

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-09

负性液晶电致图案化及其衍射特性研究

尚小虎[#], 姜皓译[#], 宋振鹏, 刘 娇*, 李炳祥*

(南京邮电大学, 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023)

摘要:液晶中电对流图案形成是一种奇特而又有趣的现象,同时也是光衍射研究中的一个重要问题。本文旨在探索负介电各向异性的向列相液晶中图案形成以及相关的衍射特性。实验观察到四种不同的电对流图案,分别是软方形图案,斜条纹,静脉曲张图案和不规则图案。此外,还探究了不同温度下产生图案所需要的阈值电压。最后,研究了电场对图案的周期性以及相对指向矢倾斜角的影响,并对图案相应的衍射特性进行了分析。实验结果表明:通过调节电场和温度可以改变电对流图案;产生图案所需要的阈值电压随着温度的升高而减小,随着频率的升高而增大;软方形图案的周期随着频率升高先减小后增大,而斜条纹的周期随频率升高而减小。当频率 $f=25\text{ Hz}-45\text{ Hz}$,斜条纹相对于初始指向呈现出约 44° 的偏转。这种可控的电对流图案为实现基于向列相液晶的可调谐光学衍射器件提供了一种可行方案。

关键词:液晶;图案形成;衍射;电场;电对流

中图分类号:O753⁺.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2023-0263

Study of electro-patterning and corresponding diffraction properties in negative liquid crystals

SHANG Xiao-hu[#], JIANG Hao-yi[#], SONG Zhen-peng, LIU Jiao*, LI Bing-xiang*

(College of Electronic and Optical Engineering and College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Pattern formation of electroconvection in liquid crystals is a peculiar and intriguing phenomenon, and it also poses an important problem in the study of optical diffraction. This work aims to explore pattern formation and related diffraction characteristics in dielectrically negative anisotropic nematic liquid crystals. Four different electroconvection patterns are observed experimentally, namely, soft square, oblique rolls, skewed varicose, and irregular patterns. In addition, the threshold voltages required for pattern generation at different temperatures are investigated. Finally, the effect of electric field on the periodicity of patterns and the inclination angle of the relative director are studied, and the corresponding diffraction characteristics of the patterns are

收稿日期:2023-08-11;修订日期:2023-09-05.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022YFA1405000);国家自然科学基金(No. 62375141);江苏省自然科学基金(No. BK20212004)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFA1405000); National Natural Science Foundation of China (No. 62375141); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20212004)

#共同第一作者

*通信联系人, Email: jiaol@njupt.edu.cn; bxli@njupt.edu.cn

analyzed. The experimental results show that electroconvection patterns can be altered by adjusting the electric field and temperature; the threshold voltage required for pattern generation decreases with the increase of temperature and increases with the growth of frequency; the periodicity of soft square patterns initially decreases and then increases with the increase of frequency, while the periodicity of oblique rolls decreases with the increase of frequency. When the frequency $f = 25 \text{ Hz} - 45 \text{ Hz}$, the oblique rolls exhibit an approximately 44° deviation from the initial director. This controllable electroconvection pattern provides a feasible solution for the realization of tunable optical diffraction devices based on nematic liquid crystals.

Key words: liquid crystal; pattern formation; diffractions; electric field; electroconvection

1 引 言

液晶是一种介于固体和液体之间的软物质材料,能够自组装成各种功能性微结构图案。这也使得液晶具有广泛的应用^[1-5],包括激光^[6-8]、电光调控^[9-11]、涡旋光束生成^[12, 13]、光束控制^[14, 15]、衍射元件^[16, 17]和液滴运输^[18]等。约一个世纪前首次观察到的弗里德里克斯效应,引发了研究者对具有物理各向异性的向列相液晶中电响应现象的深入探索。电场可以引起向列相液晶指向矢 \hat{n} 的集体重新定向或区域调制,这就导致液晶中会出现空间图案化。

向列相液晶中的图案化基于电对流效应,也被称为电流体动力学不稳定性,是研究各向异性流体中图案形成的经典系统,这一现象可以用Carr-Helfrich反馈机制解释^[19, 20]。由于热扰动,液晶中的空间电荷受外加电场的作用发生分离,从而促成涡旋流动。在这种条件下,粘性力矩以平衡向列相液晶的弹性力矩。在偏光显微镜下,人们可以观察到由液晶指向矢在空间中弯曲而形成的明暗条纹;若不使用正交偏振片,由于聚焦或者散焦效应,人们仍然可以观察到图案。液晶自身的物理参数对图案的形成具有重要影响。具有负介电各向异性和正电导率各向异性的 $(-, +)$ 型液晶和具有正介电各向异性和负电导率各向异性的 $(+, -)$ 型液晶中的图案形成,可用Carr-Helfrich标准模型解释,即标准电对流模型(s-EC)。标准电对流模型中是离子的运动为指向矢提供了稳定的扭矩。当对 $(-, -)$ 型液晶施加电场时,其空间电荷的极性以及流动方向和粘性扭矩的方向会发生相反的变化,无法提供稳定的扭矩,因此不能用标准电对流模型解释。因为指

