

# 铁电液晶螺旋结构的理论近似研究\*

唐先柱<sup>1)2)</sup> 鲁兴海<sup>1)</sup> 彭增辉<sup>1)</sup> 刘永刚<sup>1)</sup> 宣 丽<sup>1)</sup>

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 7 月 19 日收到; 2009 年 12 月 1 日收到修改稿)

由铁电液晶 (FLC) 手性近晶 C 相下螺旋结构的理论近似计算得出 FLC 一个螺距内平均折射率的表达式, 根据表达式可得出一个螺距内的 FLC 分子作为一个整体可以看成是一个向列相液晶分子模型的结论. 当 FLC 沿螺旋轴方向的厚度等于 FLC 螺距的整数倍时, 液晶盒内垂直取向的 FLC 分子可看作向列相液晶模型组成的集合. ZLI-3654 型 FLC 与 5CB 型向列相液晶的实验结果验证了上述结论, 理论结果和实验结果一致. 这一理论可为畸变螺旋 FLC 和垂直排列畸变螺旋 FLC 器件的制备以及 FLC 的应用提供理论指导和更深的认识.

**关键词:** 铁电液晶, 螺距, 平均折射率, 向列相液晶

**PACC:** 4270D, 6130B, 6130C

## 1. 引 言

向列相液晶如今以其自身的优势在很多领域已得到广泛的应用<sup>[1-5]</sup>, 但由于响应速度慢, 在有些领域的应用受到限制, 如不能满足高清晰、高分辨率显示和大容量动态显示的要求<sup>[6,7]</sup>, 在动态画面显示中, 高速移动图像会出现“拖尾”、“重影”等现象. 同时由于向列相液晶响应速度慢, 在光学系统中, 特别是在自适应光学系统中的应用也受到限制, 只有解决响应速度慢的问题, 才能够使向列相液晶器件在光学系统中得到更广泛的应用. 因此, 提高向列相液晶响应速度或者开发快速响应的其他相液晶器件已经成为近年来的研究热点.

自从 Clark 和 Lagerwall<sup>[8]</sup> 发现了表面稳定铁电液晶 (SSFLC) 模式以来, 铁电液晶 (FLC) 因拥有微秒级响应时间<sup>[9,10]</sup> 等优点而备受青睐, 是一种很有应用前景的液晶材料. 当把 FLC 置于两块相距约为  $2\ \mu\text{m}$  的涂有取向层的钢锡氧化物 (ITO) 玻璃基板之间时, 取向层表面锚定使 FLC 解螺旋, 此时取向层表面与 FLC 接触的界面处会产生界面应力. 对于 ZLI-3654 型 FLC, 分子层结构容易出现“之”字形缺陷 (zigzag defect)<sup>[11]</sup> (图 1), 产生的缺陷严重影响了 FLC 器件的性能; 对于手性向列相-手性近晶 C 相

(chiral nematic phase-chiral smectic C phase, 简记为  $N^* \text{-SmC}^*$ ) 相序 FLC, 在相变过程中不存在近晶 A 相 (smectic A, 简记为 SmA), 在由  $N^*$  冷却相变到  $\text{SmC}^*$  过程中, 虽然不会出现 SSFLC 器件中典型的“之”字形排列缺陷, 会形成两种倾斜方向相反的 A, B 两畴织构<sup>[12,13]</sup> 层排列, 如图 2 和图 3 所示. 图 3 中  $R$  代表摩擦方向;  $P_s$  代表自发极化矢量, A 畴层结构中  $P_s$  垂直纸面向外, B 畴层结构中  $P_s$  垂直纸面向内. 两畴织构降低器件的对比度, 影响器件性能. 对于上述缺陷, 消除的方法已有很多报道, 但各有优缺点且不太实用. FLC 技术距商用化还有一段距离, 其技术瓶颈不在 FLC 的材料制备上, 而是在器件制备的质量上, 难以实现大面积均匀排列.

SSFLC 模式一般要求液晶盒间隙小于 FLC 材料的螺距, 液晶盒间隙一般不超过  $2\ \mu\text{m}$ , 而且这种 FLC 器件制备可靠性差, 液晶盒间隙均匀性差, 另外还要求 FLC 有较大的双折射才能实现较好的对比度. 而畸变螺旋铁电液晶 (DHFLC)<sup>[14-16]</sup> 和垂直排列畸变螺旋铁电液晶 (VA-DHFLC)<sup>[17-19]</sup> 器件容易排列, 可实现连续线性灰度级和线性相位调制, 这种器件对液晶盒间隙要求不苛刻, 借助施加电场时螺旋结构发生变化, 从而达到应用的目的. 本文对 FLC 自身的螺旋结构进行理论近似计算, 并且实验结果和这一理论结果相符合, 为制备 DHFLC 和 VA-

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60578035, 50473040) 资助的课题.

