

文章编号:1007-2780(2011)05-0592-06

叠层结构的手性液晶单元的反射谱特性

秦 臻,方 旭,毛 鑫,黄子强*

(电子科技大学 光电信息学院,四川 成都 610054,E-mail:qzqinzen@gmail.com)

摘 要: 基于手性液晶的布拉格反射特性,设计了旋向相反的手性液晶所构成的红、绿、蓝三基色叠层级联结构,以达到增强单元反射率的目的。采用 Berreman 4×4 矩阵对其单元反射率进行了分析,比较了手性液晶的单旋向三基色叠层(三叠层结构)与双旋向三基色叠层(六叠层结构)单元的反射谱,给出了改变液晶材料参数和级联顺序进一步提高单元反射率的计算结果。在最佳参数与级联顺序下,六叠层单元的最大反射率达到 98.91%,三叠层单元的最大反射率为 64.95%。叠层结构单元の色度分析结果表明,三层单元の色温依级联液晶旋向而改变,范围为 5 240.9~7 029.8 K,在反射率最优的条件下,六叠层单元の色温为 6 285.7 K。

关 键 词: 手性液晶;级联;光谱; 4×4 矩阵

中图分类号: O753⁺.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20112605.0592

Performances of Reflection Spectrum of Stacking Cholesteric Liquid Crystal Cell

QIN Zhen, FANG Xu, MAO Xin, HUANG Zi-qiang*

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China, E-mail: qzqinzen@gmail.com)

Abstract: Based on the Bragg reflection of cholesteric liquid crystal, a structure is designed, which is formed by opposite charities of cholesteric liquid crystal of red, green and blue to enhance the reflectivity. This thesis reports the reflective spectra of LCD cells by the 4×4 matrix method. With the comparison of reflective spectra between solo RGB three-element-colors stack (three-layers) and the opposite RGB three-element-colors stack (six-layers), the calculated reflectivity is given by changing the parameters of liquid crystal. In the best condition, the reflectivity of a six-layers LCD stack reach the maximum of 98.91% while the reflectivity of a three-layers LCD stack reach the maximum of 64.95%. This thesis also reports the result of chromaticity analogy of the LCD stack, which ranging from 5 240.9 K to 7 029.8 K. Overall, in the best condition, the chromaticity of a six-layers LCD stack is 6 285.7 K.

Key words: cholesteric liquid crystal; stack; spectrum; 4×4 matrix

1 引 言

手性液晶因其独特的螺旋结构,决定了其双稳态特性及 Bragg 反射特性。手性液晶的 3 种主要织构(平面织构、焦锥织构、垂直排列)中,平面

织构的反射特性研究最为充分^[1-5]。

1991 年, D K Yang 发现了手性液晶具有零场下多稳定相态织构现象,并提出了聚合物稳定的手性液晶显示模式^[6-7]。此后, John L West^[8]对该现象进行了详细的研究,并以此为基础,通过

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-06-11

基金项目: 国家高科技 863 计划资助项目(No. 2009AA8042018); 国家大学生创新基金(No. 091061423)

作者简介: 秦臻(1988—), 男, 四川成都人, 大学本科, 主要从事液晶光电子方面的研究。

* 通讯联系人, E-mail: zqhuang@uestc.edu.cn

向液晶中加入不同螺距的手性添加剂,制作出了较窄光谱范围的反射式液晶单元,获得了红、绿、蓝(以下分别以 R、G、B 表示)3 种显示单元。按顺序重叠级联后,获得具有彩色显示功能的液晶显示单元,并通过调整级联顺序获得了最高的反射率。这种显示器因其反射波谱宽^[9]且消耗电能极少而受到广泛的关注^[10]。然而在上述研究中,只考虑了其中手性液晶的单一旋向,虽然以美国肯特州立大学为代表的多家单位利用上述特性做出了彩色零场双稳态显示器的原理演示样品^[11-13],然而直到现在却一直没得到应用。原因之一在于反射亮度不够,三基色叠层结构的上述显示器的反射率在 30% 以下。研究表明,左旋手性液晶反射左旋偏振光,右旋偏振光因透射而被双稳态显示单元底部的黑色吸收层吸收;如果仅反射右旋偏振光,则情况正好相反。因此,该级联方式下最大反射率小于 50%。为了提高反射率,我们提出使用左旋和右旋手性液晶叠层级联的结构,使自然光所分解的左旋与右旋偏振光总是能反射回去,从而提高总反射率。