向矢畸变引起的挠曲电极化能够产生符号相反的空间电荷,研究人员通过将标准模型与挠曲电效应结合成功解释了 $(-, -)$ 型液晶中图案的产生。^[21]在以往的研究中已经观察到多种图案,包括法向条纹^[22]、斜条纹^[23]、网格图案^[24]、静脉状图案^[25]等。Kuar团队报道了向列相液晶在高温和低温下电对流图案的差异,并且分析了条纹的形成^[25]。Pramod等发现在很小的频率范围(10—17 Hz)内,向列相液晶中出现了三种不同的图案,这些图案按照开始形成的电压(即阈值电压 U_{th})递增的顺序表现为纵向条纹,倾斜条纹和法向条纹^[26]。液晶也在衍射光栅的研究有广泛的应用^[27-29]。广东工业大学的项颖教授团队使用弯核向列相液晶在一定的低频电压和温度下观察到挠曲电畴,并研究了其相应的衍射特性^[30]。袁方等通过采用两种偏振全息光路实现了大、小两种周期的液晶聚合物光栅的制备,通过级联两个光栅,实现了大角度的光束偏转^[31]。然而,基于负性液晶电致图案化实现周期和角度偏转可调的衍射光栅还需深入研究。

本工作旨在探究负性液晶HNG708600-100中图案的阈值电压和形态特征在温度和电场条件下的变化。结果表明,通过改变电场和温度可以改变电对流图案;图案的阈值电压随着温度的升高而减小,随着频率的升高而增大;图案的周期会随电场的变化而发生改变,软方形图案的周期随着频率的升高先减小后增大,而斜条纹的周期随频率升高而减小。特别地,斜条纹相对于初始指向的倾斜角会随着电场频率的变化发生偏转,在频率25 Hz—45 Hz,呈现出约 44° 的偏转。分析和研究发现,这些周期性的图案及对电场的响应可以被等效为衍射光栅。本研究为向列相

液晶应用于光衍射器件提供了可行方案。

2 实验材料及方法

实验所使用的液晶材料是向列相液晶 HNG708600-100(购自江苏和成显示科技有限公司)。其物理参数具体为, $T=25^{\circ}\text{C}$, 在 $\lambda=589\text{ nm}$ 时 $\Delta n=0.09$; $T=30^{\circ}\text{C}$, 在 $f=10\text{ kHz}$ 时, $\sigma_{\perp}\approx 3.4\times 10^{-7}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $\epsilon_{\perp}\approx 15.4$ 。因此可以得出,导电区域跟介电区域的截止频率与电荷弛豫的时间 τ_q 相关, $f_c=1/\tau_q=\sigma_{\perp}/\epsilon_0\epsilon_{\perp}\approx 2.5\text{ kHz}$ 。所选定的实验频率范围(10–100 Hz)在导电区域。在此区域中图案的产生主要还是来源于离子的运动。其相变温度为 $T_N=78.4^{\circ}\text{C}$ 。实验中所用液晶盒是两块带有透明氧化铟锡的玻璃基板粘合而成的。主要有两种不同取向的液晶盒:平行取向和垂直取向。玻璃基板上旋涂聚酰亚胺 4220(购自南京宁萃光学科技有限公司),通过单向摩擦玻璃基板得到平行取向的液晶盒。而垂直取向的液晶盒是通过玻璃基板上涂有聚酰胺酸 4070(购自南京宁萃光学科技有限公司)实现的。液晶盒的厚度为 $d=8.3\mu\text{m}$,厚度由分散在 UV 胶中的硅微粒控制。当温度加热到向列相液晶 HNG708600-100 各向同性相时,通过毛细作用灌入液晶盒中。

HNG708600-100 的介电常数 ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} 通过电感电容电阻 (LCR) 测量仪 (4284A, Hewlett-Packard) 分别在垂直取向的液晶盒和平行取向的液晶盒中测量得到。如图 1(a) 所示,温度从 $T=30^{\circ}\text{C}$ 升高至 $T=70^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_{\perp}=15.4$ 减小为 $\epsilon_{\perp}=12.0$, 而 ϵ_{\parallel} 基本保持不变。因此, $\Delta\epsilon=\epsilon_{\parallel}-\epsilon_{\perp}$ 随着温度的升高逐渐减弱。如图 1(b) 所示,在 $T=25^{\circ}\text{C}$ 时,负性液晶 HNG708600-100 的介电各向异性 $\Delta\epsilon=-11.6$, 在 $T=50^{\circ}\text{C}$ 时 $\Delta\epsilon=-8.9$, $T=75^{\circ}\text{C}$ 时 $\Delta\epsilon=-6.2$ 。

为了得到基于指向矢调控的场诱导图案,我们将信号发生器 (RIGOL DG4162) 与函数放大器 (Aigtek ATA2041) 连接来提供正弦交流电。所施加电压的幅值和频率使用数字示波器 (RIGOL DS1202) 进行控制。实验中,所施加电场的方向与液晶盒表面垂直。实验温度由热台 (HCS402) 和温度控制器 (mK2000B) (两者均购

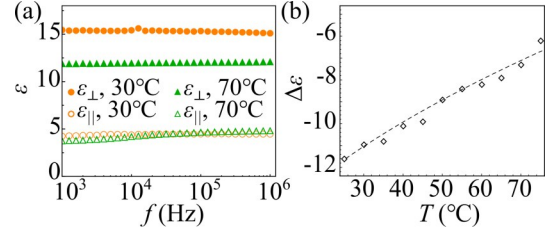


图 1 (a) $T=30^{\circ}\text{C}$ 和 $T=70^{\circ}\text{C}$ 时,液晶 HNG708600-100 的 ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} 随频率的变化关系。(b) 当 $f=20\text{ kHz}$ 时, $\Delta\epsilon$ 随温度的变化关系。

Fig. 1 (a) The ϵ_{\parallel} and ϵ_{\perp} of liquid crystal (HNG708600-100) as a function of frequency at $T=30^{\circ}\text{C}$ and $T=70^{\circ}\text{C}$. (b) The $\Delta\epsilon$ as a function of temperature at $f=20\text{ kHz}$.