DHFLC 器件以及 FLC 的应用提供了理论指导.

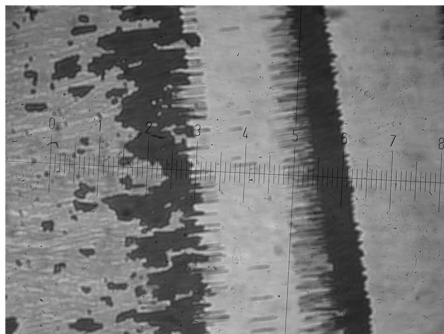


图 1 FLC 的“之”字形缺陷

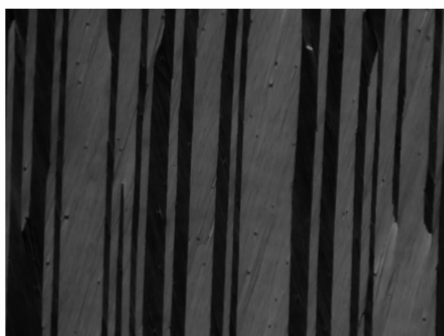


图 2 FLC 两畴结构的正交偏光显微镜照片

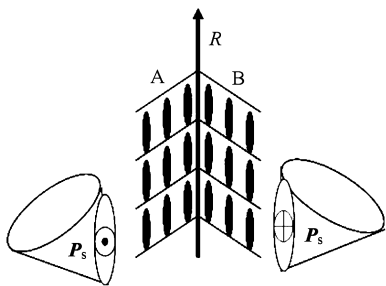


图 3 FLC 的两畴结构和自发极化方向示意图

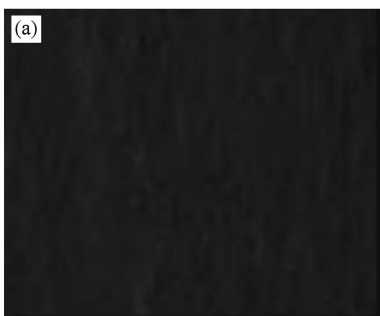


图 4 样品的正交偏光显微镜照片 (a)样品 S-1, (b)样品 S-2

## 2. 实 验

### 2.1. 器件的制备

本研究采用由德国 Merck 公司生产的 ZLI-3654 型 FLC 材料、由美国 Sigma-aldrich 公司提供的 5CB 型向列相液晶材料以及由日本 Synthetic Rubber 公司生产的 JALS-2021 型垂直取向剂. ZLI-3654 型 FLC 材料相序为  $I (86\text{ }^{\circ}\text{C}) \leftrightarrow N^* (76\text{ }^{\circ}\text{C}) \leftrightarrow \text{SmA} (62\text{ }^{\circ}\text{C}) \leftrightarrow \text{SmC}^* (< -30\text{ }^{\circ}\text{C}) \leftrightarrow \text{Cr}$  (I 代表各向同性相, Cr 代表晶体相); 5CB 型向列相液晶相变点  $T_{\text{NI}} = 35.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ZLI-3654 型 FLC 材料室温下 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 自发极化偶极矩为  $-29\text{ nC/cm}^2$ , 倾斜角 (FLC 分子与层法线夹角) 为  $25^{\circ}$ , 手性近晶 C 相下螺距为  $5\text{ }\mu\text{m}^{[20]}$ . 旋涂垂直取向剂 JALS-2021 到 ITO 玻璃基板上, 在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  固化  $30\text{ min}$ , 然后制备液晶盒间隙为  $40\text{ }\mu\text{m}$  的 FLC 器件. 把 FLC 加热到  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 利用毛细作用注入盒内, 然后以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $74\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到室温; 把 5CB 加热到  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 利用毛细作用注入盒内, 然后以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  的降温速率从  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到室温. 最后分别得到样品 S-1 和样品 S-2.