20 世纪 70 年代,Berreman 提出了利用 4×4 矩阵法来分析光线在液晶中的传播过程^[14]。该方法直接求解麦克斯韦波动方程,对计算对象与边界条件没有做任何简化或者近似,同时考虑了光波的透射和反射现象,具有公认的高精确度和高可靠性。长期以来,Berreman's 4×4 矩阵法由于计算过程过于复杂而很少应用,仅作为标准对其他近似计算方法进行校正与评价。因此,在 Berreman's 4×4 矩阵的基础上,快速 4×4 矩阵法^[15]和扩展琼斯矩阵法^[16-17]被提了出来。此后,王谦在 Berreman's 4×4 矩阵的基础上,利用 Matlab 内建函数解决了矩阵形式幂的计算,简化了整个计算过程^[18],这为我们的研究提供了思路。Berreman's 4×4 矩阵法的采用,使最终结果较为可信,因而所研究的反射谱与色度分析结果较为可靠。

本文在 John L. West 研究的基础上,同时利用手性液晶左、右两种旋向的特性,采用 Berreman's 4×4 矩阵法研究 6 种单色手性液晶单元(R 左旋、R 右旋、G 左旋、G 右旋、B 左旋、B 右旋)按不同级联顺序叠层得到液晶显示单元,以期达到较高的理论反射率。对此进行了论证,并以计算结果来表征上述结构的光谱特性。

2 理论基础

2.1 手性液晶的 Bragg 反射

手性液晶材料的典型特征表现在其液晶分子呈周期性螺旋排列。当光沿着螺旋轴通过分子呈扭曲排列的液晶,依据螺距的不同会发生 3 种光学效应,这里只讨论手性液晶的 Bragg 反射效应。光垂直入射条件下,产生 Bragg 反射必须满足 Bragg 方程,即中心反射波长 λ_0 与液晶材料的平均折射率 n_{avg} 及螺距 p 成正比:

$$\lambda_0 = n_{\text{avg}} p \quad (1)$$

另一方面,液晶显示的反射光谱波带 $\Delta\lambda$ 与液晶材料的螺距 p 及双折射率 Δn 成正比^[19]:

$$\Delta\lambda = \Delta n p \quad (2)$$

2.2 Berreman's 4×4 矩阵

Berreman 由 Maxwell 方程推导出 4×4 矩阵:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = ik_0 \Gamma \Psi \quad (3)$$

k_0 为入射波矢, $\Psi = [E_x \quad \eta_0 H_y \quad E_y \quad -\eta_0 H_x]^T$, Γ 为 Berreman 矩阵^[20]。

对于式(3)可解得在 $[z, z + \Delta z]$ 范围内:

$$\Psi(z + \Delta z) = \exp(ik_0 \Gamma \Delta z) \Psi(z) \quad (4)$$

当将液晶分为很多层薄片时,可令第 j 层薄片的 $Q_j = \exp(ik_0 \Gamma_j \Delta z)$, 则式(4)可写为 $\Psi_j(z + \Delta z) = Q_j \Psi_j(z)$ 。

由电磁场边界连续性条件知 $\Psi_j(z^-) = \Psi_j(z^+)$ 和 $\Psi_j(z + \Delta z)^- = \Psi_j(z + \Delta z)^+$, 当光通过堆垛的液晶薄片时,注意到 Γ 是位置 z 的函数,最终光场 Ψ 由下式确定:

$$\Psi_{n+1} = Q_n Q_{n-1} \cdots Q_j Q_{j-1} \cdots Q_2 Q_1 \Psi_0 \quad (5)$$

令 $Q_T = Q_n Q_{n-1} \cdots Q_j Q_{j-1} \cdots Q_2 Q_1$ 则:

$$\Psi_T = Q_T \Psi_0 \quad (6)$$

$$\Psi_0 = \Psi_i + \Psi_r \quad (7)$$

式中 Ψ_T 是透射光场, Ψ_0 是入射光场和反射光场的叠加,这样计算过程就简化成为对 Q_T 的计算求解。这里 $Q_j = \exp(ik_0 \Gamma_j \Delta z)$ 需用特殊步骤求解,在 MATLAB 环境能很好地实现。

