

平行锚定和正交锚定液晶盒内胆甾相平面态液晶层指向矢排布随温度变化的特征

张路瑶, 马子寒, 李志广, 范志新, 张得全

引用本文:

张路瑶, 马子寒, 李志广, 等. 平行锚定和正交锚定液晶盒内胆甾相平面态液晶层指向矢排布随温度变化的特征[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1084–1092.

ZHANG Lu-yao, MA Zi-han, LI Zhi-guang, et al. Director arrangement of the cholesteric liquid crystals with temperature-dependent planar texture in parallel anchored and orthogonal anchored cells based on optical guided wave technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1084–1092.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基板表面锚泊对液晶全漏导模影响的理论研究

Theoretical study of the surface anchoring effect on the full leaky waveguide mode of liquid crystal
液晶与显示. 2018, 33(6): 483–489 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183306.0483>

不同初始分布向列相液晶电容特性的相场法研究

Phase field method in capacitance characteristics of nematic liquid crystals with different initial alignments
液晶与显示. 2019, 34(4): 327–334 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193404.0327>

用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

Measurement of director distribution in reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique
液晶与显示. 2016, 31(6): 540–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0540>

柱状腔向列相液晶指向矢结构的Monte Carlo模拟

Monte Carlo simulations of nematic liquid crystal director structures confined to cylindrical cavity
液晶与显示. 2018, 33(7): 575–582 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183307.0575>

混合排列柱状薄层中的向列相液晶指向矢分布的研究

Director distributions of nematic liquid crystals in hybrid arrangement cylindrical cells
液晶与显示. 2017, 32(1): 13–18 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173201.0013>

文章编号:1007-2780(2021)08-1084-09

平行锚定和正交锚定液晶盒内胆甯相平面态 液晶层指向矢排布随温度变化的特征

张路瑶¹, 马子寒¹, 李志广^{1,2*}, 范志新¹, 张得全³

(1. 河北工业大学 理学院, 天津 300401;

2. 河北工业大学 国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心, 天津 300401;

3. 天津耀皮工程玻璃有限公司, 天津 300409)

摘要:为了研究胆甯相平面态液晶(Cholesteric liquid crystal with planar texture, CLCPT)层在上下表面取向平行(Parallel anchoring, PA)和上下表面取向垂直(Orthogonal anchoring, OA)两种液晶盒中指向矢排布随温度变化的特征,分别制备了 PA 和 OA 两种 CLCPT 液晶盒样品。构建了由梯形低折射率棱镜、匹配液、CLCPT 液晶盒组成的全漏导模结构,采用全漏光学导波(Fully leaky optical guided wave, FLOGW)方法获得了在不同温度下反射率随内角(测试光线入射到 CLCPT 层上的入射角)变化的导波实验曲线 R_{ss} , 将其与基于液晶弹性理论和多层光学理论模拟出的同一温度下的理论导波曲线 R_{ss} 进行拟合,精准分析出在 PA 和 OA 盒内,CLCPT 指向矢排布随温度变化的特征。此外,应用控制变量法测量出不同温度下胆甯相液晶(Cholesteric liquid crystal, CLC)双折射率实际参数值。

关键词:胆甯相液晶;指向矢排列特性;光学导波技术;平面态;温度

中图分类号:O753⁺.2;TH691.9 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2021-0084

Director arrangement of the cholesteric liquid crystals with temperature-dependent planar texture in parallel anchored and orthogonal anchored cells based on optical guided wave technology

ZHANG Lu-yao¹, MA Zi-han¹, LI Zhi-guang^{1,2*}, FAN Zhi-xin¹, ZHANG De-quan³

(1. School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool,
Hebei University of Technology, Tianjin 3004401, China;

3. Tianjin SYP Engineering Glass Co., Ltd., Tianjin 300409, China)

Abstract: In order to study director arrangement of the cholesteric liquid crystals layer with planar texture (CLCPT) in parallel anchored (PA) and orthogonal anchored (OA) cells with temperature changes, two samples of CLCPT in PA and OA cells were prepared respectively. A fully leaky guide

收稿日期:2021-04-01;修订日期:2021-04-16.

基金项目:科技部创新方法工作专项(No.2018IM040300);国家自然科学基金(No.51805142)

Supported by the Innovation Method Fund of China(No.2018IM040300); National Natural Science Foundation of China (No. 51805142)

* 通信联系人, E-mail:zhglee@hebut.edu.cn

mode structure consisting of two trapezoidal low refractive index prisms, the refractive index matching liquids and one CLCPT cell was constructed. The method of fully leaky optical guided wave (FLOGW) was introduced to measure the experimental curve of reflectivity R_{ss} with inner angle (the incident angles of the test light incident on the CLCPT layer) at different temperatures. The temperature dependence of the theoretical curves revealed by simulations based on elastic theory of liquid crystal and multi-layer theory was in agreement with the experiment result, and the characteristics of CLCPT director arrangement with temperature changes in PA and OA cells were accurately analyzed. In addition, the actual birefractive index values of cholesteric liquid crystal (CLC) at different temperatures were measured by the control variable method.