自 Instec) 控制并结合偏光显微镜 (Nikon ECLIPSE Ci-POL) 对电对流图案进行表征。

3 主要结果与分析讨论

为表征负性液晶 HNG708600-100 中的电对流图案,在不击穿液晶盒的情况下,对液晶施加频率从 10 Hz 到 100 Hz 的交流电压。如图 2(a) 所示, $T=70^{\circ}\text{C}$ 时,从偏光显微镜可观察到软方形 (P1)、斜条纹 (P2) 和静脉状 (P3) 三种图案。当电压 $U < U_{th}$ (电压小于图案形成的阈值电压) 时,液晶指向矢沿着摩擦取向方向,因此在正交偏振片的偏光显微镜视野中出现全黑;频率 $f=30\text{ Hz}$, $U=12.6\text{ V}$ 时,液晶中出现规则排布的软方形图案,其排列方式与初始指向矢平行或垂直; $U=16.2\text{ V}$ 时,观察到倾斜于初始指向矢的斜条纹; $U=48.0\text{ V}$ 时,则产生密集排布的静脉状图案。如图 2(b) 所示, $T=40^{\circ}\text{C}$ 时观察到软方形、斜条纹和不规则图案 (P4)。频率 $f=30\text{ Hz}$, 电压 $U < U_{th}$ 时,液晶指向矢的方向仍与摩擦取向方向一致; $U=21.8\text{ V}$ 时,出现类似于 $T=70^{\circ}\text{C}$ 时的软方形图案,但其周期要小于 $T=70^{\circ}\text{C}$ 时的周期; $U=24.2\text{ V}$ 时,同样出现斜条纹,但不同温度下斜条纹对电场的响应不同,在之后图 5 部分将对这两种不同响应进行详细阐述;不同的是, $U=44.0\text{ V}$ 时,没有观察到静脉状图案,而是产生了不规则图案。实验中外加电场的频率小于截止频率,所以工作的区域为离子运动为主导的导电区域。这里观察到的图案 P1 和

P2可以用标准电对流模型解释。在标准电对流情况下,一般观察到的是周期性排列的条纹。低电压条件下,出现的P1是由方向互相垂直的两条纹组合产生;更高的电压下,出现的图案P2是一些倾斜的条纹。继续增大电压,将会产生在标准电对流模型基础上的二阶不稳定性,从而产生了图案P3和P4。在这些图案的产生过程中,不属于非标准电对流模型,因为非标准电对流图案主要为纵向图案(与初始指向矢平行或成很小的角度)。图2(a,b)中的插图,我们使用ImageJ对图案进行傅里叶变换(FFT),且在图3至图5部

分对图案相应的衍射特性进行了分析。以上结果表明,固定频率 $f=30\text{ Hz}$,在温度 $T=70^\circ\text{C}$ 和 $T=40^\circ\text{C}$,随着电压的升高,HNG708600-100产生的电对流图案由规则逐渐变成不规则。随后,我们分别对各温度条件下图案阈值电压随频率的变化进行了分析,如图2(c-e)。 $T=70^\circ\text{C}$ 时,软方形图案和斜条纹的阈值电压在10 Hz到100 Hz范围内没有很大变化,而静脉状图案的阈值电压随频率的升高而减小; $T=60^\circ\text{C}$ 时,图案的阈值电压随着频率的升高有小幅度的上升趋势; $T=40^\circ\text{C}$ 时,图案阈值电压随频率升高明显

