

胆甾相液晶电控螺旋畸变导致的布拉格反射特性

范志新¹ 于天池² 黄 欢¹ 张 恒¹ 吴永晗¹

(¹ 河北工业大学应用物理系, 天津 300130; ² 大连交通大学数理系, 辽宁 大连 116028)

摘要 研究了平面织构胆甾相液晶在垂直于螺旋轴方向施加电场后,引起螺旋畸变导致布拉格反射光强度变化特性,利用液晶矩阵光学,琼斯矩阵法与 Matlab 矩阵计算软件对有螺旋畸变情况下的布拉格反射光谱特性进行了分析和数值计算。从数值计算和实验结果可知,胆甾相液晶在其垂直螺旋轴方向施加不同电压电场时,布拉格反射光中心波长不随电压改变,而布拉格反射光强会随电压的增大而减弱。提出一种电致螺旋畸变模型,对实验结果和数值计算结果给出了合理的解释,认为利用电场改变胆甾相液晶螺距进而设计电控颜色变化液晶器件的原理是不可靠的。

关键词 光学材料; 胆甾相液晶; 螺旋畸变; 琼斯矩阵; 布拉格反射; 螺距

中图分类号 TN204 **文献标识码** A

Bragg Reflection Properties of Electrically Controlled Helix Distortion in Cholesteric Liquid Crystals

Fan Zhixin¹ Yu Tianchi² Huang Huan¹ Zhang Heng¹ Wu Yonghan¹

(¹ Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China
² Department of Mathematics and Physics, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract The optical properties and the change of Bragg reflected light intensity of the cholesteric liquid crystal in planar texture induced by helix distortion were studied when the applied electric field was perpendicular to the direction of the helical axis. Using LCD matrix optics, Jones matrix method, and Matlab matrix calculation software, reflectance spectra characteristics were analyzed and numerically calculated. According to the numerical and experimental results, the center wavelength of reflected light does not change with voltages and the Bragg reflected light intensity decreases with the increasing voltage. A model of field induced helix distortion was proposed to give the reasonable explanation on the experimental and numerical results. It is also found that the theory for designing the LCD with color change using electrically controlled helix distortion is not feasible.

Key words optical material; cholesteric liquid crystal; helix distortion; Jones matrix; Bragg reflection; pitch

1 引 言

胆甾相液晶具有奇特的旋光性、偏振光二色性和可见光布拉格选择反射特性,在液晶显示领域和其它光电器件领域获得了应用^[1~6]。液晶物理经典理论认为^[7~10],在垂直螺旋轴方向上施加一电场后,由于电场的作用胆甾相液晶的螺距会发生变化;根据螺距和中心波长的关系可知中心波长也会随着改变。与此对应的实验现象就是反射光的颜色发生变化,呈现出不同颜色的反射光。把胆甾相液晶装

入共面转换开关(In-plane switching, IPS)盒中,共面转换开关相邻的两个电极极性相反^[11]。在垂直螺旋轴方向上施加电场来改变胆甾相液晶的螺距,使布拉格反射光波长从蓝到绿到红随电场改变,以解决不需要彩色滤光膜或者背光源,得到新型的反射式彩色显示模式。但是,经过实验发现此过程中并未出现过反射光颜色的变化,即当施加电压后,布拉格反射光的波长并未改变,而是随着电压的增加反射光强度减弱。本文对此实验结果进行理论研

收稿日期: 2007-07-03; 收到修改稿日期: 2007-11-15

基金项目: 河北省高校重点学科建设项目和辽宁省教育厅科技项目资助课题。

作者简介: 范志新(1960—),男,吉林人,博士,教授,主要从事液晶物理科研与教学方面的工作。

E-mail: zxfan@hebut.edu.cn

究, 试图给出合理的解释。

2 数值计算

对胆甾相液晶膜反射特性的数值计算方法主要有 Berraman 矩阵法^[12]、琼斯(Jones)矩阵法^[13]和有限元计算方法^[14]。

胆甾相液晶分子指向矢在空间坐标系中是沿着螺旋轴的方向而周期性的改变, 可表示为

$$\mathbf{n} = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (1)$$

其中 θ 是液晶指向矢同 x 轴的夹角。假设入射光沿着液晶螺旋轴的方向传播, 在胆甾相液晶螺旋轴线方向上, 把一个螺距 p 均分成 m 层, 每一层旋转的角度 $2\pi/m$ 。数值计算模型如图 1 所示。