Key words: cholesteric liquid crystal; director arrangement characteristics; optical guided wave method; planar texture; temperature

1 引 言

胆甯相液晶也称为手性向列相液晶,是一种软光子晶体材料,也是向列相液晶^[1-2]的一种特殊状态。处于平面状态时,其结构可以看作许多薄层,每一薄层中,液晶分子具有相同的光轴,而在相邻两层之间光轴具有固定的夹角,整体上形成周期性螺旋结构,将扭转 360° 的距离称为螺距 p ^[3-4]。这种特殊的分子排列使得胆甯相液晶具备快速响应、可逆性以及良好的传感能力^[5]。可见螺旋结构是胆甯相液晶领域中一个重要的性质,研究螺距行为不仅有助于对软物质的基本认识,而且在光学^[6]和化学传感^[7]等领域有着广泛的应用。同时胆甯相液晶螺距对外界环境很敏感,例如温度^[8]、光^[9-10]、电压^[11-12]、压力^[13]等,人们通过这些外部刺激来操纵胆甯相液晶指向矢排列,间接驾驭其物理性质和化学性质,开发了激光器^[14-15]、传感器^[16]等实际应用器件。其中温度具有远程、空间和时间控制的优势,可使空间受限的 CLCPT 螺距发生急剧的变化^[17],这种现象引起人们深入研究 CLCPT 螺距相关问题的兴趣。2020 年,张海等人^[18]利用 CLCPT 的选择性反射性质,根据螺距 p 的变化程度来检测外部温度的变化,制作了高灵敏度的反射光纤温度传感器。近年来,许多研究者采用了多种方法研究温度对 CLCPT 螺距的影响,主要有采用显微镜直接观测纹理^[19]、仿真模拟^[20]、采用分光光度计测量光谱^[21]和制作楔形盒测量^[22]等方法。

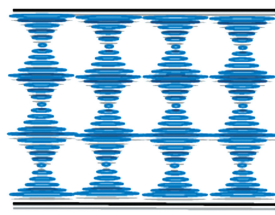
相比这些方法,本文采用的 FLOGW 方法是一项测量指向矢信息极其灵敏的方法^[23],可以很精准地分析出实际液晶盒内指向矢排列特性。考虑在强锚定条件下两个基板之间的 CLCPT 层受温度影响时,螺距的改变是连续变化,还是基板附近指向矢取向不变,垂直于基板方向液晶层螺距个数发生改变呢? 本文利用 FLOGW 方法测得不同温度下的反射率随内角变化的实验曲线,与对应温度下设想情形的相应理论曲线进行拟合,就可以分析确定在不同温度下,CLCPT 指向矢在 PA 和 OA 液晶盒内实际排布情况。此外,利用控制变量法,还可以得出折射率等其他参数的值。

2 理论模型

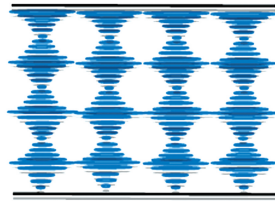
2.1 液晶弹性理论

在厚度为 d 的 PA 盒和 OA 盒中,上下玻璃基板内表面都涂有很薄的氧化铟锡(ITO)层作为电极,在 ITO 层上面还涂覆有一层聚酰亚胺(PI)表面取向层。假设 CLCPT 分子指向矢在基板附近沿着取向层摩擦方向排列,而基板之间的整个液晶层分子指向矢自然扭转,形成均匀的螺旋结构,螺旋轴垂直于基板,CLCPT 分子指向矢排列示意图及其笛卡尔坐标系见图 1,取 $z=d$ 和 $z=0$ 分别为上下两个基板的位置,基板之间的液晶分子排列可描述为一个理想的螺旋结构。螺旋轴在 z 方向上,在 xy 平面内,指向矢方位角 φ 取决于 z 。因此液晶指向矢可以表示为:

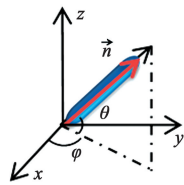
$$\vec{n} = (\cos\varphi(z), \sin\varphi(z), 0), \quad (1)$$