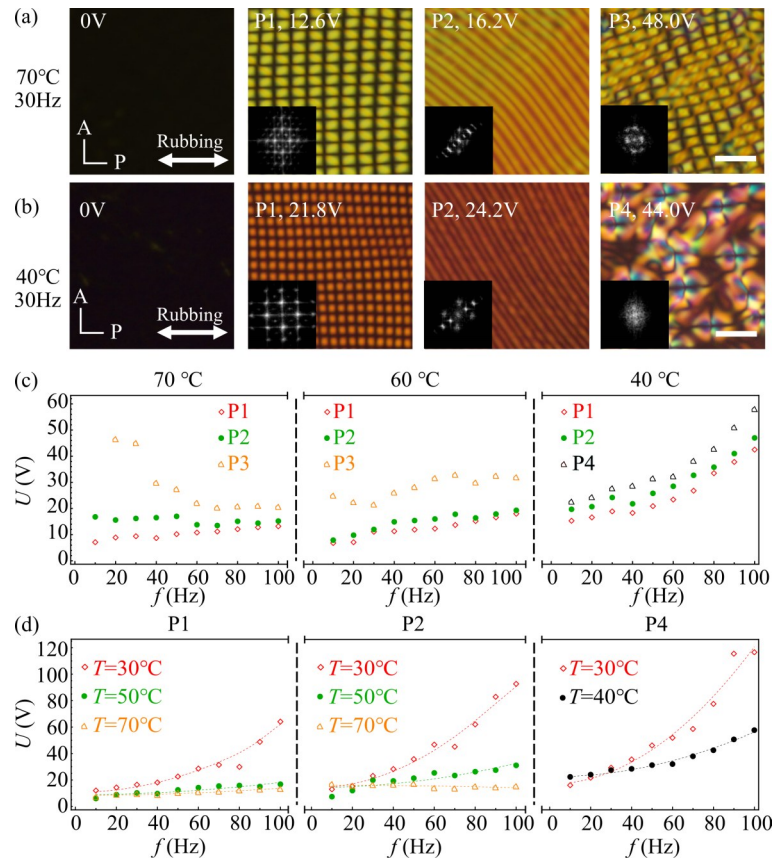


图2 向列相液晶HNG708600-100中电对流图案的POM图及对应的衍射图:(a) $f=30\text{ Hz}$, $T=70^\circ\text{C}$; (b) $f=30\text{ Hz}$, $T=40^\circ\text{C}$, P1(软方形), P2(斜条纹), P3(静脉状图案), P4(不规则图案)。(c) 温度 $T=70^\circ\text{C}$, $T=60^\circ\text{C}$ 和 $T=40^\circ\text{C}$ 时,不同图案的阈值电压。(d) 同种图案在不同温度条件下的阈值电压:软方形;斜条纹;不规则图案。指向矢的初始方向为水平方向,显微镜的起偏器与检偏器垂直,白色箭头为摩擦取向方向,液晶盒厚度 $d=8.3\text{ }\mu\text{m}$,图中的比例尺都为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。

Fig. 2 POM images of patterns in nematic liquid crystal material (HNG708600-100): (a) $f=30\text{ Hz}$, $T=70^\circ\text{C}$; (b) $f=30\text{ Hz}$, $T=40^\circ\text{C}$, P1 (soft square), P2 (oblique rolls), P3 (skewed varicose), and P4 (irregular patterns). The inset pictures show the diffraction characteristics for each pattern. (c) The threshold voltages of different patterns at $T=70^\circ\text{C}$, $T=60^\circ\text{C}$ and $T=40^\circ\text{C}$. (d) The threshold voltages of patterns at different temperature: soft square, oblique rolls and irregular patterns. The initial director is horizontal, the analyzer and polarizer are aligned perpendicularly, the thickness of cell $d=8.3\text{ }\mu\text{m}$, and the scale bars are all $25\text{ }\mu\text{m}$.

增大。实验中,图案的产生顺序:软方形、斜条纹、最后产生静脉状图案或不规则图案。图2(f-h)显示了同种图案在不同温度下的阈值电压变化。随频率升高, U_{th} 总体呈增加趋势。频率 $f \leq 30$ Hz时,当 $T = 30^\circ\text{C}$ 时,软方形图案与斜条纹图案的阈值电压最高,而 $T = 50^\circ\text{C}$ 时阈值电压最低。特别地,如图2(h)所示,不规则图案的阈值电压在 $T = 40^\circ\text{C}$ 时最大。在频率 $f > 30$ Hz时,软方形与斜条纹图案的阈值电压在 $T = 70^\circ\text{C}$ 时最小, $T = 30^\circ\text{C}$ 时最大。频率 $f = 100$ Hz,在温度 $T = 30^\circ\text{C}$ 条件下出现软方形和斜条纹图案的阈值电压比温度 $T = 70^\circ\text{C}$ 时分别增大约50 V和80 V。不规则图案在 $T = 30^\circ\text{C}$ 时的阈值电压比 $T = 40^\circ\text{C}$ 时增大了约60 V。频率和温度都会影响图案的阈值电压。随着温度的降低,图案的阈值电压增大,并且这一趋势在更高频率下更为明显,这与以往一些电对流图案形成研究的结果相吻合^[32, 33]。

软方形和斜条纹的周期性指向(光轴)可以等效为光栅结构,由光栅方程(1):

$$d_0 \sin \theta = m\lambda, \quad (1)$$

其中: d_0 为光栅常数, θ 为衍射角, m 为衍射级次, λ 为入射光波长(632.8 nm),设定光栅与接收屏距离为23.5 cm。由此,可以推导出零级与一级衍射斑间距满足公式(2):

$$d_0 = \frac{632.8 \text{ nm}}{\sin(\arctan(\frac{D}{23.5 \text{ cm}}))}, \quad (2)$$

其中, D 为衍射斑间距。

图3展示了 $T = 40^\circ\text{C}$ 时软方形图案及其衍射图样随电场的变化情况。如图3(a)所示,频率分别为20 Hz、50 Hz和80 Hz时的软方形图案插图为相应的衍射图样。图3(b)展示了图案沿 x 轴的光强分布,也反映了图案沿 x 轴的周期大小。如图3(a,b)所示,不同电场条件下图案周期是不同的,因此我们分别探究了电压和频率对周期的影响。结果显示,软方形图案的周期几乎不受施加电压的影响,部分原因可能是电压范围比较窄,最大值与最小值的比值约为1.1。具体来说,在 $f = 40$ Hz,电压从18.3 V升高到20.3 V,软方形沿 x 轴和 y 轴的周期保持 $P_x \approx 4.67 \mu\text{m}$ 和 $P_y \approx 6.21 \mu\text{m}$,如图3(c)所示。而图案周期随频率的改变表现出不同的结果。如图3(d)所示, $f = 10$ Hz时, $P_x \approx 9.19 \mu\text{m}$, $P_y \approx 7.57 \mu\text{m}$; $f = 40$ Hz时, $P_x \approx 4.67 \mu\text{m}$, $P_y \approx 6.21 \mu\text{m}$; $f = 100$ Hz时, $P_x \approx 7.32 \mu\text{m}$, $P_y \approx 7.2 \mu\text{m}$ 。随着频率升高,图案沿 x 轴与 y 轴方向的周期 P_x 和 P_y 都出现先减小后增大的趋势,且沿 x 轴的变化更为明显。因此,相应的衍射斑间距会随着频率的升高先增大后减小, $f = 10$ Hz时, $L_x \approx 16.2 \text{ mm}$,