依据上述方法,将某种旋向的手性液晶充入到玻璃基板之间组成液晶盒,由于液晶的双折射率和螺距固定,该液晶盒能稳定的反射中心波长为 λ_0 的波长在一定范围内的光波。此时 $\Psi_T = Q_0 Q_T Q_0 (\Psi_i + \Psi_r)$, 其中 $Q_0 = \exp(ik_0 \Gamma_0 \Delta z)$ 为玻璃基板的 Q 矩阵, Γ_0 为折射率为 n 的各向同性介

质的 Berreman 矩阵。同理,级联的不同旋向、不同螺距以及不同双折射率的手性液晶层也可依照此方法计算其反射率。

2.3 光场分析

在与光线垂直的平面上选定坐标系 xOy , 偏振光都可用矩阵表示, 记作

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_1 e^{i\varphi_1} \\ \tilde{E}_2 e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

这样光矢量沿 x 轴的振幅为 E_0 的线偏振光 $\begin{cases} \tilde{E}_x = E_0 \\ \tilde{E}_y = 0 \end{cases}$, 光矢量沿 y 轴的振幅为 E_0 的线偏振光 $\begin{cases} E_x = 0 \\ \tilde{E}_y = E_0 \end{cases}$ 。光线由空气入射时, 设入射角为 θ_k , 入射光在 $x-z$ 平面内, 则波矢:

$$\boldsymbol{K} = [k_0 \sin \theta_k \quad 0 \quad k_0 \cos \theta_k]^T$$

通过变换前面推出的

$$\boldsymbol{\Psi} = [E_x \quad \eta_0 H_y \quad E_y \quad -\eta_0 H_x]^T$$

可以表示成为 $\boldsymbol{\Psi} = [E_x \quad r_x E_x \quad E_y \quad r_y E_y]^T$ 。所以当光线沿 x 方向偏振, 光场就可以表示成为:

$$\boldsymbol{\Psi} = [E_x \quad r_x E_x \quad 0 \quad 0]^T$$

当光线沿 y 方向偏振, 光场就表示成:

$$\boldsymbol{\Psi} = [0 \quad 0 \quad E_y \quad r_y E_y]^T。$$

2.4 反射率的计算原理

由于本文主要研究的是将不同颜色、不同旋向的液晶盒按不同方式级联以得到最佳的反射效率, 因此计算的结果最终应以反射率的方式给出, 将 $\boldsymbol{\Psi}_T$ 和 $\boldsymbol{\Psi}_0$ 的关系表示成强度的比值。选择色温 6 500 K 的标准照明体 D65 作为光源, 取照射面积为 1 cm^2 , 这样就得到入射光源在单位时间、单位立体角、单位波长间隔内辐射出的能量。在明视觉条件下, 人眼对不同波长的光的敏感度不同, 所以出射光应当乘上一个光敏感系数得到出射光的通量, 即:

$$\Phi = \sum \omega_\lambda \cdot k_m \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Gamma(\lambda) \quad (9)$$

其中 k_m 为明视觉条件下 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 的单色光的绝对光谱光效率值, $V(\lambda)$ 为光谱光效率函数, $\Delta\lambda$ 为单位波长间隔, $\Gamma(\lambda)$ 为对应入射光的反射率。由此可以计算反射光通量与入射量之比, 这个比值就是我们判断反射率高低的依据。