(a) 平行锚定液晶盒
(a) PA cell



(b) 正交锚定液晶盒
(b) OA cell



(c) 笛卡尔坐标系

(c) Cartesian coordinate system

图 1 CLCPT 在平行锚定和正交锚定液晶盒中指向矢排布情况及笛卡尔坐标系

Fig.1 Arrangement of the director of CLCPT in PA and OA cells and the Cartesian coordinate system

式中 $\varphi(z)$ 是指指向矢随位置 z 变化的扭曲角。

根据 Frank 理论^[24],胆甾相的弹性自由能密度为:

$$f_{\text{ela}} = \frac{1}{2}K_{11}(\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{22}(\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n} + q)^2 + \frac{1}{2}K_{33}(\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2, \quad (2)$$

其中: K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} 分别是胆甾相液晶的展曲、扭曲和弯曲的弹性系数, $q = \frac{2\pi}{p}$ 为波矢的大小, p 为胆甾相液晶螺距的长度。在无任何外场作用下,此时的胆甾相液晶处于最小自由能的平面态,即系统中仅有扭曲状态的弹性自由能,因此,胆甾相液晶总弹性自由能密度表示为:

$$F_{\text{ela}} = \int_0^d f_{\text{elas}} dz = \frac{1}{2}K_{22} \left(\frac{d\varphi}{dz} - q \right)^2, \quad (3)$$

系统达到平衡时,将总的弹性自由能式(3)代入欧拉方程^[25]得到 φ 满足的微分方程:

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = 0, z \in (0, d) \quad (4)$$

强锚定条件下,假定在 PA 盒中 CLCPT 的螺距数是 $1/4p$ 的偶数倍,在 OA 盒中,CLCPT 的螺距数是 $1/4p$ 的奇数倍数,因此 PA 盒和 OA 盒的边界条件分别为:

$$\varphi(0) = \frac{\pi}{2}, \varphi(d) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}n, (n=0, 2, 4, \dots), \quad (5)$$

$$\varphi(0) = 0, \varphi(d) = \frac{\pi}{2}m, (m=1, 3, 5, \dots), \quad (6)$$

对应的解分别为:

$$\varphi(z) = \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{p}z, z \in [0, \frac{n}{4}p], (n=0, 2, 4, \dots), \quad (7)$$

$$\varphi(z) = \frac{2\pi}{p}z, z \in [0, \frac{m}{4}p], (m=1, 3, 5, \dots). \quad (8)$$

2.2 多层光学理论

根据多层光学理论,将 CLCPT 液晶层沿 z 轴方向分割成很多个薄层,每一薄层的厚度远远小于入射光的波长,这样就可以认为每一薄层中的指向矢方位角沿 z 轴方向是不变的,从而光在基板间液晶层传播过程产生的折射和反射问题,可以通过多层光学理论 Berreman 4×4 矩阵^[26-27]来模拟计算,该算法求解了包含 CLCPT 液晶层和边界玻璃板组成的分层光学系统的麦克斯韦方程。经过计算就可以得到 p 光和 s 光以不同角度入射到液晶层的反射率(R_{pp} , R_{ps} , R_{sp} , R_{ss})和透射率(T_{pp} , T_{ps} , T_{sp} , T_{ss}),具体过程参考文献[26-27]。本实验中只采集了 R_{ss} 数据,建立了理论和实验曲线,进行了拟合,即可满足问题分析的需要。

$$\begin{cases} R_{pp} = (G_{11} + G_{12}) \cdot (G_{11} + G_{12})^* \\ R_{ps} = (G_{21} + G_{22}) \cdot (G_{21} + G_{22})^* \\ R_{sp} = (G_{13} + G_{14}) \cdot (G_{13} + G_{14})^* \\ R_{ss} = (G_{23} + G_{24}) \cdot (G_{23} + G_{24})^* \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_{pp} = (G_{31} + G_{32}) \cdot (G_{31} + G_{32})^* \\ T_{ps} = (G_{41} + G_{42}) \cdot (G_{41} + G_{42})^* \\ T_{sp} = (G_{33} + G_{34}) \cdot (G_{33} + G_{34})^* \\ T_{ss} = (G_{43} + G_{44}) \cdot (G_{43} + G_{44})^* \end{cases}, \quad (10)$$

其中矩阵 G 满足公式(11),

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & F_{11} + F_{12} \frac{n}{\cos\beta'} & \frac{F_{13}}{\cos\beta'} + F_{14}n \\ -1 & 0 & F_{21} \frac{\cos\beta'}{n} + F_{22} & \frac{F_{23}}{n} + F_{24} \cos\beta' \\ 0 & -1 & F_{31} \cos\beta' + F_{32}n & F_{33} + F_{34}n \cos\beta' \\ 0 & 1 & \frac{F_{41}}{n} + \frac{F_{42}}{\cos\beta'} & \frac{F_{43}}{n \cos\beta'} + F_{44} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (11)$$