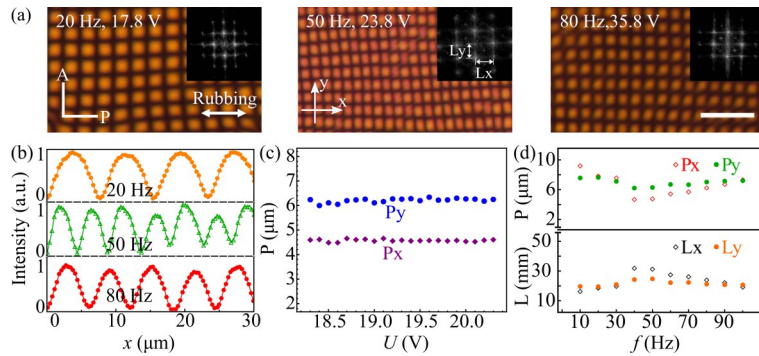


图3 (a) 不同频率下的软方形的POM图,插图为相应的衍射图;(b) 软方形图案沿 x 轴的光强分布;(c) 在 $f = 40$ Hz时,周期 P_x 和 P_y 随电压的变化;(d) 周期 P_x 和 P_y ,衍射斑间距 L_x 和 L_y 随频率的变化。 $T = 40^\circ\text{C}$,指向矢的初始方向为水平方向,液晶盒厚度 $d = 8.3 \mu\text{m}$,图中的比例尺都为 $25 \mu\text{m}$ 。

Fig. 3 (a) POM images of various soft square at different frequencies, and the inset pictures show the corresponding diffraction patterns. (b) The intensity distribution of the soft square pattern along with x axis. (c) The periodicity P_x and P_y as a function of voltage at $f = 40$ Hz. (d) The periodicity P_x and P_y , diffraction spot spacing L_x and L_y as a function of frequency. $T = 40^\circ\text{C}$, the initial director is horizontal, the thickness of cell $d = 8.3 \mu\text{m}$, and all the scale bars are $25 \mu\text{m}$.

$L_y \approx 19.6 \text{ mm}$; $f = 40 \text{ Hz}$ 时, $L_x \approx 31.8 \text{ mm}$,
 $L_y \approx 23.9 \text{ mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$ 时, $L_x \approx 20.3 \text{ mm}$,
 $L_y \approx 20.7 \text{ mm}$ 。

实验发现, $T = 40^\circ\text{C}$ 时, 斜条纹的周期可以通过改变电场来调节。图 4(a) 显示了 $f = 70 \text{ Hz}$ 和 $U = 34.4 \text{ V}$ 时, 斜条纹沿法线方向 k 的光强变化, 插图为斜条纹及其衍射图。斜条纹的一个周期包括光强的一个极大值和一个次极大值, 并且几乎不受电压的影响。固定 $f = 70 \text{ Hz}$, 电压从 32.7 V

增大到 34.7 V , 斜条纹周期稳定于 $P \approx 8.57 \mu\text{m}$, 如图 4(b) 所示。斜条纹的周期与频率呈线性关系。随着频率从 10 Hz 增大到 100 Hz , 斜条纹的周期从 $P \approx 13.22 \mu\text{m}$ 减小到 $P \approx 7.59 \mu\text{m}$ 。而图案相应的衍射斑间距 (L) 从 $L \approx 11.25 \text{ mm}$ 增加到 $L \approx 19.59 \text{ mm}$, 如图 4(c) 所示。

温度会改变图案的阈值电压和形态特征, 而且能够影响图案对电场的响应。最后, 我们比较了 $T = 60^\circ\text{C}$ 和 $T = 40^\circ\text{C}$ 时斜条纹随电场的变化情况。如图 5 所示, 不同温度条件下, 斜条纹相对

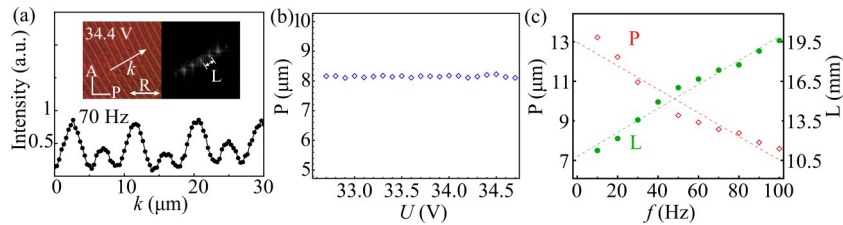


图 4 (a) 斜条纹图案沿法线方向 k 的光强分布图, 插图为当 $f = 70 \text{ Hz}$, $U = 34.4 \text{ V}$ 产生的斜条纹图案及相应的衍射图, L 为衍射斑间距; (b) $f = 70 \text{ Hz}$ 时, 周期 P 随电压的变化; (c) 周期 P 和衍射斑间距 L 随频率的变化。 $T = 40^\circ\text{C}$, 指向矢的初始方向沿摩擦方向 R 为水平方向, 液晶盒厚度 $d = 8.3 \mu\text{m}$ 。

