

文章编号: 1007-2780(2025)09-1243-08

用于图案化打印的聚合物稳定液晶材料

张志立^{1,2}, 王翔¹, 黄文彬^{2,3}, 周小红^{2,3,4}, 于忠卫¹, 黄艳艳^{1*}

(1. 南通大学 物理科学与技术学院, 江苏 南通 226001;

2. 苏州大学 光电科学与工程学院 苏州纳米科学技术协同创新中心, 江苏 苏州 215006;

3. 苏州大学 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部现代光学技术重点实验室,
江苏 苏州 215006;

4. 维业达科技(江苏)有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要:传统 PSCLC 薄膜的图案化制造依赖于预制光掩膜或复杂微纳加工工艺, 成本高且灵活性受限, 制约了其在个性化光学器件中的应用。本文采用按需喷墨技术, 实现快速、高效的图案化制备, 使液晶图案具备可编程性和高设计自由度, 并引入双折射膜提升光学调制效率, 实现颜色梯度变化。红、绿、蓝 3 种 PSCLC 材料在实验中的反射中心波长分别为 680 nm、550 nm 和 490 nm, 并在直流电压下进入散射态, 展现出优异的电光响应特性。通过优化液晶溶液黏度及输入波形, 制备出像素尺寸 60 μm 的均匀 PSCLC 像素阵列, 确保喷墨打印工艺的可行性。这种低成本、可扩展的液晶图案制造方法不仅提升了液晶图案化的精度, 还拓展了 PSCLC 在柔性显示、智能光子器件及可调光学元件中的应用潜力。

关键词:胆甾相液晶; 喷墨打印; 光谱调控; 电驱动

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0119 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0119

Polymer-stabilized liquid crystals for pattern inkjet printing

ZHANG Zhili^{1,2}, SUN Yi¹, HUANG Wenbin^{2,3}, ZHOU Xiaohong^{2,3,4},
YU Zhongwei¹, HUANG Yanyan^{1*}

- (1. School of Physical Science and Technology, Nantong University, Nantong 226001, China;
2. Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, School of Optoelectronic
Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;
3. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Lab of Modern
Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China;
4. Weiyeda Technology (Jiangsu) Co. Ltd., Nantong 226001, China)

Abstract: The conventional patterning of PSCLC films relies on prefabricated photomasks or complex micro/nano fabrication processes, which are costly and limited flexibility, thus restricting their applications in

收稿日期: 2025-06-08; **修订日期:** 2025-07-10.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFB3606603); 国家自然科学基金 (No. 62175170, No. 62275180); 江苏省高校重点学科建设

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3606603); National Natural Science Foundation of China (No. 62175170, No. 62275180); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

*通信联系人, E-mail: yyhuang@ntu.edu.cn

personalized optical devices. In this work, a drop-on-demand inkjet printing technique is employed to achieve rapid and efficient patterning, enabling programmable and highly designable liquid crystal patterns. A birefringent film is introduced to enhance optical modulation efficiency and realize gradient color variations. Experimentally, the reflection peaks of red, green, and blue PSCLC materials are centered at 680 nm, 550 nm, and 490 nm, respectively, and all enter a scattering state under applied DC voltages, demonstrating excellent electro-optical responsiveness. By optimizing the viscosity of the liquid crystal solution and the driving waveform, uniform PSCLC pixel arrays with a minimum pixel size of 60 μm are successfully fabricated, verifying the feasibility of the inkjet printing process. This low-cost and scalable patterning method significantly improves the precision of PSCLC patterning. It also expands their potential applications in flexible displays, smart photonic devices, and tunable optical elements.

Key words: cholesteric liquid crystal; inkjet printing; spectrum tuning; electric driving