其中 F 为传输矩阵 P 的逆矩阵。

3 实 验

3.1 样品制备

实验中,使用电子分析天平 (MS105) 称取向列相液晶 E7 (质量分数为 75%) 与手性剂 S811 (质量分数为 25%), 将两种材料的混合物放在磁力搅拌机上充分搅拌 3 h。然后,将制得的 CLC 分别注入到 PA 盒和 OA 盒中。样品 PA 盒和 OA 盒的厚度,分别为 $7.9812 \mu\text{m}$ 和 $7.7680 \mu\text{m}$, 记为样品 I 和样品 II。

3.2 实验测量

光学导波实验装置如图 2 所示。首先,将制备好的样品 I 和样品 II 分别按照图 3 所示制作成全漏导模结构。然后,将两种导模结构分别放入温控装置并固定于 θ -2 θ 转台上进行测试。为了便于对液晶层进行一定角度范围的扫描测试,采用棱镜耦合的方法,制作了如图 3 所示的全漏导模结构^[23,28-29]。

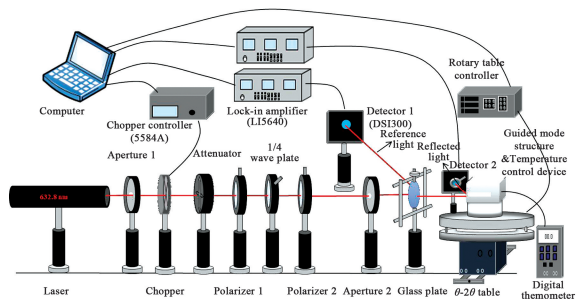


图 2 光学导波技术实验原理图

Fig.2 Experimental principle diagram of FLOGW method

线偏振光 (p 光和 s 光) 以一定角度 β (外角) 入

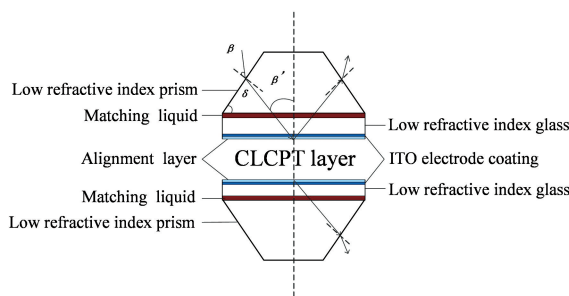


图 3 全漏导模结构原理图

Fig.3 Structure of fully leaky LC waveguide

射到棱镜上,经棱镜耦合后以角度 β' (内角) 入射到液晶层,内角与外角换算关系满足斯涅尔定律:

$$\beta' = \delta - \arcsin\left(\frac{n_o \sin\beta}{n_p}\right), \quad (12)$$

其中: $\delta = 60^\circ$ 是棱镜的底角, n_o 、 n_p 分别为空气和棱镜的折射率。光穿过被测的液晶层后出射的反射光再由棱镜耦合射出,反射光会产生偏振转换信号 (R_{ps} , R_{sp}) 和偏振保存信号 (R_{ss} , R_{pp}), 这些信号会随着液晶指向矢的分布而发生变化。实验过程中, θ -2 θ 转台以固定步长 0.05° 转动一定角度范围,同时探测器 1 和探测器 2 分别采集参考光信号和经被测样品后的反射光信号,参考光信号用于补偿光源自身漂移浮动造成的误差。由温控装置控制被测样品温度在 $27 \sim 39^\circ\text{C}$ 之间每隔 2°C 采集一遍数据。