Fig. 4 (a) Intensity distribution along the normal direction of oblique rolls at $f = 70 \text{ Hz}$ and $U = 34.4 \text{ V}$, and the inset pictures are POM image of the oblique rolls (left) and the corresponding diffraction pattern (right), where L represents the spacing between diffraction patterns. (b) The periodicity P as a function of voltage at $f = 70 \text{ Hz}$. (c) The periodicity P and the space of diffraction spots L as a function of frequency. $T = 40^\circ\text{C}$, the initial director is horizontal along the rubbing direction R , and the thickness of cell $d = 8.3 \mu\text{m}$.

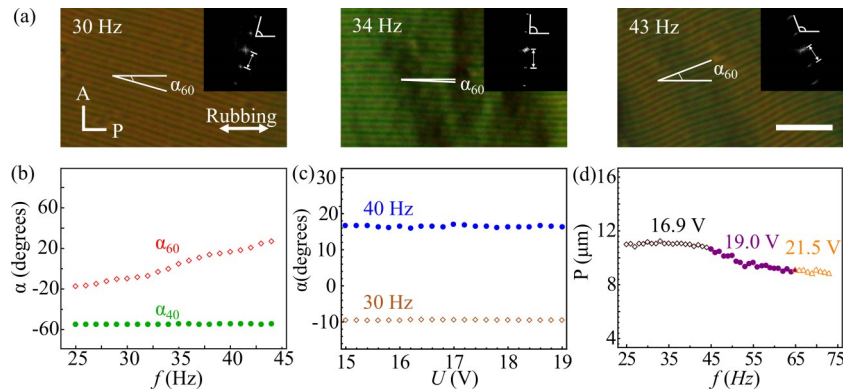


图 5 (a) 当 $U = 16.9 \text{ V}$, 不同频率下斜条纹的 POM 图 ($f = 30 \text{ Hz}$, $f = 34 \text{ Hz}$ 和 $f = 43 \text{ Hz}$), 插图为相应的衍射图; (b) $T = 60^\circ\text{C}$, $U = 16.9 \text{ V}$ 时, 斜条纹倾斜角度 (α_{60}) 随频率的变化。 $T = 40^\circ\text{C}$, $U = 23.0 \text{ V}$ 时, α_{40} 随频率的变化; (c) 在 $f = 30 \text{ Hz}$ 和 $f = 40 \text{ Hz}$ 时, α_{60} 随电压的变化; (d) $T = 60^\circ\text{C}$, 斜条纹的周期 P 随频率的变化。指向矢的初始方向为水平方向, 液晶盒厚度 $d = 8.3 \mu\text{m}$, 图中比例尺都为 $25 \mu\text{m}$ 。

Fig. 5 Oblique rolls at $U = 16.9 \text{ V}$ and (a) $f = 30 \text{ Hz}$; $f = 34 \text{ Hz}$; $f = 43 \text{ Hz}$ and corresponding diffraction characteristics. (b) Variations of α_{60} with frequency at $T = 60^\circ\text{C}$ and $U = 16.9 \text{ V}$; α_{40} at $T = 40^\circ\text{C}$ and $U = 23.0 \text{ V}$. (c) Angle variations of oblique rolls with respect to the director with voltage at $f = 30 \text{ Hz}$ and $f = 40 \text{ Hz}$. (d) P changes with the frequency at the voltages are 16.9 V , 19.0 V and 21.5 V respectively. The initial director is horizontal, the thickness of cell $d = 8.3 \mu\text{m}$, and the scale bars are all $25 \mu\text{m}$.

于初始指向矢的倾斜角度(α_T , T 表示实验温度)在电场频率变化时呈现不同的变化。当 $U = 16.9 \text{ V}$, $T = 60^\circ\text{C}$ 时,斜条纹与初始指向矢夹角(α_{60})随着频率的增加发生偏转,如图 5(a)所示,当频率从 30 Hz 升高到 43 Hz 时, α_{60} 从 -10.0° 偏转到 24.6° 。紧接着,我们又系统性地研究了在 $T = 40^\circ\text{C}$ 时和 $T = 60^\circ\text{C}$ 时的 α_T ,如图 5(b)所示,发现当频率从 25 Hz 增大到 45 Hz, α_{40} 基本不发生变化, α_{60} 从 -17.5° 偏转到 26.8° 。随后,我们进一步探究了在 $T = 60^\circ\text{C}$ 条件下,不同电压对倾斜角度的影响,如图 5(c)所示,当电压从 $U = 15.0 \text{ V}$ 增大到 $U = 19.0 \text{ V}$, $f = 30 \text{ Hz}$ 时, α_{60} 保持在 -9.6° ; $f = 40 \text{ Hz}$ 时, α_{60} 约为 16.5° 。最后,我们又探究了 $T = 60^\circ\text{C}$ 时,不同频率对斜条纹周期的影响,发现,在 $U = 16.9 \text{ V}$ 时,当频率 $f = 25 \text{ Hz}$ 增加到 $f = 44 \text{ Hz}$,斜条纹周期略微减小但仍保持在 $P \approx 11.10 \mu\text{m}$ 左右;在 $U = 19.0 \text{ V}$ 时,频率从 $f = 45 \text{ Hz}$ 升高到 $f = 65 \text{ Hz}$,斜条纹的周期逐渐减小,从 $P \approx 10.62 \mu\text{m}$ 到 $P \approx 9.12 \mu\text{m}$;在 $U = 21.5 \text{ V}$ 时, $P \approx 9.10 \mu\text{m}$ 从 $f = 65 \text{ Hz}$ 到 $f = 73 \text{ Hz}$ 减小到 $P \approx 8.84 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