1 引言

液晶由于固有的光学各向异性、自组装能力和对外部刺激的灵敏响应,在防伪、光调控、先进显示、智能窗户^[1-5]等多个领域取得广泛应用。胆甾相液晶(CLC)因为独特的周期性螺旋结构表现出布拉格反射和特殊的旋光性^[6-7],具备对光选择性反射的特点,其反射光谱范围可以通过调整手性掺杂剂的浓度精准调控,从而展现丰富的反射色^[8]。然而,传统的CLC材料由于其本身的流动性,在加工过程中面临较大挑战,例如导致图案形貌不稳定、色彩失真等。在聚合物稳定液晶(PSCLC)体系中,液晶的存在形式为以聚合物网络为边界的连续液晶畴,形成稳定结构^[9],这突破了传统CLC流动性对加工的限制,拥有稳定坚固的结构,同时增强了材料的机械强度和环境耐受性,拓展了CLC在柔性显示、光学存储等领域的应用潜力。机械变色液晶材料因其机械应力下的变色能力,用于创建智能材料和设备,在柔性人工皮肤、可视化传感器和智能仿生设备等领域成为研究热点^[10]。通过将可逆断裂和重组的动态键集成到液晶聚合物(LCP)中获得的动态键合LCP,具有可重编程性、可回收性和自愈能力,能更好地适应环境变化^[11]。另外,将手性胆甾醇基与非手性联苯基两种介晶单元接枝到聚(3-巯丙基甲基硅氧烷)(PMMS)主链合成的新型侧链液晶聚合物,通过揭示侧链参数对其自组装及相特性的关键影响,为定制先进功能材料提供理论依据^[12]。

随着精细加工技术的发展,喷墨打印技术以

其精准的图案化和对材料的高效利用成为制造大面积和低成本液晶器件有潜力的技术^[13]。相比于传统的掩膜技术、丝网印刷等工艺,喷墨打印技术能够直接在柔性或刚性衬底上沉积液晶材料,实现无掩膜、可编程的图案化制造。运用喷墨技术和光固化,可以实现对聚合物稳定液晶的空间图案化,极大丰富了液晶光学器件的设计自由度,使得不同颜色、不同形状和功能的液晶图案得以按需制备,实现高分辨可定制的效果^[14-16],为高性能的液晶光学器件提供一种全新的制造策略。

2 实验

先将不同浓度的手性剂R5011掺杂到向列相液晶E7中获得胆甾相液晶。R5011拥有较高的螺旋扭转力($\text{HTP}=108\text{ }\mu\text{m}^{-1}$),意味着利用相对较低的掺杂剂浓度可获得可见光谱范围内的CLC混合物,从而减少掺杂剂对CLC可印刷性潜在的不利影响。再将5%浓度(质量分数)的反应型液晶单体RM257和0.5%浓度(质量分数)的光引发剂IRG-651加入胆甾相液晶中,在80℃下混合2 h,直至材料充分溶解,利用虹吸作用将液晶填入液晶盒中,在紫外光下固化后测量特性。

喷墨打印聚合物稳定胆甾相液晶的过程如图1所示。首先用玻璃清洗机和去离子水超声清洗ITO玻璃基底,再用氮气吹干。随后用旋涂仪旋涂0.5%(质量分数)的SD1在两片玻璃基板上,转速为3 000 r/min,旋涂时长为30 s。将旋涂好的ITO玻璃转移到热台上,100℃加热10 min,

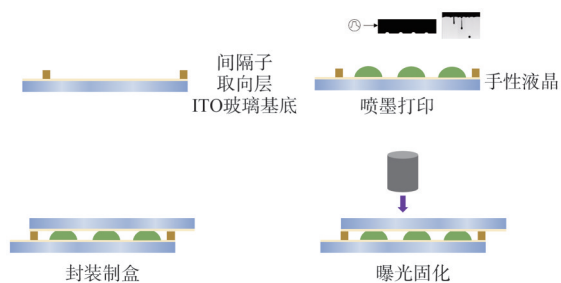


图1 喷墨打印液晶聚合物的过程

Fig. 1 Process for inkjet printing liquid crystal polymers

直至完全烘干。用405 nm紫外光对SD1薄膜进行曝光,均一取向15 min。然后在底部ITO玻璃基板上旋涂3 μm 间隔子,转速为3 000 r/min,旋涂时长为30 s。将旋涂好的ITO玻璃转移到热台上,100 $^{\circ}\text{C}$ 加热10 min,直至完全烘干。在偏光显微镜下可以观察间隔子涂布效果,确保间隔子均匀无团簇,以免影响打印效果。

另一片ITO玻璃用作顶部基板。用注射器和0.45 μm 的过滤头将胆甾相液晶混合溶液转移到打印墨盒内,装入喷墨打印机。打印机配有相同的30 μm 压电陶瓷喷嘴,由波形发生器驱动,在电压