### 2.2. 排列结构的观察

在由日本 Olympus 公司生产的 BX-P 型正交偏光显微镜下旋转样品 S-1 和样品 S-2 均呈现均匀的暗态, 如图 4 所示; 在正交偏光显微镜锥光下均呈现黑“十”字型刷<sup>[21]</sup>, 如图 5 所示.

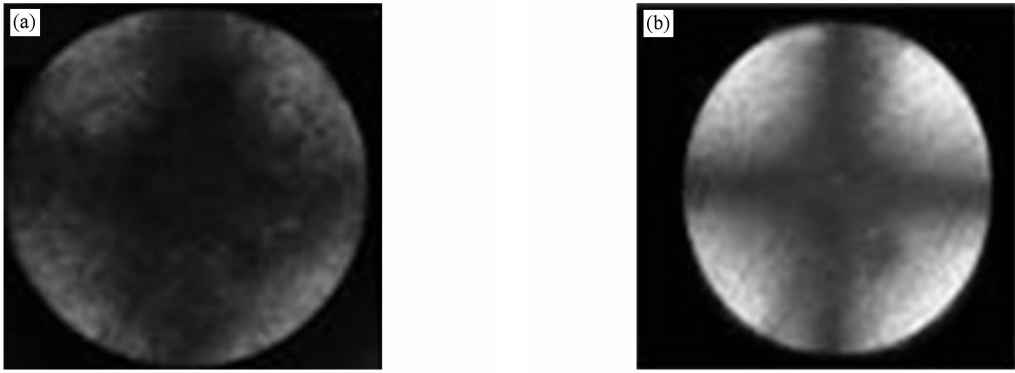


图5 样品在正交偏光显微镜锥光下呈现出黑“十”字型刷 (a)样品 S-1,(b)样品 S-2

### 3. 理论近似推导

一般情况下,晶体的不同方向其物理性质也不同,在各向异性介质中不同方向的介电常数  $\epsilon$  是不同的.各向异性介质中介电常数  $\epsilon$  的二阶张量矩阵形式为

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

根据晶体的对称性选取恰当的坐标轴(如坐标轴与晶体某一周期方向一致),介电常数的张量矩阵形式可得到简化,介电常数的二阶张量矩阵可有以下三种形式:

$$\epsilon_a = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\epsilon_b = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\epsilon_c = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{xx} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

(2)一(4)式分别为双轴晶体、单轴晶体和各向同性晶体介电常数的二阶张量.

液晶既具有液体的流动性又具有晶体的各向异性.图6所示为 FLC 在完全展开态下的均匀排列结构.FLC 螺旋结构完全展开形成均匀排列时具有双轴性,有时近似为单轴晶体处理<sup>[22]</sup>,为使结论更具有一般性,本文中把完全展开态下的均匀排列的

FLC 按双轴晶体考虑.

建立如图7所示的坐标系  $(x, y, z)$  和  $(x_0, y_0, z_0)$ .  $x$ - $y$  平面平行于 FLC 分子层,  $x$  方向垂直纸面向外,  $z$  为层法线方向,  $z_0$  与液晶分子长轴方向相同,  $x_0$  与  $x$  重合,  $(x, y, z)$  坐标系可以通过  $(x_0, y_0, z_0)$  坐标系绕  $x_0$  轴逆时针旋转  $\theta$  角得到.

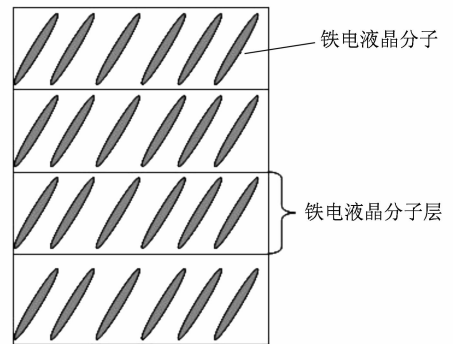


图6 FLC 螺旋完全展开态排列结构示意图

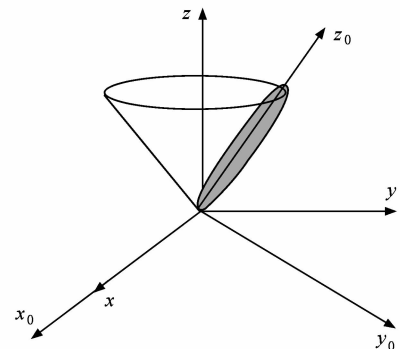


图7 FLC 螺旋完全展开态下的坐标系

在无磁场存在的情况下,由折射率  $n$  与介电常

数  $\varepsilon$  的关系  $n = \sqrt{\varepsilon}$  可知, 在  $(x_0, y_0, z_0)$  坐标系下 FLC 完全展开态介电常数的二阶张量表示为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{unhelix}} &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp 1} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp 2} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} n_{\perp 1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_{\perp 2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_{\parallel}^2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