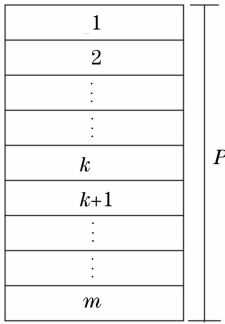


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Model of numerical calculation

根据麦克斯韦方程, 在液晶单层中入射光的电场和磁场可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_i &= \begin{bmatrix} -(n_o/\eta_0)E_{yi} \\ (n_e/\eta_0)E_{xi} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_r &= \begin{bmatrix} E_{xr} \\ E_{yr} \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_r &= \begin{bmatrix} (n_o/\eta_0)E_{yr} \\ -(n_e/\eta_0)E_{xr} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_t &= \begin{bmatrix} E_{xt} \\ E_{yt} \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_t &= \begin{bmatrix} -(n_o/\eta_0)E_{yt} \\ (n_e/\eta_0)E_{xt} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

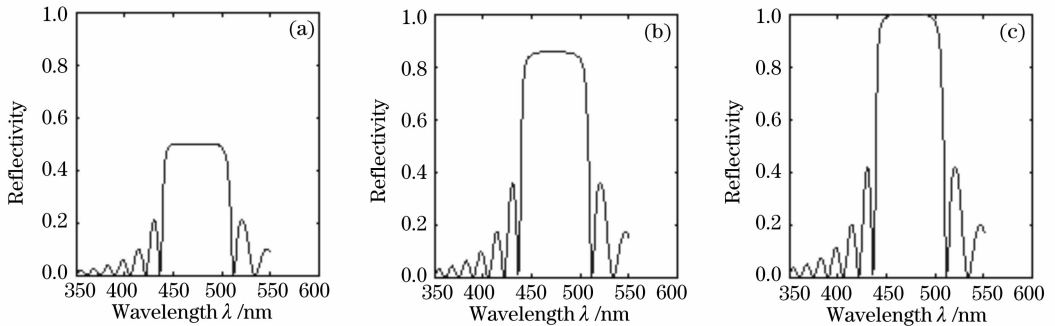


图 2 不加电场布拉格反射光谱数值计算结果

Fig. 2 Results of numerical calculation of Bragg reflection spectra without applied field

其中 $\eta_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$ 为真空阻抗, $\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_r, \mathbf{E}_t$ 分别表示每一单层的入射光电场、反射光电场和透射光电场, $\mathbf{H}_i, \mathbf{H}_r, \mathbf{H}_t$ 分别表示每一单层的入射光磁场、反射光磁场和透射光磁场。根据能量守恒定律、坐标旋转方程和边界条件 $\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_{k+1}, \mathbf{H}_k = \mathbf{H}_{k+1}$, 结合(1)式、(2)式可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= \omega \begin{bmatrix} \cos \beta & (\bar{n}/n_e) \sin \beta \\ -(\bar{n}/n_o) \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}_i, \\ \mathbf{E}_r &= \omega \frac{\Delta n}{2n_e n_o} \sin \beta \begin{bmatrix} \bar{n} \sin \beta & -n_o \cos \beta \\ -n_e \cos \beta & -\bar{n} \sin \beta \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}_i, \end{aligned} \quad (3)$$

其中上下两层液晶指向矢之间有夹角为 β ,

$$\begin{aligned} \bar{n} &= (n_e + n_o)/2, & \Delta n &= n_e - n_o, \\ \omega &= [\cos^2 \beta + (\bar{n}^2/n_e n_o) \sin^2 \beta]^{-1}. \end{aligned}$$