作用下压电喷嘴发生形变,喷射墨滴。喷墨打印电压分为4个阶段:第一阶段电压较低,墨腔得到填充;第二阶段电压逐渐升高,压电陶瓷发生形变,液滴在喷嘴处形成结构,但尚未断开;第三阶段电压降低,墨腔内的墨水回收,与喷嘴处的墨滴断开,墨滴被打印到基板上;第四阶段电压回到初始状态,墨腔内的墨水得到填充,结束完整的喷墨过程。打印完成后封装液晶盒,紫外光固化。

3 结果与讨论

3.1 手性剂浓度对透射光谱的影响

胆甾相液晶的周期性螺旋结构使其选择性地反射和透射圆偏振光。当吸收峰处在可见光谱中时,器件呈现丰富的颜色。当入射光垂直入射时,透射光的中心波长 λ 可以表示为^[17]:

$$\lambda = n_{\text{eff}} p, \quad (1)$$

其中, n_{eff} 和 p 分别表示CLC的有效折射率和螺距。调节手性剂的含量可实现透射光中心波长的有效调控,因此实验制备了不同手性剂质量分数(2.0%~3.2%)的手性液晶溶液,并将其填充至液晶盒中。

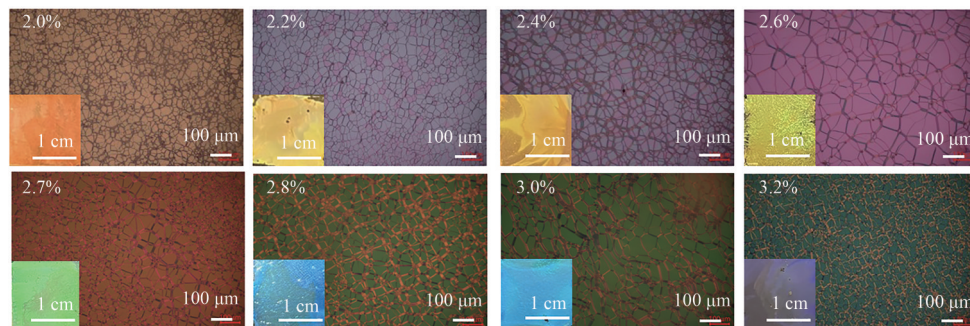


图2 胆甾相液晶实物图和织构图

Fig. 2 Physical images and texture images of cholesteric liquid crystal

为进一步分析器件的光学性质,我们利用紫外-可见光光度计测量了器件在不同手性剂浓度下对应的透射光谱,并选择红、绿、蓝3种颜色作为代表,其测量结果如图3(a)所示。实验结果表明,随着手性剂浓度的增加,反射光谱的中心波段发生了蓝移。此外,实验还采用了S5011手性剂制备了另一组手性液晶样品,比较了两种手性剂的掺杂浓度与反射波长之间的关系,如图3(b)所示。该曲线进一步表明手性剂浓度对液晶反

射光谱具有明显的影响,验证了手性剂浓度对液晶反射波段的调控效果。

CLC手性使其对线偏振光只有50%的透射或反射,双折射膜则可实现偏振态和偏振面的转换及偏振光调制,可应用于光纤通信、平板显示等领域^[18]。入射光经双折射膜会分解为快、慢轴方向的两个正交偏振分量,因折射率不同产生相位差,从而改变其偏振态。线偏振光平行于快轴方向时,偏振状态不变。若线偏振光旋转45 $^{\circ}$,则

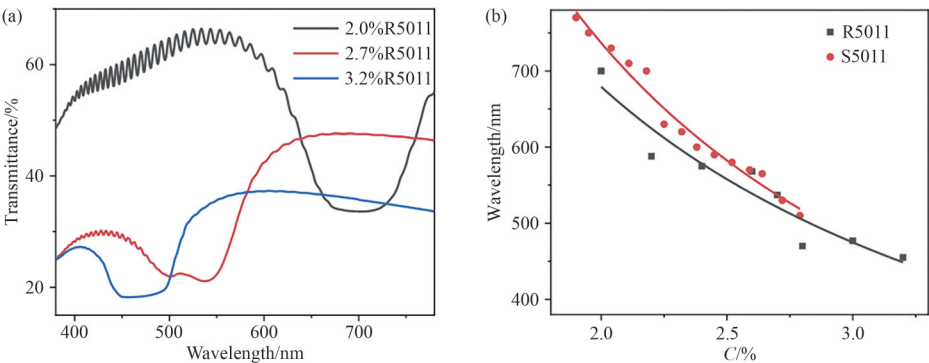


图3 (a) 3种浓度(质量分数)手性液晶的透射光谱;(b)不同手性剂浓度(质量分数)与对应的反射波长。
Fig. 3 (a) Transmission spectra of chiral liquid crystals with three different concentrations (mass fractions); (b) Relationship between chiral agent concentration (mass fraction) and corresponding reflection wavelength.