2.5 Berreman's 4×4 矩阵在 MATLAB 中的计算方法

利用之前介绍的方法, 首先计算出单个液晶盒中各液晶层的 $\boldsymbol{Q}_i$ 矩阵, 进而得到液晶盒中液晶

层的 $\boldsymbol{Q}_T$ 矩阵。此后将液晶层的 $\boldsymbol{Q}_T$ 矩阵与玻璃的 $\boldsymbol{Q}_0$ 矩阵按照级联顺序相乘, 即得到整个液晶显示单元的 $\boldsymbol{Q}$ 矩阵, 即:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{Q}_0 \boldsymbol{Q}_T \boldsymbol{Q}_0 \boldsymbol{Q}_T \cdots \boldsymbol{Q}_0 \quad (10)$$

由于在计算中采用单一波长的入射光, 由式 (7) 知, 在玻璃介质中同时存在入射光和反射光, 所以光在经过玻璃介质时会出现干涉效应。为了解决这个问题, 计算中通过连续改变玻璃的厚度参数, 对多次的计算结果取平均值以消除干涉对计算结果的影响。这样就建立了级联液晶单元的数学模型。

因为需要通过计算得到液晶显示单元在整个可见光范围内的反射光谱特性曲线, 所以选择波长 $360 \sim 760 \text{ nm}$ 的入射光, 分别计算通过上述数学模型之后的反射光相对强度, 最后得到整个可见光范围内的反射光谱特性曲线。图 1 为上述物理模型相应的计算流程。

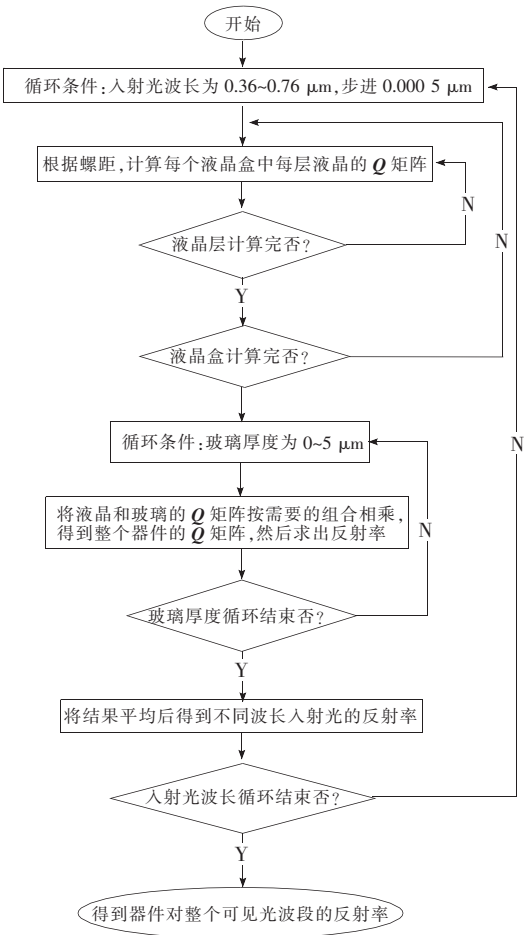


图 1 程序流程图

Fig. 1 Program flow diagram

3 计算结果及分析

在仿真中假定液晶为非吸光材料,按照 2.3 节所述,以相互正交的线偏振光来模拟自然光。模拟计算中所用到的主要参数如下:寻常光折射率 $n_o=1.52$;非常光折射率 $n_e=1.79$;入射角 $\theta=0^\circ$ 。通过前期的计算和参考文献,发现在液晶膜层取 10 个螺距时,反射光谱能够很好地反映出 Bragg 反射特性^[21]。结合计算中所用的液晶,并保持所有液晶盒有相同的盒厚,选取 $4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的液晶盒。

3.1 3 层液晶盒的排列

经过详细对比,发现在模拟计算中对于不同颜色液晶盒的前后排列顺序所得反射光谱没有差别;并且整个液晶级联单元中将所有液晶盒的旋向改为相反旋向,结果也是相同的。也就是说,计算中只考虑不同颜色液晶盒的旋向对整个单元反射光谱的影响。