4 结果与讨论

应用液晶弹性理论和多层光学理论模拟出的反射率 R_{ss} 与内角关系的理论曲线,与对应温度下的实验曲线进行拟合,拟合结果见图 4 和图 5。

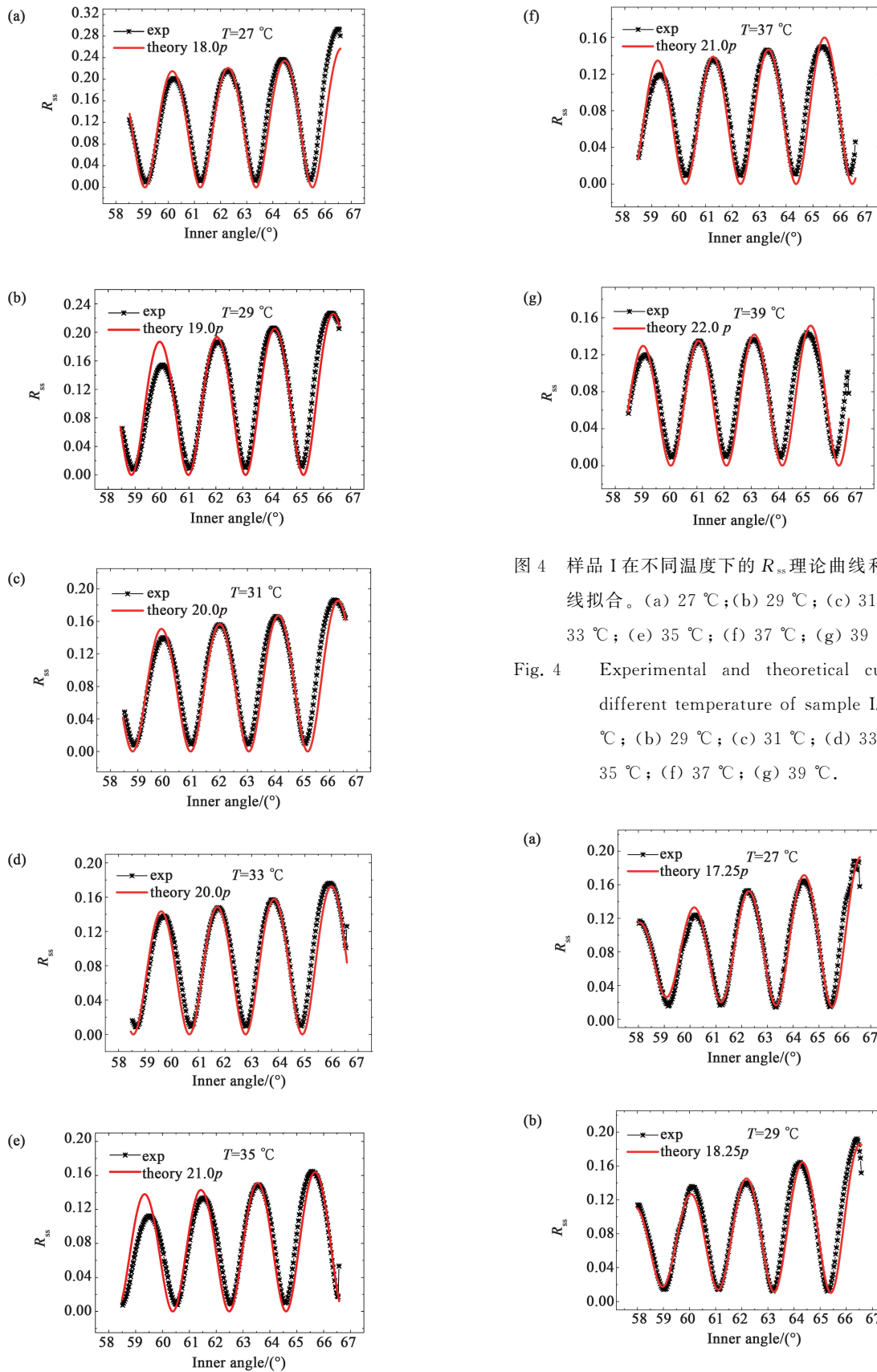


图 4 样品 I 在不同温度下的 R_{ss} 理论曲线和实验曲线拟合。(a) 27 °C; (b) 29 °C; (c) 31 °C; (d) 33 °C; (e) 35 °C; (f) 37 °C; (g) 39 °C。

Fig. 4 Experimental and theoretical curves at different temperature of sample I. (a) 27 °C; (b) 29 °C; (c) 31 °C; (d) 33 °C; (e) 35 °C; (f) 37 °C; (g) 39 °C.