生成左旋圆偏振光,可被含左旋手性掺杂剂的CLC层反射。相反,将线偏振光旋转 -45° ,则会生成右旋圆偏振光,该光能够通过左旋CLC层。

我们将 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚的双折射膜贴合在灌注有CLC(其反射中心波长为 640 nm)的液晶盒的一侧。以线偏振光作为入射光源,旋转液晶器件与线偏振光的相对角度,通过测量透射光谱研究了双折射膜对CLC器件光学性能的影响,结果如图4所示。当液晶盒旋转角度从 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 变化时,CLC器件的透射率逐渐增大,颜色呈现从有色过渡到透明的明显梯度变化,说明入射光偏振状态与CLC器件偏振方向不一致时,透射增强。双折射膜的引入改变了入射光的偏振特性,增强了

液晶器件的选择性反射效率。

3.2 CLC的电驱动特性

液晶的电致变色机理主要源于其分子排列的各向异性及电场对分子取向的调控。在手性液晶中,分子呈螺旋状有序排列,形成周期性的螺旋结构。这种螺旋结构会对入射光产生选择性反射,螺距 p 越长,反射光波长越长(颜色偏向红、橙);螺距 p 越短,反射光波长越短(颜色偏向蓝、紫)。当施加外部电场时,电场力会对分子产生定向力矩,破坏原有的螺旋平衡。若电场强度较弱,螺旋结构被轻微拉伸,螺距 p 增大,反射光波长向长波方向移动;当电场强度超过临界值时,螺旋结构被拉伸甚至解开,选择性反射能力减弱或消失,材料可能呈现透明或其他基色。当电场撤去后,液晶分子在自身弹性恢复力或分子间相互作用下,会重新回到螺旋排列状态,螺距恢复初始值,颜色也随之复原。因此,在手性液晶中,电场会影响分子取向及螺旋结构,诱导分子重新排列,改变器件反射和透光特性,通过调节电压可调控其光学性质,最终表现为可见颜色变化。

图5展示了不同电压下CLC层状态变化的实验结果。当未施加电场时,如图5(a)所示,此时液晶层保持在平面态下,分子排列有序并且具有较强的反射性,CLC器件呈现鲜艳的颜色,光谱中有明显的反射带。这说明在平面态下,手性液晶的周期性螺旋结构能有效反射特定波长的光,从而产生明显的颜色反射效果。当电压达到 30 V 左右时,手性液晶分子的螺旋结构由于电场的作用开始发生变化,CLC层经历了从平面态到焦锥态

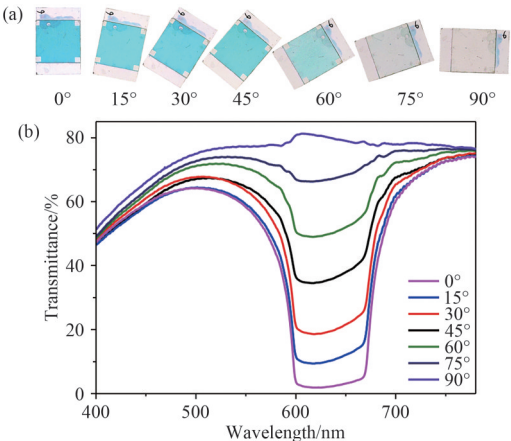


图4 (a)转动胆甾相液晶器件的透射颜色梯度变化;(b)旋转不同角度胆甾相液晶器件的透射光谱。
Fig. 4 (a) Gradient change in transmitted color of cholesteric liquid crystal device during rotation; (b) Transmission spectra of cholesteric liquid crystal device at different rotation angles.