所有的结果可以综合为图 2 中的 4 条曲线,其中 Γ 表示上文提出的方法计算出的反射光通量与入射量之比。图 2(a)所用的红、绿、蓝液晶均为相同旋向(同为左旋或右旋),可以看到其反射率仅在 50% 附近。如果将其中红色的液晶改为与另外两种颜色的液晶相反的手性,则在图 2(b)中看到其反射率在红、绿色光交界处有明显提高。同样的情况下,若仅使蓝色液晶的手性相反,图 2(c)表明反射率在蓝、绿色光交界处提高。当绿色液晶的手性与另两种液晶相反时,从图 2(d)可以看出,反射率的提高与前面两种情况的叠加类似,而且反射光通量的比值 Γ 从 0.50 左右大幅提高到接近 0.65。

反射率提高的原因为:在靠近液晶主反射波长范围的一部分反射率比较高的区域,当左旋和右旋的液晶级联在一起共同反射时,相反旋向的液晶层会反射一部分漏过的其他颜色的圆偏振光。

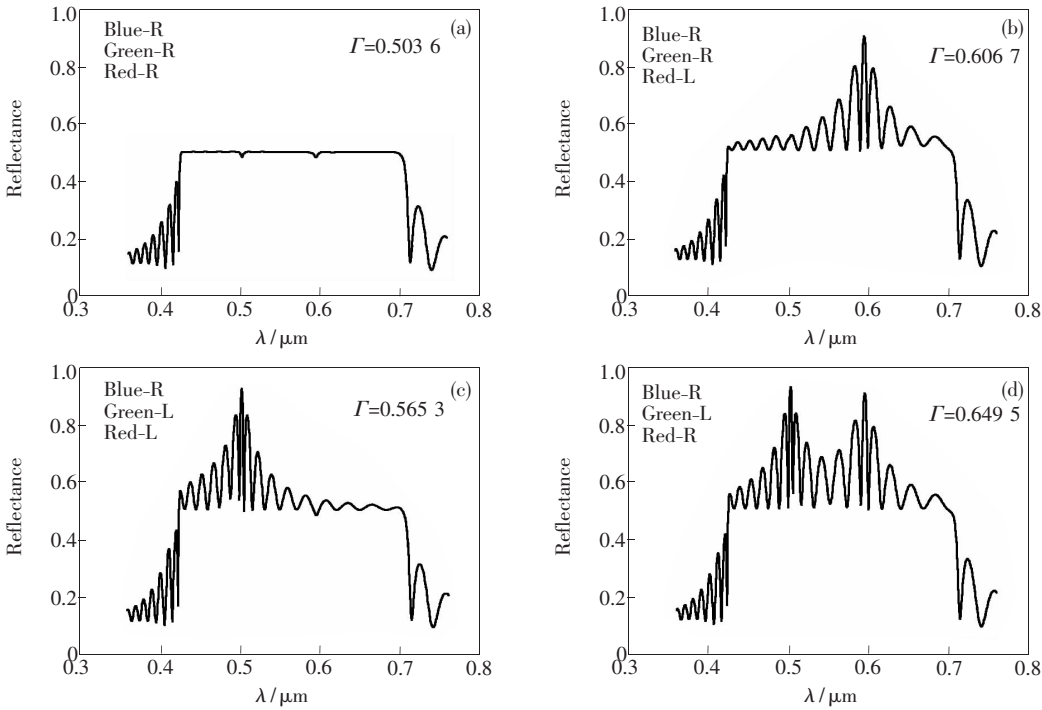


图 2 不同手性(图中-R 表示右旋,-L 表示左旋)的红绿蓝三层液晶堆叠的反射光谱。(a) 三层液晶层手性相同;(b) 红色液晶层具有相反手性;(c) 蓝色液晶层具有相反手性;(d) 绿色液晶层具有相反手性。

Fig. 2 Reflection spectra of the red green blue stack with different chirality(R represents right-lateral,L represents left-lateral). (a) All three CHLC films have the same chirality; (b)The red film has the opposite chirality; (c)The blue film has the opposite chirality; (d)The green film has the opposite chirality.