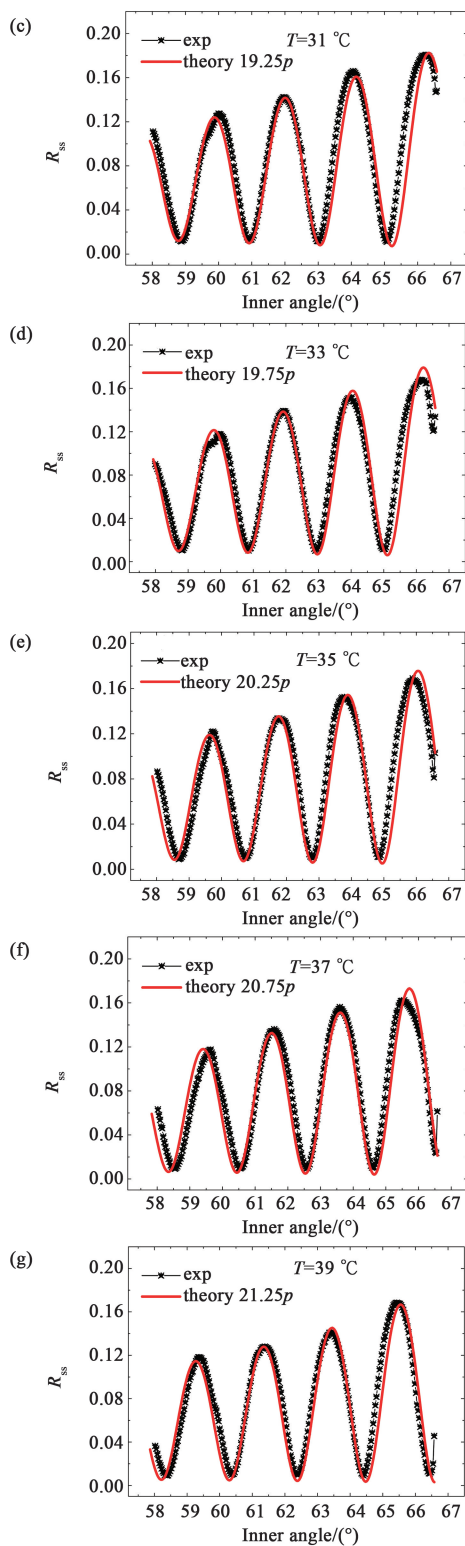


图 5 样品 II 在不同温度下的 R_{ss} 理论曲线和实验曲线拟合。(a) 27 °C ; (b) 29 °C ; (c) 31 °C ; (d) 33 °C ; (e) 35 °C ; (f) 37 °C ; (g) 39 °C 。

Fig.5 Experimental and theoretical curves at different temperature of sample II. (a) 27 °C ; (b) 29 °C ; (c) 31 °C ; (d) 33 °C ; (e) 35 °C ; (f) 37 °C ; (g) 39 °C 。

从图 4 和图 5 可以看出,实验曲线与理论曲线吻合,经过计算分析出的两种样品中实际螺距数目列于表 1,可见在 PA 盒和 OA 盒内,31 °C 之前每隔 2 °C 盒内螺距数变化了 1 个 p ,而 31 °C 之后每隔 2 °C 盒内螺距变化 $1/2p$,从 27 °C 至 31 °C 阶段螺距变化比 31 °C 以后的阶段快,说明螺距随温度变化并不是线性相关的。结果表明在强锚定条件下,厚度一定的 PA 盒和 OA 盒内的 CLCPT 层的螺距在随温度变化时,上下基板附近的液晶分子受锚定的影响,沿摩擦方向取向,而基板之间的 CLCPT 层螺距不连续变化,并在盒内均匀调整。最终,在 PA 盒内 CLCPT 层在基板间螺距数目始终保持 $1/4p$ 的偶数倍,在 OA 盒内 CLCPT 层在基板间螺距数目始终保持 $1/4p$ 的奇数倍。

表 1 两种样品中随温度变化实际螺距个数

Table.1 Actual number of pitches with temperature in two samples

温度/°C	螺距个数	
	PA 盒	OA 盒
27	18	17.25
29	19	18.25
31	20	19.25
33	20.5	19.75
35	21	20.25
37	21.5	20.75
39	22	21.25

此外,由于光学导波方法对液晶各种参数极其敏感,因此在实施理论曲线和实验曲线拟合过程中,应用“控制变量法”结合 CLC 和液晶盒各种参数对导波曲线的影响规律,通过调整理论曲线和实验曲线拟合,即可确定某一参数的值。本文应用该方法确定了样品中 CLC 双折射率的参数值及其随温度的变化,如图 6 所示。可见, n_o 受温度的影响要远远小于 n_e 。样品 I 和样品 II 在 27 ~ 39 °C 之间不同温度下 R_{ss} 导波理论曲线如图 7 所示。可以看到随温度升高,两组曲线均是向左移动的同时峰值下降,出现这种现象的原因是螺距和双折射率受温度影响。根据 CLC 液晶层的螺距随温度变化的机理是由于手性剂 S811 的螺