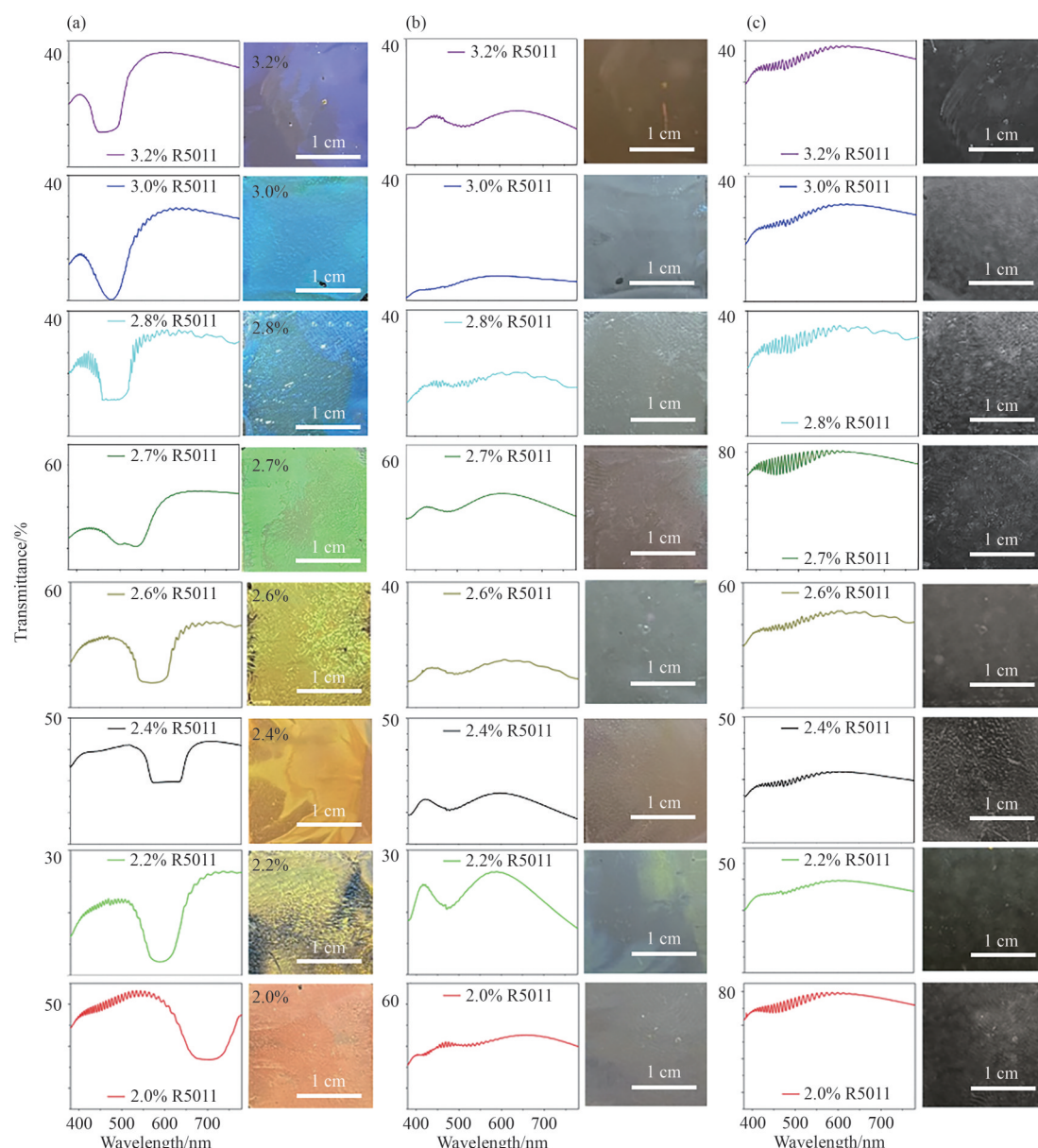


图5 不同浓度(质量分数)手性液晶的电压驱动下的实物图和光谱图。(a)平面态;(b)焦锥态;(c)垂直态。

Fig. 5 Real images and spectra of chiral liquid crystals with different concentrations (mass fractions) under voltage driving.
(a) Planar state; (b) Focal conic state; (c) Homeotropic state.