对液晶各膜层的反射特性进行逐层递推, 结合 Matlab 软件对胆甾相液晶膜的反射特性进行数值计算, 反射率

$$R = r \cdot r^*, \quad (4)$$

其中 $r = \mathbf{E}_r/\mathbf{E}_i$ 。

计算中选用的液晶材料参量取 $n_e = 1.7, n_o = 1.5$, 所用胆甾相液晶为左旋, 螺距 $P = 295$ nm, 一个螺距内分成 600 个薄层, 液晶层厚度是 10 个螺距, 光线正入射, 无电场时布拉格反射光谱数值计算结果如图 2 所示。

如图 2(a) 所示在平面织构下左旋胆甾相液晶层对线偏振光的布拉格反射率大约为 50% 左右; 图 2(b) 对椭圆偏振光的布拉格反射率在 85% 多点; 图 2(c) 对左旋圆偏振光反射光谱中, 与液晶同旋的圆偏振光则发生了完全的布拉格反射, 其布拉格反射率达到 100%。以上三种偏振光, 即线偏振、椭圆偏振和圆偏振光的反射率都是在胆甾相液晶处在平面织构时, 且不外加电场情况下得到的。

建立一种电致胆甾相液晶螺旋畸变螺距不变的模型:假设在液晶盒中,胆甾相液晶处在螺旋轴方向垂直表面的平面态,当采用共面转换开关电极沿垂直于螺旋轴方向均匀施加电场后(实际的电场肯定是不均匀的),会发生电致螺旋畸变效应,即每层的液晶指向矢不再是沿螺距方向均匀扭转,而是发生部分液晶层指向矢沿电场方向排列形成部分场致向列相,但此时螺距并没有改变,如图 3 所示。图 3(a)为未加电场平面织构,图 3(b)为电控螺旋畸变但螺距不变,图 3(c)为场致向列相。

采用琼斯矩阵和 Matlab 软件进行分层数值模拟,其线偏振光的光谱伴随着电压的增大分别呈现

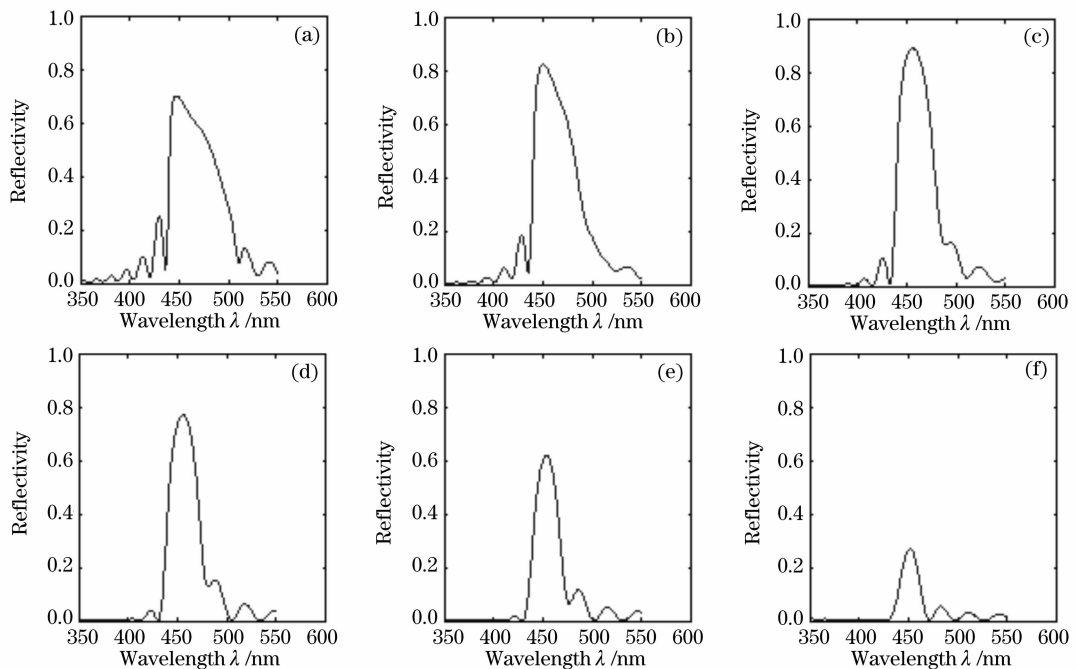


图 4 随电压变化的线偏振光反射率-波长曲线

Fig. 4 Reflectivity-wavelength curve of liner polarized light with voltage change