3.2 6 层液晶盒的排列

按照前文所述的计算方法,计算得到 6 层液

晶盒级联的显示单元的反射光谱特性曲线。图 3 (a)展示了液晶盒盒厚为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 时的反射光谱特

性曲线,图 3(b)是为了减小整个器件的厚度,采用 10 倍螺距作为盒厚的结果。

可以看到,由于左旋和右旋偏振光都有液晶盒

进行有效的反射,6 层液晶盒极大地提高了整个系统的反射率,总的反射比值很接近 100%,因为这些原因,液晶盒的级联方式对反射率的影响就很微小了。

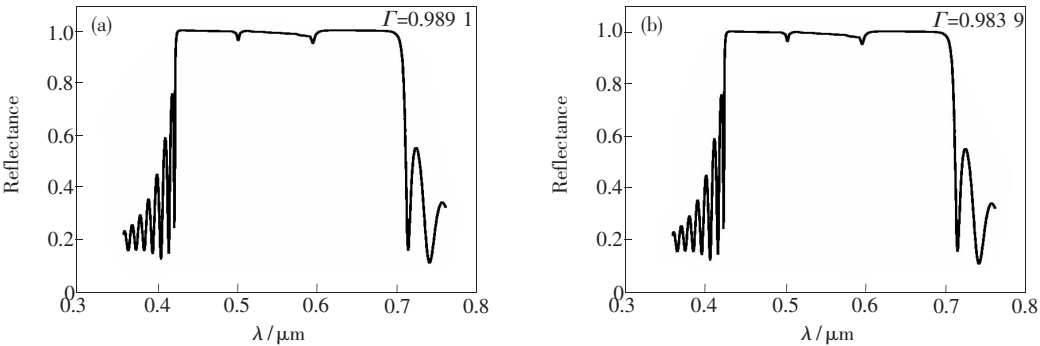


图 3 6 层液晶堆叠的反射光谱. (a) 每层液晶的厚度为 $4\text{ }\mu\text{m}$; (b) 每层液晶的厚度为 $10P_0$.

Fig. 3 Reflection spectra of a stack with six films. (a) Thickness of each film is $4\text{ }\mu\text{m}$; (b) Thickness of each film is $10P_0$.

3.3 色度及色温分析

以标准照明体 D65 作为光源,D65 的色温为 6 500 K,表 1 给出了在图 2 和图 3 中 3 层和 6 层的不同液晶盒排列下反射光的色温与 D65 的色温对比及偏差百分比。从表 1 中可以看出,3 层 a 和 6 层的色温偏差不大,接近于标准光源。

表 1 不同排列下反射光的色温与标准照明体对比
Table 1 Comparison of color temperature between the reflection of different LCD cells arrangement and D65

液晶盒排列	色温/K	偏差/%
D65	6 500.0	0
3 层 a	6 287.3	-3.27
3 层 b	5 240.9	-19.37
3 层 c	7 029.8	8.15
3 层 d	5 825.4	-10.38
6 层	6 285.7	-3.30

在 CIE 1931 色度系统中对图 2 和图 3 中的反射光谱曲线进行分析,结果显示在图 4 中。可以看出,以上几种排列方式在反射后得到的色彩都非常接近标准白色,也就是拥有很好的色彩还原能力。图中三角形顶点为单色液晶盒反射光在色度图上的位置,3 个坐标组成的三角形即是 3 种

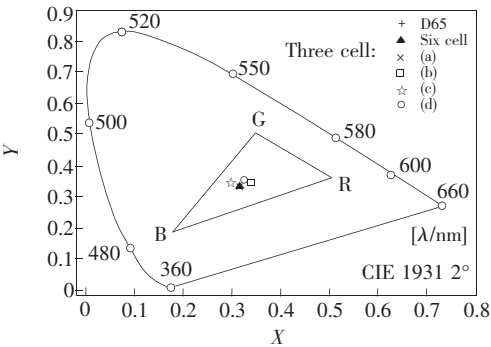


图 4 反射光在 1931 CIE 色度图中的位置
Fig. 4 Reflected light in 1931 CIE chromaticity diagram