的转变,反射颜色消失,器件的光学状态开始模糊,如图5(b)所示。此时,液晶层的透光性下降且光散射现象明显,呈现较低的透射率。这表明液晶分子的结构在电场作用下发生了变化,光的反射机制被破坏,使液晶层变得浑浊。随着电压进一步增加至约70 V时,CLC层的结构再次发生转变,进入垂直态,表现为透明状态,反射带消失,透光性显著提高,如图5(c)所示。这一过程表明,通过精确控制电压的大小可以在不同的电场驱动下调节CLC器件的光学特性,进而实现

液晶显示器件的色彩和透光性的精确调控。

接下来,选取手性剂浓度(质量分数)分别为2.0%、2.7%和3.0%的红、绿、蓝3种胆甾相液晶混合溶液制备PSCLC器件,并分析其光谱特性及电压驱动响应,实验结果如图6所示。在外加直流电压的作用下,器件的反射色逐渐减弱,反射带逐步消失,表现出典型的电控光学调制特性。由此可见,红色PSCLC器件的反射中心波长约为680 nm,随着电压逐渐升高,反射率缓慢降低,并在16.2 V时进入模糊的散射态。相较之

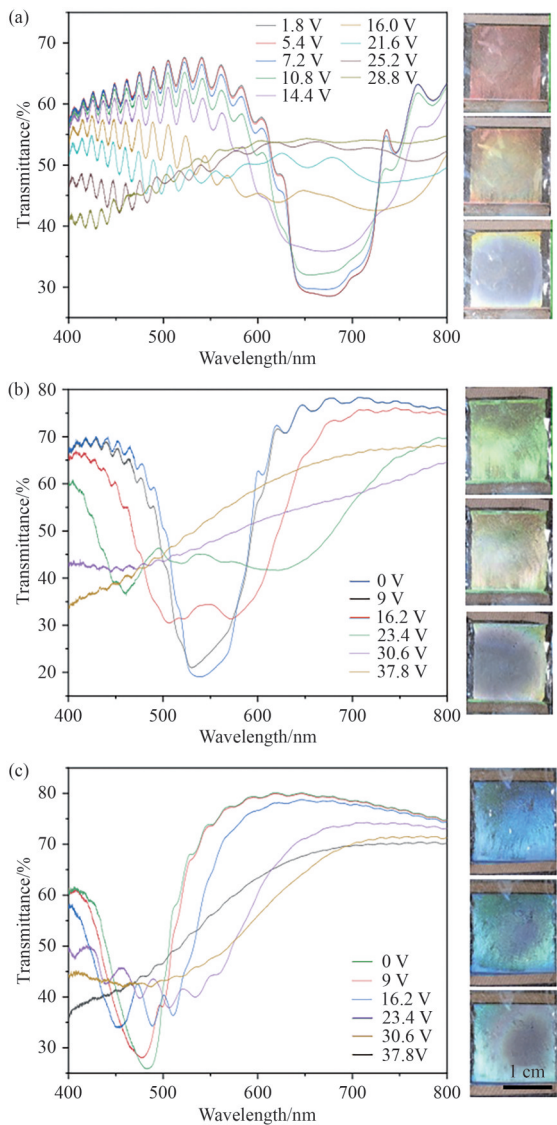


图6 不同手性剂含量(质量分数)的PSCLC在电驱动下的光谱变化。(a) 2.0%; (b) 2.7%; (c) 3.0%。
Fig. 6 Spectral changes of PSCLC with different chiral agent contents (mass fractions) under electric driving. (a) 2.0%; (b) 2.7%; (c) 3.0%.

下,绿色和蓝色PSCLC器件的反射中心波长分别位于550 nm和490 nm,其进入散射态的阈值电压则分别为23.4 V和30.6 V。实验结果表明,随着反射中心波段的蓝移,器件所需的阈值电压明显升高。这一现象可归因于胆甾相液晶的螺距变化:当螺距缩短时,单位长度内的螺旋周期数增加,导致螺旋结构更加紧密,因此需要更高的电压来破坏排列,从而实现状态转换。