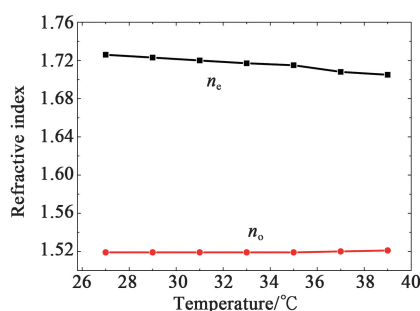


图 6 CLC 在不同温度下的双折射率

Fig.6 Birefringence of CLC at different temperatures

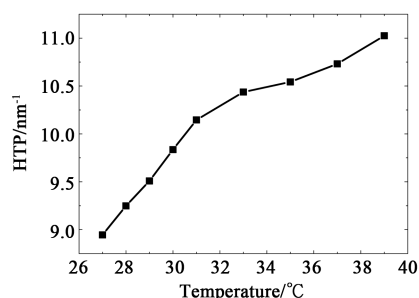
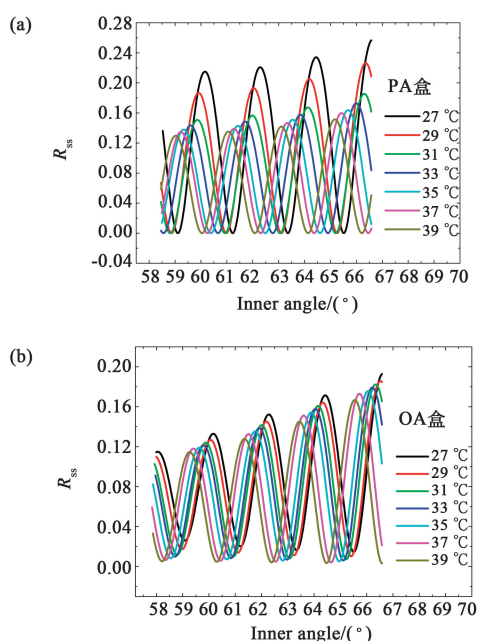


图 8 手性剂 S811 的 HTP 随温度变化的曲线

Fig.8 Curve of HTP of chiral agent S811 with temperature

图 7 不同温度下反射率 R_{ss} 随内角变化的导波理论曲线。(a)PA 盒;(b)OA 盒。Fig.7 Guided wave theoretical curves of reflectivity R_{ss} varying with internal angle at different temperatures. (a)PA cell; (b) OA cell.

旋扭转力 (HTP) 随温度变化引起的^[30], 如图 8, 可见随着温度的升高, HTP 值不断增大。因此, CLCPT 层随温度升高, 样品中手性剂 HTP 值增大, 螺距 p 减小, 导致曲线峰值降低。曲线向左移动主要归因于双折射率的变化, 主要是 n_e 随温度升高而减小。

5 结 论

本文采用光学导波方法, 研究了 CLCPT 在 PA 和 OA 两种类型盒中, 随温度变化指向矢排布改变的情况。根据液晶弹性理论和多层光学理论, 模拟计算出不同温度下 CLCPT 层在 PA 盒和 OA 盒内的反射率 R_{ss} 随内角变化的导波理论曲线, 然后与实验曲线拟合, 确定了 PA 盒和 OA 盒内 CLCPT 指向矢排布随温度变化的特征。此外, 应用“控制变量法”确定了不同温度下的实际双折射率值。因此, 光学导波方法对于探测液晶盒内指向矢排布特性, 以及测量各种液晶器件相关参数具有很高的灵敏度。本文工作对于研究和开发 CLCPT 器件以及波导结构设计具有重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 王猛, 王岩, 韦德泉, 等. 松果状纳米氧化铁对液晶电光性能的影响[J]. 应用化学, 2019, 36(5): 578-584.
WANG M, WANG Y, WEI D Q, *et al.* Influence of pinecone-like ferric oxide on the electro-optical properties of nematic liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2019, 36(5): 578-584. (in Chinese)
- [2] 王猛, 张彬, 韦德泉, 等. 不同光滑度立方体氧化铁对液晶电光性能的改善[J]. 应用化学, 2019, 36(6): 690-697.
WANG M, ZHANG B, WEI D Q, *et al.* Improvement of electro-optical properties of liquid crystal by cubic ferric oxide with different roughness [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2019, 36(6): 690-697. (in Chinese)
- [3] DOLGANOV P V, BAKLANOVA K D, DOLGANOV V K. Spectral and polarization characteristics of the light passing through a cholesteric photonic crystal [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, 130