图 4(a)~图 4(f)依次代表外加电场逐渐增大,且发生场致向列相变化的部分占整个螺距的比例分别为 $1/5, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 7/8$ 时的光谱曲线。

图 5 是随电压增大胆甾相液晶层对椭圆偏振光的反射光谱变化,其中图 5(a)~图 5(f)依次代表外加电场逐渐增大,且发生场致向列相变化的部分占整个螺距的比例分别为 $1/5, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 7/8$ 时的光谱曲线。

图 6 中随电压增大液晶对左旋圆偏振光反射光谱变化,其中图 6(a)~图 6(f)依次代表外加电场逐渐增大,且发生场致向列相变化的部分占整个螺距的比例分别为 $1/5, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 7/8$ 时的光谱

出图 4 中的变化趋势。

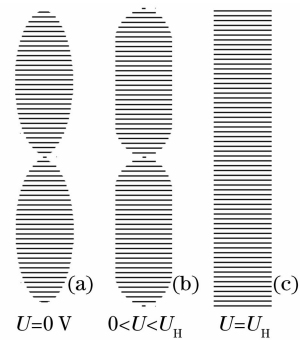


图 3 螺旋畸变螺距不变模型

Fig. 3 Model of helix distortion while the pitch is unchanged

曲线。

3 理论分析

假定螺旋畸变螺距不变,如图 4,在外加电场逐渐增大的情况下,线偏振光对应的布拉格反射先是呈现出一种上升的趋势,反射率越来越大,几乎达到 100%。进一步增大电压时,其反射率开始下降,反射率越来越小。当液晶织构完全变成场致向列相时,反射率为零,布拉格反射效应消失。如图 5,在外加电场逐渐增大的情况下,椭圆偏振光的布拉格反射率则很规则的呈现出下降的趋势,随着场致向列相比例的加大,反射率越来越小。同样,当液晶织

构完全变成场致向列相时，反射率为零，布拉格反射效应消失。如图 6，左旋圆偏振光在左旋液晶中的布拉格反射率随电场增大的变化趋势和椭圆偏振光

的变化规律是一致的，同样是随着场致向列相比例的加大，反射率降低，并最终为零，丧失了布拉格反射效应。

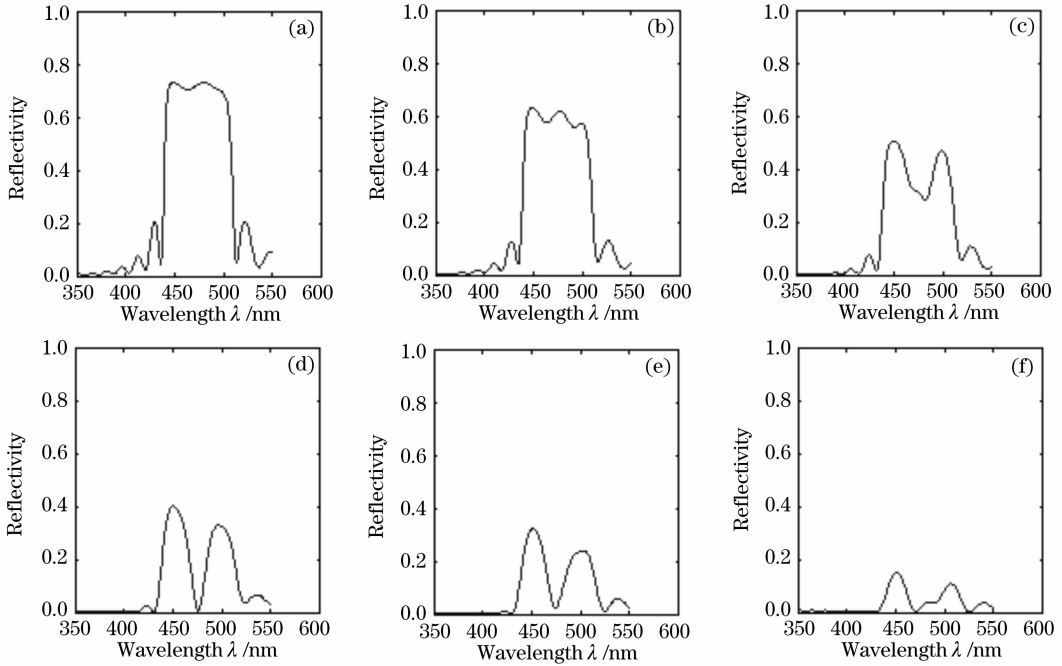


图 5 随电压变化的左旋椭圆偏振光反射率-波长曲线

Fig. 5 Reflectivity-wavelength curve of levorotatory elliptic polarized light with voltage change