图 8 为 FLC 未畸变螺旋结构示意图, 图 9 为 FLC 未畸变螺旋结构坐标系示意图.  $x-y$  平面平行于 FLC 分子层,  $x$  方向垂直面向外,  $z$  为层法线方向,  $z_0$  与液晶分子长轴方向相同.  $(x, y, z)$  坐标系可以通过  $(x_0, z_0)$  坐标系绕  $x_0$  轴逆时针旋转  $\theta$  角, 再绕  $z_0$  顺时针旋转  $\frac{\pi}{2} - \phi$  角得到.

FLC 螺旋结构局部的某一 FLC 层介电常数的二阶张量  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{loc}}$  在  $(x_0, y_0, z_0)$  坐标系下与  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{unhelix}}$  具有相同的形式, 通过几何变换可得到  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{loc}}$  在  $(x, y, z)$  坐标系下矩阵表达式  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{L}}$ .

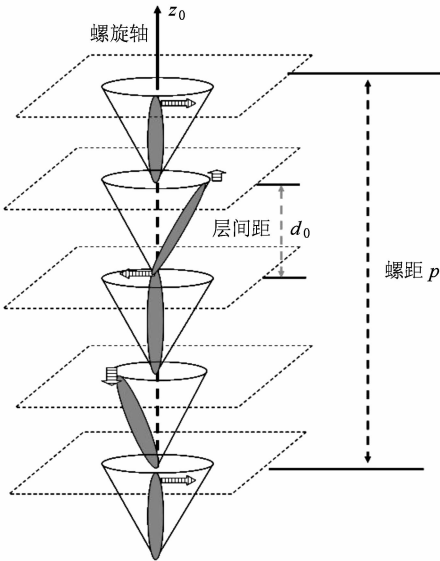


图 8 FLC 未畸变螺旋结构

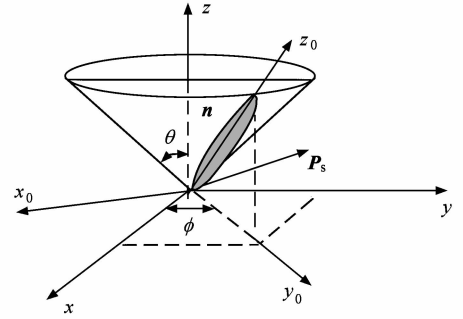


图 9 FLC 未畸变螺旋结构坐标系

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

在  $(x, y, z)$  坐标系下,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{L}}$  的矩阵形式为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{L}} &= \mathbf{A}\mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{unhelix}}\mathbf{C}\mathbf{D} \\ &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^{\text{L}} & \varepsilon_{12}^{\text{L}} & \varepsilon_{13}^{\text{L}} \\ \varepsilon_{21}^{\text{L}} & \varepsilon_{22}^{\text{L}} & \varepsilon_{23}^{\text{L}} \\ \varepsilon_{31}^{\text{L}} & \varepsilon_{32}^{\text{L}} & \varepsilon_{33}^{\text{L}} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^{\text{L}} &= \varepsilon_{\perp 2} \cos^2\theta \cos^2\phi + \varepsilon_{\perp 1} \sin^2\phi + \varepsilon_{\parallel} \sin^2\theta \cos^2\phi, \\ \varepsilon_{22}^{\text{L}} &= \varepsilon_{\perp 2} \cos^2\theta \sin^2\phi + \varepsilon_{\perp 1} \cos^2\phi + \varepsilon_{\parallel} \sin^2\theta \sin^2\phi, \\ \varepsilon_{33}^{\text{L}} &= \varepsilon_{\perp 2} \sin^2\theta + \varepsilon_{\parallel} \cos^2\theta, \\ \varepsilon_{12}^{\text{L}} &= \varepsilon_{21}^{\text{L}} = (\varepsilon_{\perp 2} \cos^2\theta - \varepsilon_{\perp 1} + \varepsilon_{\parallel} \sin^2\theta) \sin\theta \cos\phi, \\ \varepsilon_{13}^{\text{L}} &= \varepsilon_{31}^{\text{L}} = (-\varepsilon_{\perp 2} + \varepsilon_{\parallel}) \sin\theta \cos\theta \cos\phi, \\ \varepsilon_{23}^{\text{L}} &= \varepsilon_{32}^{\text{L}} = (-\varepsilon_{\perp 2} + \varepsilon_{\parallel}) \sin\theta \cos\theta \sin\phi. \end{aligned}$$