- (5): 790-796.
- [4] WU L, SUN H. Manipulation of cholesteric liquid crystal phase behavior and molecular assembly by molecular chirality [J]. *Physical Review E*, 2019, 100(2): 022703.
- [5] KIM G H, LEE W J, KIM H N, *et al.* Effects of boundary and bulk control technology in cholesteric liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2016, 633(1): 72-79.
- [6] CHEN Q M, PENG Z H, LI Y, *et al.* Multi-plane augmented reality display based on cholesteric liquid crystal reflective films [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12039-12047.
- [7] MYUNG D B, HUSSAIN S, PARK S Y. Photonic calcium and humidity array sensor prepared with reactive cholesteric liquid crystal mesogens [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 298: 126894.
- [8] OGIWARA A, KAKIUCHIDA H. Thermally tunable light filter composed of cholesteric liquid crystals with different temperature dependence [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 157: 250-258.
- [9] WANG Q, LI Y, SUN J, *et al.* Sunlight-driven self-organized helical superstructure chromotropic device [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(24): 2001207.
- [10] ABHOFF S, IAMSAARD S, BOSCO A, *et al.* Time-programmed helix inversion in phototunable liquid crystals [J]. *Chemical Communications*, 2013, 49(39): 4256-4258.
- [11] LI C C, TSENG H Y, CHEN C W, *et al.* Versatile energy-saving smart glass based on tristable cholesteric liquid crystals [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(8): 7601-7609.
- [12] OH S W, YOON T H. Fast bistable switching of a cholesteric liquid crystal device induced by application of an in-plane electric field [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7321-7324.
- [13] PICOT O T, DAI M, BILLOTI E, *et al.* A real time optical strain sensor based on a cholesteric liquid crystal network [J]. *RSC Advances*, 2013, 3(41): 18794-18798.
- [14] LIN J D, CHIU C Y, MO T S, *et al.* All-optical directional control of emission in a photonic liquid crystal fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5149-5156.
- [15] ILCHISHIN I P, TIKHONOV E A, MYKYTIUK T V. Narrowing the oscillation spectra of a cholesteric liquid crystal laser [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2018, 670(1): 112-118.
- [16] ZHU C, HIEFTJE G M. A new liquid-crystal-based fiber-optic temperature sensor [J]. *Applied Spectroscopy*, 1989, 43(8): 1333-1336.
- [17] PALTO S P. On mechanisms of the helix pitch variation in a thin cholesteric layer confined between two surfaces [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2002, 94(2): 260-269.
- [18] ZHANG H, SHANG J Y, LIU X J, *et al.* High-sensitivity fiber liquid crystals temperature sensor with tiny size and simple tapered structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(10): 101202.
- [19] HUANG Y M, GUO Y T, MA Q I, *et al.* Synthesis and characterization of a cholesteric liquid crystal cholesteryl nonanoate [J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 428-429: 94-97.
- [20] SARMAN S, LAAKSONEN A. Thermomechanical coupling, heat conduction and director rotation in cholesteric liquid crystals studied by molecular dynamics simulation [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(10): 3442-3453.
- [21] FUNAMOTO K, OZAKI M, YOSHINO K. Discontinuous shift of lasing wavelength with temperature in cholesteric liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(12B): L1523-L1525.
- [22] JEONG M Y, KWAK K. Active thermal fine laser tuning in a broad spectral range and optical properties of cholesteric liquid crystal [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9378-9383.
- [23] LI ZG, WANG X, YE W J, *et al.* Application guided wave method in testing for a vertical aligned liquid crystal cell [J]. *Optik*, 2013, 124(15): 2191-2195.
- [24] REY A D. Theory of linear viscoelasticity of cholesteric liquid crystals [J]. *Journal of Rheology*, 2000, 44(4): 855-869.
- [25] AGRAWAL O P. Generalized variational problems and Euler-Lagrange equations [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2010, 59(5): 1852-1864.
- [26] DASILVA R R, ZANETTI F M, LYRA M L, *et al.* Polarization rotation of localized modes in magneto-photonic

- Fibonacci structures containing nematic layers [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2017, 657(1): 11-20.
- [27] BERREMAN D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(4): 502-510.
- [28] 孙婷婷, 袁瑞, 李振杰, 等. 基板表面锚泊对液晶全漏导模影响的理论研究[J]. 液晶与显示, 2018, 33(6): 483-489.
SUN T T, YUAN R, LI Z J, *et al.* Theoretical study of the surface anchoring effect on the full leaky waveguide mode of liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(6): 483-489. (in Chinese)
- [29] YANG F Z, SAMBLES J R, DONG Y M, *et al.* Fully leaky guided wave determination of the polar anchoring energy of a homogeneously aligned nematic liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(6): 2726-2735.
- [30] SHIM K S, HEO J U, JO S I, *et al.* Temperature-independent pitch invariance in cholesteric liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15467-15472.

作者简介:



张路瑶(1994—),女,天津武清人,硕士研究生,2018年于河南工业大学获得学士学位,主要从事液晶与液晶器件物理方面的研究。E-mail:1904138255@qq.com



李志广(1978—),男,河北衡水人,博士,副教授,2014年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶与液晶器件物理方面的研究。E-mail: zhglee@hebut.edu.cn