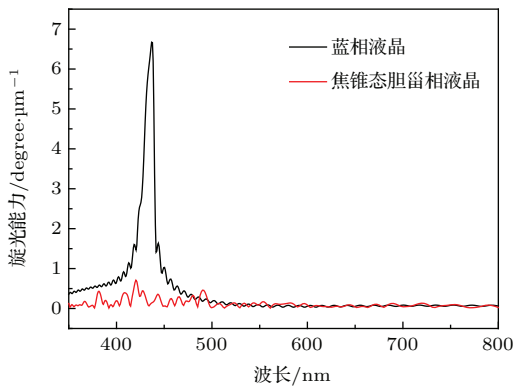


图5 蓝相液晶和焦锥态胆甾相液晶的旋光能力
Fig. 5. Optical rotatory power of blue phase and focal conic texture cholesteric liquid crystal.

2.4 布拉格反射

选择与液晶的螺旋方向相同的圆偏振光作为入射光, 计算胆甾相液晶的平面态和焦锥态以及

蓝相II态液晶的反射光强与波长之间的关系, 如图6所示. 平面态和蓝相液晶都具有很明显的发射波峰和波带, 而焦锥态胆甾相液晶的反射在靠近平面态反射波峰附近有较大的反射, 其他波长处的反射都较小. 平面态和蓝相液晶的选择性反射通常被称为布拉格反射, 其布拉格中心反射波长都满足(1)式, 但是因为蓝相液晶的排列结构不如平面态胆甾相液晶的整齐, 所以其反射强度也较弱, 同时反射波长的带宽也窄; 焦锥态中液晶的排列更加混乱, 因此其反射强度更弱, 同时因为螺旋轴的混乱排列, 导致在远离布拉格中心反射波长处也有较大的反射率.

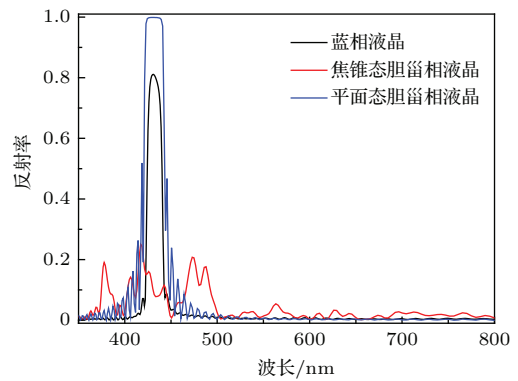


图6 圆偏振光在不同液晶层中的布拉格反射现象
Fig. 6. Bragg reflection of the circular polarized light which transmits different liquid crystal layers.

为了解释焦锥态胆甾相液晶的反射现象, 我们研究了平面态胆甾相液晶螺旋轴方向对透过率的影响. 平面态胆甾相的螺旋轴都沿着 z 轴(光的传播方向), 逐渐倾斜螺旋轴, 不同倾斜角度情况下的布拉格反射现象如图7所示, θ 为胆甾相液晶的螺旋轴与 z 方向的夹角. 从图7可以看出: 布拉格中心反射波长和反射带宽会随着 θ 角的增加而变大, 反射光的峰值会随着 θ 角的增加而减小; 当 $\theta = 45^\circ$ 时, 最大反射率仅有大约30%; 当 $\theta = 60^\circ$ 时, 可见光范围内已无反射光峰值. 出现这种现象的主要原因: 是随着 θ 值的增加, 液晶分子在 z 轴上旋转一个周期所需要的距离会变大, 也就等效于液晶分子的螺距变大. 将液晶分子在 z 轴上旋转一个周期的长度定义为 p' , 那么 p' 应该满足

$$p' = \frac{p}{\cos \theta}. \quad (4)$$

结合(1)式即可得出: θ 值的增加将导致布拉格中心反射波长和反射波段带宽增大. 在焦锥态中, 胆甾相液晶的螺旋轴方向是非常混乱的, 因此在一个位置的 z 轴上会对应许多不同的 p' , 使液晶

层拥有一系列不同的布拉格中心反射波长和反射带宽, 它们的共同作用使得焦锥态胆甾相液晶的透过率相较于另外两种液晶状态波动很大, 又由于 p' 是在 p 的基础上随机倾斜螺旋轴方向得到的, 所以在波长为 p 处的透过率变化最大, p 是 $\theta = 0$ 时的 p' 值.

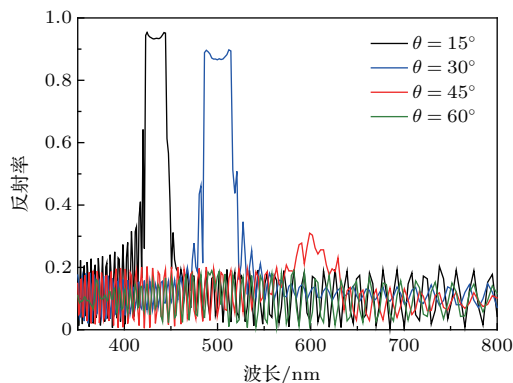


图7 螺旋轴处于不同倾斜角度下圆偏振光的布拉格反射
Fig. 7. Bragg reflection of the circular polarized light for the helix axis of cholesteric liquid crystal with different tilt angles.

3 结 论

本文研究了胆甾相液晶的平面态和焦锥态以及蓝相II态液晶的透射和反射性能. 由于蓝相液晶存在布拉格反射, 所以在设计时要避免布拉格反射发生在可见光波段. 由图4(a)可知, 正交偏振片情况下, 在布拉格中心反射波长右侧的长波侧的透过率要低于短波侧, 因此蓝相液晶显示器中使用的液晶螺距通常都要设置得小一些. 尽管采用小螺距的蓝相液晶可以获得较好的暗态, 但依然有少量漏光, 从而导致对比度下降^[6,22]. 通过对比焦锥态和蓝相液晶在正交偏光片之间的漏光特性, 可知胆甾相液晶的焦锥态也具有较好的暗态, 如果存在实现焦锥态中液晶更加混乱排列的技术手段, 则可以实现更好的暗态, 就有可能制作出新型的液晶显示器.