对于非畸变螺旋结构, FLC 分子分布相对于方位角  $\phi$  具有相同的分配概率, 在一个螺距  $p$  内的平均介电常数  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{a}}$  矩阵元素分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^{\text{a}} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varepsilon_{11}^{\text{L}} d\phi \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\varepsilon_{\perp 2} \cos^2\theta \cos^2\phi \\ &\quad + \varepsilon_{\perp 1} \sin^2\phi + \varepsilon_{\parallel} \sin^2\theta \cos^2\phi) d\phi \end{aligned}$$

令

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$= (\varepsilon_{\perp 2} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\perp 1} + \varepsilon_{//} \sin^2 \theta) / 2. \quad (11)$$

同理可得

$$\varepsilon_{22}^a = \varepsilon_{11}^a = (\varepsilon_{\perp 2} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\perp 1} + \varepsilon_{//} \sin^2 \theta) / 2, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{33}^a = \varepsilon_{\perp 2} \sin^2 \theta + \varepsilon_{//} \cos^2 \theta, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{12}^a = \varepsilon_{13}^a = \varepsilon_{21}^a = \varepsilon_{23}^a = \varepsilon_{31}^a = \varepsilon_{32}^a = 0. \quad (14)$$

一个螺距内平均折射率  $\langle n_{\perp} \rangle$  和  $\langle n_{//} \rangle$  的表达式为

$$\begin{aligned} \langle n_{\perp} \rangle &= \langle n_{11} \rangle = \langle n_{12} \rangle = \sqrt{\varepsilon_{11}^a} \\ &= \sqrt{(\varepsilon_{\perp 2} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\perp 1} + \varepsilon_{//} \sin^2 \theta) / 2}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\langle n_{//} \rangle = \sqrt{\varepsilon_{33}^a} = \sqrt{\varepsilon_{\perp 2} \sin^2 \theta + \varepsilon_{//} \cos^2 \theta}. \quad (16)$$

由(15), (16)式可知, 对于给定的 FLC 材料, 在一定温度下  $\theta$  是一个定值, 一个螺距内平均折射率  $\langle n_{\perp} \rangle$  和  $\langle n_{//} \rangle$  的值也是定值. 建立一个折射率  $n_o = \langle n_{\perp} \rangle$  和  $n_e = \langle n_{//} \rangle$  的向列相液晶模型(图 10), 可以把一个螺距内的 FLC 分子作为一个整体看作一个该模型分子.

当 FLC 沿螺旋轴方向的厚度等于 FLC 螺距的整数倍时, 就可把 FLC 看成向列相液晶模型组成的集合, 具有向列相液晶的性质, 即光波在密扭曲的 FLC 介质中的平均效果与在光轴沿螺旋轴方向的向列相液晶介质基本相同. 这个结论和前面的实验结果是相符的.

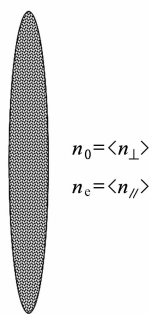


图 10 等效向列相液晶模型示意图

#### 4. 实验结果及讨论

实验中在正交偏光显微镜下旋转样品 S-2, 始终呈现均匀的暗态, 在正交偏光显微镜锥光下出现黑“十”字型刷; 在正交偏光显微镜下旋转样品 S-1 也始终呈现均匀的暗态, 在正交偏光显微镜锥光下也出现黑“十”字型刷. 这说明在此种情况下 FLC 具有和向列相液晶相似的性质.

由理论近似计算可以得出: 当 FLC 沿螺旋轴方

向的厚度等于螺距的整数倍时, 就可把 FLC 看成向列相液晶模型组成的集合. 理想结果应该与向列相液晶出现的“十”字型刷一样, 但样品 S-1 的黑“十”字型刷粗大一些, 与理想结果有些偏差, 主要原因是基板取向层的表面锚定对螺旋结构有影响. 当液晶盒间隙与 FLC 螺距满足  $d \leq p$  时, 基板取向层的表面锚定对螺旋结构的影响较大; 当液晶盒间隙  $d > p$  时, 液晶盒间隙越大基板取向层的表面锚定对螺旋结构影响就越小.