3.3 PSCLC的喷墨打印特性

喷墨打印技术作为柔性电子制造的核心工

艺,其参数对变色液晶性能有显著影响,墨滴的形成受到油墨的表面张力、黏度、液滴与基板的润湿性及喷头尺寸等因素的影响^[16,19-20]。在喷墨打印过程中,首先通过特定电压波形,完成填充、成滴、断裂喷射及恢复4个阶段,通过连续波形控制实现单滴精准打印,通过控制喷墨路径、步进速度与喷射频率完成复杂图案的构建。然后将顶盖基板覆盖其上,与底基板组装成液晶盒,密封边缘并进行紫外光固化。通过紫外光照射固化液晶体系中的聚合单体,形成稳定的聚合物网络,提升器件结构稳定性。在此过程中,液晶材料的自组装动力学呈现多尺度动态演化:液滴接触基底后铺展与蒸发,溶剂挥发使液晶分子浓度升高,表面张力梯度驱动分子流动,同时基底界面作用与分子间各向异性相互作用共同调控排列,胆甾相可能形成螺旋结构;随着溶剂的进一步蒸发,液晶完成相转变,分子通过自组织形成稳定有序的微结构,期间蒸发速率、基底亲疏性及液晶浓度梯度是影响自组装动力学的关键因素。

为满足打印要求,我们优化输入电压波形和提高喷头温度,其中保持喷嘴温度60℃可有效降低油墨黏度,使其具备更好的流动性和喷射效应。在电压控制方面,初始电压从25 V慢慢降低到0 V,墨腔充分填充墨水;保持3.5 μs后,在1 μs内升高到40 V,促使压电陶瓷产生形变,使墨滴在喷嘴口形成;电压维持约10 μs,确保墨滴稳定成型,随后在2 μs内下降到25 V,墨滴喷出。图7(a)为墨滴喷射后的形态,可见喷出的墨滴形态规则、边缘清晰,无拖尾或卫星滴现象,表明所设波形具有良好的控制效果。图7(b)为偏光显微镜下观察的打印到基板表面的PSCLC阵列,固化的PSCLC墨滴均匀且直径保持在60 μm。从侧

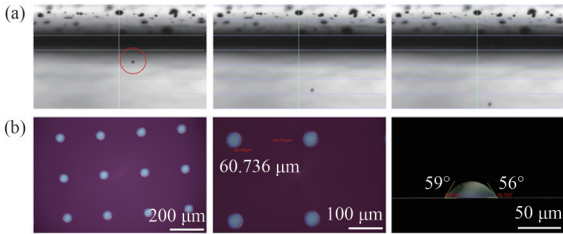


图7 喷墨打印PSCLC。(a)墨滴沉积影像;(b)分辨率和接触角。
Fig.7 Inkjet-printed PSCLC. (a) Droplet deposition images; (b) Resolution and contact angle.

面的轮廓测量液滴与基板表面的接触角,分别为 59° 和 56° ,显示出良好的对称性与附着性。这证明在控制波形和温度后,PSCLC拥有良好的打印特性,具备良好的图案化能力。

为进一步评估溶液打印后状态切换的质量,选取手性剂含量(质量分数)为3.0%的PSCLC溶液在ITO玻璃基板上进行图案化喷墨打印。经过紫外聚合后,所得图案呈现出均匀且清晰的结构,并显示出稳定的着色状态,如图8所示。施加电压至封装器件后,图案的着色迅速消失,表

现出优异的电驱动可调性,与前文所述的电场调控特性相一致。这一实验结果进一步验证了PSCLC材料在喷墨打印条件下的可加工性及其优异的响应性能。

4 结 论

本文通过调节手性剂浓度制备了不同反射波段的胆甾相液晶溶液,均表现出良好的电驱动特性,随着电压的增加可以实现着色和散射之间的切换。对于PSCLC体系,随着手性剂浓度的增加,所需要的阈值电压略微增大,这是由于纵向周期增加导致的。通过控制输出波形和喷嘴温度,该材料体系能够满足喷墨打印的要求,制备稳定且均匀的 $60\text{ }\mu\text{m}$ 直径的墨滴像素,同时实现电驱动特性。相比于传统光掩膜或模板辅助制造工艺,该方法无需复杂的制备步骤即可实现高分辨率、可调控的图案化液晶薄膜,为电控智能光学器件的设计提供了一种高效、灵活的新策略。