反射光所能混合成的颜色范围。

4 结 论

为了尽可能地提高反射式胆甾型液晶显示单元的反射亮度,利用 Berreman's 4×4 矩阵对多层液晶盒级联之后的反射特性进行了模拟计算,主要对 3 色液晶的 3 层和 6 层液晶盒级联方式所得的效果分别进行了对比。结果表明,当 3 层液晶盒级联时,液晶盒的旋向对液晶显示单元的反射效果有较大影响,但是液晶盒的排列顺序对反射效果影响不大。6 层液晶盒的堆叠能够很好地提高显示单元的整体反射率,并且表现出来的色温效果非常好。

参 考 文 献:

- [1] 张大勇,李剑锋. 利用动态反射法对手性液晶 Bragg 反射的分析 [J]. 液晶与显示,2005,20(2):107-109.
- [2] Chen J Y, Chen L W. Twist defect in chiral photonic structures with spatially varying pitch [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005,38(8):1118-1126.
- [3] Zhang Y N, Xu G X, Zhao Z W, *et al.* Photonic bandgap properties of one-dimensional photonic crystal consisting of complex artificial media[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2005,10(3):534-538.
- [4] Chen J Y, Chen L W. Photonic defect modes of cholesteric liquid crystal with spatially varying pitch[J]. *Phys. B: Condensed Matter*, 2005,357(3-4):282-289.
- [5] Z Y Xiao,Z H Wang. One-dimensional chiral photonic band gap structure analyzed by non-symmetric transmission-line method[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*,2003,5280:467-472.
- [6] Yang D K,Chien L C,Doane J W. Cholesteric liquid crystal/polymer gel dispersion bistable at zero field[J]. *Conference Record of the 1991 International Display Research Conference*, 1991:49-52.
- [7] Yang D K, Doane J W, Yaniv Z, *et al.* Cholesteric reflective display: drive scheme and contrast [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994,64(15):1905-1907.
- [8] West J L, Bodnar V. Optimization of stacks of reflective cholesteric Films for full color displays [J]. *Information Display*,1999,99:29-32.
- [9] 黄维,边震宇. 具有宽波反射特性的手征向列相液晶的研究进展 [J]. 液晶与显示,2009, 24(3):322-332.
- [10] 黄子强,杨文军. 纳米粒网络对于手性液晶反射光谱的展宽效应 [J]. 液晶与显示,2006, 21(1):1-5.
- [11] 才勇,黄锡珉,马凯. 双稳反射式螺旋相液晶显示器 [J]. 液晶与显示,1997,12 (3):196-205.
- [12] 刘厚通,李国华,郝殿中. 螺旋状液晶显光特性理论模拟与实验研究[J]. 光学学报,2007:229-334.
- [13] 任洪文,凌志华,朱希铃. 聚合物网络稳定液晶的电光偏正片[J]. 光学学报,2000,20(4):548-552.
- [14] Berreman D W. Optics in smoothly varying anisotropic planar structures:Application to liquid crystal twist cells [J]. *Opti. Soci. Amer.*,1973,63:1373-1379.
- [15] Wöhler H, Hass G, Fritsch M, *et al.* Fast 4×4 matrix method for inhomogeneous uniaxial media [J]. *Opti. Soci. Amer.*,1988,5(9):1551-1557.
- [16] Yu F L, Chen J, Tang S T. New extended Jones matrix method for twisted nematic liquid crystal displays at oblique incidence [J]. *Proceedings of SPIE*,1996,2892:17-27.
- [17] Gu C, Yeh P. Extended Jones matrix method [J]. *Opti. Soci. Amer.*,1993,10(5):966-973.
- [18] 王谦. 反射式液晶显示光学的理论计算 [J]. 光子学报,2001,30(4):2-3.
- [19] 张智勇,陈元模. 显示用手性液晶材料发展现状 [J]. 液晶与显示,2003,18:217-324.
- [20] Berreman D W. Optics in strat field and anisotropic media: 4×4 matrix formulation [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1972, 62 (4):502-510.
- [21] Chen J Y, Chen L W. Twist defect in chiral photonic structures with spatially varying pitch [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*,2005,38(8):1118-1126.