文献[20]指出, ZLI-3654 型 FLC 在  $10.3 \mu\text{m}$  厚的液晶盒中 FLC 相下的螺距为  $5 \mu\text{m}$ . 对于液晶盒间隙为  $40 \mu\text{m}$  的液晶器件与 FLC 的螺距相比, 液晶盒间隙较大, 基板取向层的表面锚定对螺旋结构影响较小.  $40 \mu\text{m}$  的液晶盒间隙近似等于 ZLI-3654 型 FLC 螺距的整数倍, 所以实验中出现了黑“十”字型刷, 由于基板取向层的表面锚定对螺旋结构有影响而略显粗大. 因此, 可以认为理论和实验结果符合很好. 对于 DHFLC 和 VA-DHFLC 器件所用的 FLC 材料都是短螺距的 FLC 材料, 螺距一般都在  $0.1-1 \mu\text{m}$  的范围<sup>[16]</sup>内. 对于这类材料, 液晶盒间隙与 FLC 螺距满足  $d \gg p$ , 此时螺旋结构受基板影响会更小, 对于 DHFLC 和 VA-DHFLC 器件所用材料, 近似结果会更好.

本文给出了未畸变螺旋结构和施加电场产生的完全展开态的二阶张量  $\varepsilon$  的表达式, 同样根据  $\phi$  与  $z$  在电场作用下的关系计算出施加电场产生的部分螺旋展开态的二阶张量  $\varepsilon$  的表达式, 进而通过坐标变换求出  $n_o = \langle n_{\perp} \rangle$  和  $n_e = \langle n_{//} \rangle$  向列相液晶模型的表达式. 由于施加电场的作用, FLC 的螺旋结构发生变化, 因而分子的空间方位也会发生变化, 向列相液晶模型光轴相对于螺旋轴会产生一个偏离角  $\alpha$ , 此时双折射为  $\Delta n_{\alpha}$ , 未畸变螺旋结构的光轴沿螺旋轴方向, 即  $\alpha = 0$ , 施加电场产生的完全展开态的光轴与螺旋轴成  $\theta$  角, 即  $\alpha = \theta$ . 根据  $\alpha$  和  $\Delta n_{\alpha}$  随电压的变化分析对相位调制和透过率的影响, 可为实验结果分析提供理论指导.

由以上所述可知, 根据未畸变螺旋结构向列相液晶模型, 可以探讨  $n_o = \langle n_{\perp} \rangle$  和  $n_e = \langle n_{//} \rangle$  随  $\theta$  的变化规律, 进而根据需要选择锥角  $\theta$  合适的 FLC 材料.

由理论近似条件可知, 制备 DHFLC 和 VA-DHFLC 器件, 应满足  $d \gg p$ , 这样螺旋结构受到的影响较小. 根据研究需要安排偏振片的偏光轴的方向

向. 另外, 对于 DHFLC 和 VA-DHFLC 器件, 要得到较好的对比度, 除了应满足  $d = np$  ( $n$  为正整数), 还要考虑材料双折射等因素.

## 5. 结 论

由 FLC 螺旋结构的理论近似计算得到了一个螺距内平均折射率  $\langle n_{\perp} \rangle$  和  $\langle n_{\parallel} \rangle$  的表达式. 根据此表达式, 可将一个螺距内的 FLC 分子看成一个  $n_o = \langle n_{\perp} \rangle$  和  $n_e = \langle n_{\parallel} \rangle$  向列相液晶模型分子. 当 FLC 沿螺旋轴方向的厚度等于螺距的整数倍时, FLC 就可以看成向列相液晶模型组成的集合, 根据

理论近似计算, FLC 沿螺旋轴方向的厚度等于螺距的整数倍时, 垂直取向的 FLC 应该与垂直排列的向列相液晶器件一样, 在正交偏光显微镜锥光下也会出现黑“十”字型刷, 实验验证了这一结果. 对于 DHFLC 和 VA-DHFLC 器件所用的 FLC 材料, 液晶盒间隙和 FLC 的螺距一般都满足  $d \gg p$ , 此时螺旋结构受基板取向层表面锚定的影响会更小. 根据这一近似理论模型, 可以由  $\alpha$  和  $\Delta n_{\alpha}$  随电压的变化分析对相位调制和透过率的影响, 为实验结果分析提供理论指导, 还可对材料的择优选取, 器件的制备等提供理论指导.