本文在不同温度下研究了负性液晶 HNG708600-100 中电对流图案,并证明了通过调控电场条件可以实现软方形、斜条纹和静脉状图案相互转换。此外,相同图案的阈值电压在不同温度下会有很大的变化。当 $f = 100 \text{ Hz}$,软方形在 $T = 30^\circ\text{C}$ 时的阈值电压比 $T = 70^\circ\text{C}$ 时增大了约 50 V;斜条纹的阈值电压增大了约 80 V;温度从 $T = 40^\circ\text{C}$ 降低到 $T = 30^\circ\text{C}$,不规则图案的阈值电压也增大了约 60 V。在 $T = 40^\circ\text{C}$ 时,软方形和斜条纹的周期几乎不受施加电压的影响,但会随着频率的升高出现变化。尤其值得注意的是,在 $T = 60^\circ\text{C}$ 时,在一个小的频率范围内(25 Hz — 45 Hz),斜条纹相对于初始指向矢的倾斜角度会随着频率的升高而产生 44.3° 偏转。

本工作探究了图案随着外部电场的周期和倾斜角度的变化,并分析了图案的衍射特性。这种基于向列相液晶中电场可调谐的图案形成为使用向列相液晶作为周期和角度可调光栅提供了可行的思路。在未来的研究中,我们可以继续探索基于负性液晶电致图案化实现具有周期可控和更大偏转角度衍射光栅的研究。

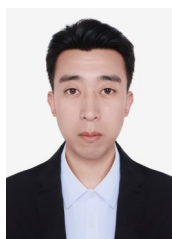
参 考 文 献:

- [1] 杨梦园,杨潇,封伟,等. 近红外光响应液晶纳米智能材料 [J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 631-44.
YANG M Y, YANG X, FENG W, *et al.* Near-infrared light-responsive intelligent liquid crystal nanocomposites [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 631-644. (in Chinese)
- [2] 陈原浩,吕鹏飞,杨梦园,等. 光驱动软体致动器的制备及其信息安全应用 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 229-36.
CHEN Y H, LYU P F, YANG M Y, *et al.* Fabrication of light-driven soft actuator and its information security application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 229-236. (in Chinese)
- [3] 马佳哲,杨言昭,王玲,等. 主链型手性液晶弹性体(特邀) [J]. 光子学报, 2022, 51(7): 0751417.
MA J Z, YANG Y Z, WANG L, *et al.* Main-chain Chiral Liquid Crystal Elastomers (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751417. (in Chinese)
- [4] 史书宽,李斌轩,杨槐,等. 仿生光热管理智能高分子材料 [J]. 液晶与显示, 2022, 37(2): 250-63.
SHI S K, LI B X, YANG H, *et al.* Bioinspired intelligent polymer materials for optical and thermal management [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(2): 250-263. (in Chinese)
- [5] 杨言昭,张璇,封伟,等. 仿生变色液晶功能材料 [J]. 表面技术, 2022, 51(8): 15-29.
YANG Y Z, ZHANG X, FENG W, *et al.* Bioinspired Color-Changing Liquid Crystal Materials [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(8): 15-29. (in Chinese)
- [6] CHEN L, LI Y, FAN J, *et al.* Photoresponsive monodisperse cholesteric liquid crystalline microshells for tunable omnidirectional lasing enabled by a visible light-driven chiral molecular switch [J]. *Advanced Optical Materials*,