参考文献

- [1] Ge Z, Gauza S, Jiao M, Xianyu H, Wu S T 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 101104
- [2] Chen K M, Gauza S, Xianyu H, Wu S T 2010 *J. Display Technol.* **6** 49
- [3] Li Y, Jiao M, Wu S T 2010 *Opt. Express* **18** 16486
- [4] Dupuis A, Marenduzzo D, Yeomans J M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 011703
- [5] Liu Y, Lan Y F, Zhang H, Zhu R, Xu D, Tsai C Y, Lu J, Sugiura N, Lin Y, Wu S T 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 131102
- [6] Yan J, Luo Z, Wu S T, Shiu J W, Lai Y C, Cheng K L, Liu S H, Hsieh P J, Tsai Y C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 011113
- [7] Yang D K, Chien L C, Doane J W 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 3102
- [8] Kopp V I, Fan B, Vithana H K M, Genack A Z 1998 *Opt. Lett.* **23** 1707
- [9] Matsui T, Ozaki R, Funamoto K, Ozaki M, Yoshino K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3741
- [10] Shim K S, Heo J U, Jo S I, Lee Y J, Kim H R, Kim J H, Yu C J 2014 *Opt. Express* **22** 15467
- [11] Deng L G, Zhao Z L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7773 (in Chinese) [邓罗根, 赵找栗 2009 物理学报 **58** 7773]
- [12] Huang X Y, Yang D K, Bos P J, Doane J W 1995 *J. Soc. Inf. Display* **3** 165
- [13] Hashimoto K, Okada M, Nishiguchi K, Masazumi N, Yamakawa E, Taniguchi T 1998 *J. Soc. Inf. Display* **6** 239
- [14] John W S, Fritz W J, Lu Z J, Yang D K 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1191
- [15] Korpel A 1978 *Appl. Opt.* **17** 2037
- [16] Yang D K, Wu S T 2006 *Fundamentals of Liquid Crystal Display* (Chichester: John Wiley & Sons, Ltd)
- [17] Yang P, Liou K N 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 2072
- [18] Kriezis E E, Elston S J 1999 *Opt. Commun.* **165** 99
- [19] Kriezis E E, Elston S J 2000 *Opt. Commun.* **177** 69
- [20] Ogawa Y, Fukuda J, Yoshida H, Ozaki M 2013 *Opt. Lett.* **9** 3380
- [21] Dou H, Yu Y N, Ma H M, Sun Y B 2015 *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* **30** 16 (in Chinese) [窦虎, 于亚楠, 马红梅, 孙玉宝 2015 液晶与显示 **30** 16]
- [22] Lan Y F, Liu Y, Huang P J, Xu D, Tsai C Y, Lin C H, Sugiura N, Wu S T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 011903

SPECIAL ISSUE — Liquid crystal photonics and applications

Transmittance and reflectance of cholesteric and blue phase liquid crystal*

Dou Hu Ma Hong-Mei Sun Yu-Bao[†]*(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)*

(Received 24 December 2014; revised manuscript received 1 March 2015)

Abstract

Blue phase liquid crystal display (BPLCD) is emerging as next-generation display, because of its fast response speed and very wide viewing angle. However, it has some weak points to be improved. The light leakage at the dark state affects the contrast ratio, and needs to be analyzed and improved. Considering the double-twist structure of blue phase liquid crystal (BPLC) and the simple twist structure of cholesteric liquid crystal (ChLC), the two twist structures are similar. The transmittances and reflectances of planar and focal conic texture of cholesteric liquid crystal and blue phase II liquid crystal are simulated by finite-difference time domain (FDTD) method. The FDTD method is based on the Maxwell's equation, and can calculate the optical rotatory power directly. The effective optical rotatory powers of the three liquid crystal states are proposed and compared using the light leakages at the cell with crossed and parallel polarizers. The results show that the transmittance of BPLC with crossed polarizers is lower than that of planar texture and larger than that of focal conic texture of ChLC. The optical rotation of BPLC is not the same at any point in one periodic cross section in the light path because the liquid crystal arrangement is complex, the effective optical rotatory power is defined as the average value of the optical rotatory powers at all points. Comparing with the optical rotatory powers of planar and focal conic textures of ChLC, the optical rotatory power of BPLC is less than that of planar texture and larger than that of focal conic texture. Moreover, the Bragg reflections are also simulated, the results show that blue phase liquid crystal is similar to planar state cholesteric liquid crystal, only the reflection intensity is smaller, and no obvious Bragg reflection appears in focal conic state cholesteric liquid crystal. Considering the optical rotation and Bragg reflection, the light leakage and reflective light of BPLCD cannot be ignored if the helix pitch is not less enough, however, these of focal conic texture of ChLC are very small compared with those of BPLC, as a result, the focal conic texture of ChLC can replace blue phase liquid crystal to obtain the good dark state and high contrast ratio.

Keywords: optical rotatory power, blue phase liquid crystal, cholesteric liquid crystal, Bragg reflection**PACS:** 61.30.Mp, 42.79.Kr, 42.70.Df, 61.30.Cz**DOI:** [10.7498/aps.64.126101](https://doi.org/10.7498/aps.64.126101)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475042, 11304074, 11274088) and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-11-0931).

† Corresponding author. E-mail: sun_yubao@163.com