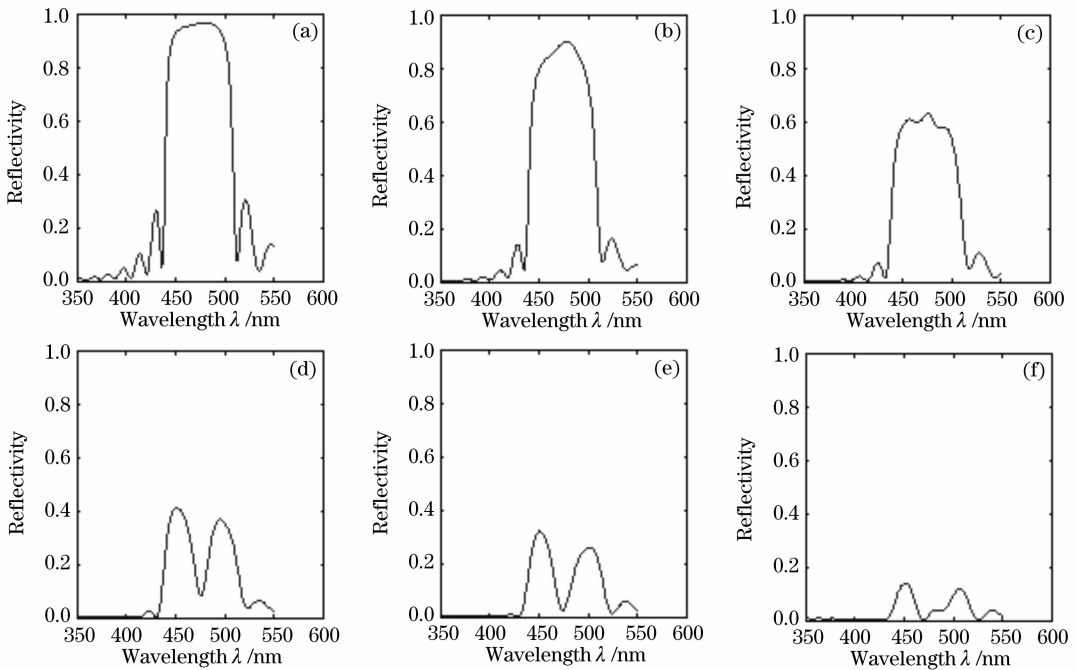


图 6 随电压变化的左旋圆偏振光反射率-波长曲线

Fig. 6 Reflectivity-wavelength curve of levorotatory circular polarized light with voltage change

温度变化会使螺距均匀变化而布拉格反射光波长随之变化，但电场变化致螺旋发生畸变并不一定能使螺距变化。以往的液晶理论与实验研究得出电

场会使胆甾相液晶螺距变长结论应该是有条件的，假设两相邻螺旋在均匀电场作用下都有螺距变长的能量，相互抵触结果只能是场致向列相部分增加量

等于螺旋部分减小量,螺距没有改变。文献[11]的实验结果表明,随电场增加螺距并没有变长。其实很多实验迹象显示电场不能使螺距变长,例如长螺距的胆甾相液晶在液晶盒里,施加电场从平面态进入指纹结构,再加电场就进场致向列相,偏光显微镜下看不到指纹条纹加宽的过程。再有,对于短螺距的胆甾相液晶在小预倾角的液晶盒里,施加电场从平面态进入焦锥态,再加电场也就进场致向列相,在高倍偏光显微镜下也看不到焦锥态晶畴里部分场致向列相的黑条纹加宽的过程,而是原地逐渐地转变成完全的场致向列相。本文假设的螺旋畸变螺距不变模型的数值计算结果能合理地解释文献[11]的实验结果,因此有理由质疑“电场会使螺距变长”之说的可信性。