- 2014, 2(9): 845-848.
- [7] 岱钦,李勇,乌日娜,等. 楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究. 物理学报, 2013, 62(4): 044219.
DAI Q, LI Y, WU R N, *et al.* Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044219. (in Chinese)
- [8] 蔡文锋,李焯,唐宗元,等. 液晶随机激光:原理与研究进展 [J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201006.
CAI W F, LI Y, TANG Z Y, *et al.* Liquid Crystal Random Laser: Principles and Research Progresses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201006. (in Chinese)
- [9] LI B X, XIAO R L, PALADUGU S, *et al.* Dye-doped dual-frequency nematic cells as fast-switching polarization-independent shutters [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 3861-3866.
- [10] GOLOVIN A B, SHIYANOVSKII S V, LAVRETOVICH O D. Fast switching dual-frequency liquid crystal optical retarder, driven by an amplitude and frequency modulated voltage [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(19): 3864-3866.
- [11] 孙路瑶,王鑫垚,陈佳浩,等. 基于序参数与取向涨落的液晶电光开关 [J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2123001.
SUN L Y, WANG X Y, CHEN J H, *et al.* Liquid Crystal Electro-Optic Switching Based on Order Parameter and Orientation Fluctuations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(21): 2123001. (in Chinese)
- [12] DUAN W, MA L L, CHEN P, *et al.* Patterned optical anisotropic film for generation of non-diffracting vortex beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(3): 031101.
- [13] 王华才,曹瀚,于宏冠,等. 基于光取向液晶叉型光栅的涡旋光产生器 [J]. 量子电子学报, 2022, 39(1): 120.
WANG H C, CAO H, YU H G, *et al.* Optical vortex generator based on photopatterned liquid crystal fork gratings [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(1): 120. (in Chinese)
- [14] ZHANG X, KOZ B, BISOYI H K, *et al.* Electro-and photo-driven orthogonal switching of a helical superstructure enabled by an axially chiral molecular switch [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(49): 55215-55222.
- [15] ZHENG Z G, LI Y, BISOYI H K, *et al.* Three-dimensional control of the helical axis of a chiral nematic liquid crystal by light [J]. *Nature*, 2016, 531(7594): 352-356.
- [16] XIANG Y, JING H, SUN W, *et al.* Topological defects arrays and control of electro-convections in periodically photo-aligned bent-core nematics [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 318: 114058.
- [17] MING L, PEI QING Z, JING G, *et al.* Phase controlled laser interference for tunable phase gratings in dye-doped nematic liquid crystals [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(1): 108.
- [18] 窦韵洁,王泽宇,魏阳,等. 基于液晶功能表面的液滴输运研究 [J]. 液晶与显示, 2023, 1-8.
DOU Y J, WANG Z Y, WEI Y, *et al.* Transport behavior of liquid droplets based on functional liquid crystal surfaces [J/OL]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 1-8. (in Chinese)
- [19] CARR E. Influence of electric fields on the molecular alignment in the liquid crystal p-(anisalamino)-phenyl acetate [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1969, 7(1): 253-68.
- [20] HELFRICH W. Conduction-Induced Alignment of Nematic Liquid Crystals: Basic Model and Stability Considerations [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51(9): 4092-4105.
- [21] ÉBER N, SALAMON P, BUKA Á. Electrically induced patterns in nematics and how to avoid them [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2016, 4(2): 101-34.
- [22] FUNFSCHILLING D, SAMMULI B, DENNIN M. Patterns of electroconvection in the nematic liquid crystal N4 [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(1): 016207.
- [23] KREKHOV A, DECKER W, PESCH W, *et al.* Patterns driven by combined ac and dc electric fields in nematic liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2014, 89(5): 052507.
- [24] J-HHUH, OSOGUCHI H. Formation of grid patterns in an ac-driven electroconvection system [J]. *Physical Review E*, 2020, 101(6): 062701.
- [25] KAUR S, BELAISSAOUI A, GOODBY J W, *et al.* Nonstandard electroconvection in a bent-core oxadiazole material [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(4): 041704.
- [26] TADAPATRI P, KRISHNAMURTHY K. Competing instability modes in an electrically driven bent-core nematic

- liquid crystal [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2012, 116(2): 782-793.
- [27] 吕凤珍,郑致刚,彭增辉,等. 一次曝光法制备二维电调谐聚合物液晶光栅[J]. 光子学报, 2009, 38(10): 2506.
LV F Z, ZHENG Z G, PENG Z H, *et al.* Two-Dimensional Electrically-Tunable Diffraction Grating Prepared by Single-Step Exposure Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2506. (in Chinese)
- [28] 郑继红,顾玲娟,庄松林,等. 基于全息聚合物液晶光栅的动态增益均衡器的设计与模拟[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1087.
ZHENG J H, GU L J, ZHAUNG S L, *et al.* Design and Simulation of Dynamic Gain Equalizer Based on Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal Volume Grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(8): 1087. (in Chinese)
- [29] 郑致刚,李文萃,刘永刚,等. 双重复合式液晶/聚合物电调谐光栅的制备. 物理学报, 2008, 57(11): 7344-7348.
ZHENG Z G, LI W C, LIU Y G, *et al.* Electrically tunable multiplexed grating with alternate liquid crystal-polymer structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 7344-7348. (in Chinese)
- [30] 袁瑞,封贺,邢红玉,等. 弯曲芯型向列相液晶中的挠曲电畴 [J]. 液晶与显示, 2016, 31(9): 870-876.
YUAN R, FENG H, XING H Y, *et al.* Flexodomain in BCN liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9): 870-876. (in Chinese)
- [31] 袁方,谭庆贵,王光耀,等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转 [J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1411-1419.
YUAN F, TAN Q G, WANG G Y, *et al.* Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419. (in Chinese)
- [32] WIANT D, GLEESON J T, EBER N, *et al.* Nonstandard electroconvection in a bent-core nematic liquid crystal [J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 041712.
- [33] TóTH-KATONA T, CAUQUIL-VERGNES A, ÉBER N, *et al.* Nonstandard electroconvection with Hopf bifurcation in a nematic liquid crystal with negative electric anisotropies [J]. *Physical Review E*, 2007, 75(6): 066210.

作者简介:



尚小虎(1997—),男,山西临汾人,南京邮电大学在读研究生,目前从事液晶方面的相关研究。E-mail:1021020820@njupt.edu.cn



李炳祥(1982—),男,福建泉州人,博士,教授,2019年于肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位。主要从事液晶、刺激响应软材料、活性物质和生物物理等研究。E-mail:bxli@njupt.edu.cn



刘 娇(1991—),女,河南漯河,博士,讲师,2022年于美国肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位,主要从事手性液晶材料、刺激响应软材料研究。E-mail:jiaol@njupt.edu.cn.