- 
- [1] Zheng Z G, Ma J, Song J, Liu Y G, Hu L F, Xuan L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 15 (in Chinese) [郑致刚、马 骥、宋 静、刘永刚、胡立发、宣 丽 2007 物理学报 **56** 15]
- [2] Yang P B, Cao L G, Hu W, Zhu Y Q, Guo Q, Yang X B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 285 (in Chinese) [杨平保、曹龙贵、胡巍、朱叶青、郭 旗、杨湘波 2008 物理学报 **57** 285]
- [3] Zheng Z G, Li W C, Liu Y G, Xuan L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7344 (in Chinese) [郑致刚、李文萃、刘永刚、宣 丽 2008 物理学报 **57** 7344]
- [4] Yin J L, Huang X G, Liu S H, Hu S J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5268 (in Chinese) [殷建玲、黄旭光、刘颂豪、胡社军 2006 物理学报 **55** 5268]
- [5] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4097 (in Chinese) [丁海兵、庞文宁、刘义保、尚仁成 2005 物理学报 **54** 4097]
- [6] Wang Q H, Cheng J B 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 357 (in Chinese) [王琼华、成建波 2005 光子学报 **34** 357]
- [7] Wu P C, Wu J W 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 104513
- [8] Clark N A, Lagerwall S T 1980 *Appl. Phys. Lett.* **36** 899
- [9] Zhu S Q, Pan W, Wang M Y 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 218 (in Chinese) [朱思奇、潘 炜、王梦遥 2005 光子学报 **34** 218]
- [10] Kim Y J, Kim K S, Kim Y B 2002 *Ferroelectrics* **278** 191
- [11] Rieker T P, Clark N A, Smith G S, Parmar D S, Sirota E B, Safinya C R 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2658
- [12] Wang J M, Kim Y J, Chang J K, Kim K S 2002 *Ferroelectrics* **277** 185
- [13] Sawatari N, Okabe M, Ishikawa M, Harada R, Egashira N 2007 *SID Digest*. 1397
- [14] Haase W, Podgornov F, Pozhidaev E 2002 *Proc. SPIE* **4481** 17
- [15] Michael D W, Rohini T V, Michael J O, Beth R, Claus E 1992 *Proc. SPIE* **1665** 176
- [16] Pozhidaev E P 2001 *Proc. SPIE* **4511** 92
- [17] Kim D W, Yu C J, Lim Y W, Na J H, Lee S D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 051917
- [18] You D H, Yu C J, Lee S D 2002 *Ferroelectrics* **278** 233
- [19] McMurdy J W, Crawford G P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 081105
- [20] Miyagi J N 1991 *U. S. Patent* 5046830
- [21] Fei C H, Peng Z H, Lü F Z, Zhang L L, Yao L S, Xuan L 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 3029
- [22] MacGregor A R 1989 *J. Opt. Soc. Am. A* **6** 1493

# Theoretical approximation study on the helix structure of ferroelectric liquid crystal \*

Tang Xian-Zhu<sup>1)2)</sup> Lu Xing-Hai<sup>1)</sup> Peng Zeng-Hui<sup>1)</sup> Liu Yong-Gang<sup>1)</sup> Xuan Li<sup>1)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 19 July 2009; revised manuscript received 1 December 2009)

## Abstract

The expressions of average refractive index in a helix pitch of ferroelectric liquid crystal (FLC) were derived by theoretical approximation computation of the helix structure at chiral smectic C phase of FLC. A conclusion that FLC molecules in a helix pitch as a whole can be considered as a model of nematic liquid crystal in terms of the expressions of average refractive index was obtained. When the thickness of FLC with a vertical alignment along the helical axis is integer times long as the helix pitch, FLC molecules can be considered as a group composed of nematic liquid crystal models. The comparisons of experiment results of ZLI-3654 FLC with 5CB nematic liquid crystal confirmed the above conclusion. The theory and experiment are in good agreement. Theoretical guidance and a deeper understanding can be provided by this theory for preparation of deformed helix FLC and vertical alignment deformed helix FLC devices, as well as application of ferroelectric liquid crystal.

**Keywords:** ferroelectric liquid crystal, helix pitch, average refractive index, nematic liquid crystal

**PACC:** 4270D, 6130B, 6130C