4 结 论

在特定的“液晶盒-电场”几何布局下,电场变化可以导致胆甾相液晶发生螺旋畸变,这种电场引发的螺旋畸变是否伴随胆甾相液晶的螺距变化是一个有争论的问题。本文假设的模型认为,虽然电场可以引起螺旋畸变,但螺距并没有改变。采用这种模型,利用现有的胆甾相液晶琼斯矩阵数值计算方法,计算了线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光入射下,不同电场导致螺旋畸变的胆甾相液晶的反射谱,计算结果能解释文献[11]的实验现象。理论分析与文献[11]的实验结果表明利用电场改变胆甾相液晶的螺距进而设计电控颜色变化液晶器件的原理是不可靠的。

参 考 文 献

- 1 Wang Xinjiu. *Liquid Crystal Optics and Liquid Crystal Displays* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 184~194, 350, 465
王新久. 液晶光学与液晶显示[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 184~194, 350, 465
- 2 Liu Houtong, Li Guohua, Hao Dianzhong. Theoretical simulation and experimental research of cholesteric liquid crystal optical rotatory characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,

- 27(2): 229~334
刘厚通,李国华,郝殿中. 螺状相液晶旋光特性理论模拟与实验研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 229~334
- 3 Ren Hongwen, Ling Zhihua, Zhu Xiling *et al.*. An optoelectric polarizer by polymer network stabilized liquid crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(4): 548~552
任洪文,凌志华,朱希玲 等. 聚合物网络稳定液晶的电光偏振片[J]. *光学学报*, 2000, 20(4): 548~552
- 4 Zhang Dayong, Li Jianfeng, Liu Cangli *et al.*. Study of cholesteric liquid crystals filter[J]. *Applied Laser*, 2005, 25(5): 316~318
张大勇,李剑锋,刘全理 等. 手性液晶滤光片研究[J]. *应用激光*, 2005, 25(5): 316~318
- 5 Deng-Ke Yang, Xiao-Yang Huang, Yang-Ming Zhu. Bistable cholesteric reflective displays: Materials and drive schemes[J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1997, 27: 117~146
- 6 Meyer R B. Effects of electric and magnetic fields on the structure of cholesteric liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, 12(9): 281~285
- 7 de Gennes P G. Calculation of the distortion of a cholesteric structure by a magnetic field[J]. *Solid State Commun.*, 1968, 6(3): 163~170
- 8 H. Baessler, M. M. Labes. Relationship between electric field strength and helix pitch in induced cholesteric-nematic phase transitions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1968, 21(27): 1791~1793
- 9 C. J. Grritsma, P. V. Zanten. Electric field induced texture transformation and pitch contraction in a cholesteric liquid crystal [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1971, 15(3): 257~260
- 10 P. G. de Gennes, J. Prost. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1993. 289~293
- 11 S. Chandrasekhar. *Liquid Crystals* [M]. New York: Cambridge University Press, 1992. 277~280
- 12 Qian Xiangzhong, The action of electric field on liquid crystals cholesteric phase[J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 1997, 12(4): 259~263
钱祥忠. 电场对胆甾相液晶的作用[J]. *液晶与显示*, 1997, 12(4): 259~263
- 13 Sang Kyung Kim, Daeseung Kang. Electro-optical characteristics of an in-plane switching cholesteric LCD[C]. SID 06 Digest P-129, 2006. 684~686
- 14 D. W. Berreman, T. J. Scheffer. Bragg reflection of light from single-domain cholesteric liquid crystal films [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 25(3): 577~581
- 15 Dengke Yang, Xiongdong Mi. Modeling of the reflection of cholesteric liquid crystals using Jones matrix[J]. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2000, 33: 672~676
- 16 Qi Hong, Thomas X. Wu, Shin-Tson Wu. Optical wave propagation in cholesteric liquid crystals using the finite element method[J]. *Liquid Crystals*, 2003, 30(3): 367~375