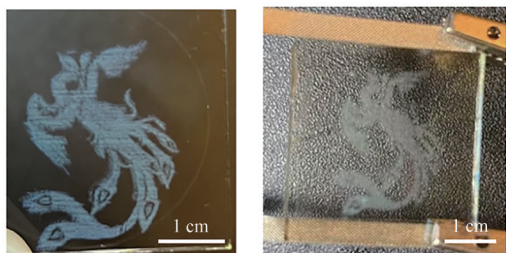


图8 打印图案通电前后对比

Fig. 8 Comparison of the printed pattern before and after applying voltage

参 考 文 献:

- [1] 吕志伟,桑景新,李唐吾,等. 用于防伪商标的液晶柔性显示薄膜[J]. 液晶与显示,2024,39(3):330-337.
LÜ Z W, SANG J X, LI T W, *et al.* Liquid crystal flexible display film suitable for anti-counterfeiting trademarks [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 330-337. (in Chinese)
- [2] BAO J Y, WANG Z Z, SHEN C, *et al.* Freestanding helical nanostructured chiro-photonic crystal film and anticounterfeiting label enabled by a cholesterol-grafted light-driven molecular motor [J]. *Small Methods*, 2022, 6(5): 2200269.
- [3] YIN K, HSIANG E L, ZOU J Y, *et al.* Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 161.
- [4] BALA I, PLANK J T, BALAMUT B, *et al.* Multi-stage and multi-colour liquid crystal reflections using a chiral triptycene photoswitchable dopant [J]. *Nature Chemistry*, 2024, 16(12): 2084-2090.
- [5] SUNG G F, WU P C, ZYRYANOV V Y, *et al.* Electrically active and thermally passive liquid-crystal device toward smart glass [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2288-2295.
- [6] WOON K L, O'NEILL M, VLACHOS P, *et al.* Highly birefringent nematic and chiral nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2005, 32(9): 1191-1194.
- [7] WANG T X, LI X S, ZHANG Y B, *et al.* Cholesteric liquid crystal network composite film with structure, dual-band responsive luminescent color for multiple anti-counterfeiting and information encryption [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(49): 68498-68505.
- [8] LEE K M, RESHETNYAK V Y, MCCONNEY M E, *et al.* Higher-order Bragg reflection colors in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(11): 2100112.
- [9] 王萌,祝伊飞. 智能窗用液晶/高分子复合材料研究进展[J]. 液晶与显示,2022,37(10):1243-1262.
WANG M, ZHU Y F. Research progress of liquid crystal/polymer composites for smart windows [J]. *Chinese*

Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(10): 1243-1262. (in Chinese)

- [10] CHEN X Y, CHEN J Y, SONG X Y, *et al.* Bioinspired mechanochromic liquid crystal materials: from fundamentals to functionalities and applications [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(50): 2403766.
- [11] LAN R C, HU X G, CHEN J Y, *et al.* Adaptive liquid crystal polymers based on dynamic bonds: from fundamentals to functionalities [J]. *Responsive Materials*, 2024, 2(1): e20230030.
- [12] YAO W H, LIU L S, ZHAO J, *et al.* Tunable phase structure of side-chain liquid crystalline polymers enabled by molecular engineering of dual mesogenic cores [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2024, 42(10): 1459-1469.
- [13] LIU L H, CHEN D F, XIE J X, *et al.* Universally applicable small-molecule co-host ink formulation for inkjet printing red, green, and blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2021, 96: 106247.
- [14] KAMAL W, ORR A C J, SYKES T C, *et al.* On-demand pitch tuning of printed chiral nematic liquid crystal droplets [J]. *Materials Today Advances*, 2023, 19: 100416.
- [15] KAMAL W, LI M M, LIN J D, *et al.* Spatially patterned polymer dispersed liquid crystals for image-integrated smart windows [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(3): 2101748.
- [16] LI M, KAMAL W, ORR A C J, *et al.* Printed polymer-stabilized chiral nematic liquid crystal privacy windows [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2022, 223(20): 2200154.
- [17] HOEKSTRA D C, VAN DER LUBBE B P A C, BUS T, *et al.* Wavelength-selective photopolymerization of hybrid acrylate-oxetane liquid crystals [J]. *Angewandte Chemie*, 2021, 133(19): 11030-11036.
- [18] 沈奕,王勇竞,王琳静,等. 延迟膜光谱分析测试系统及应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 964-968.
SHEN Y, WANG Y J, WANG L J, *et al.* Measuring and analyzing system for retardation films at different wavelengths [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 964-968. (in Chinese)
- [19] MENG F S, ZHENG C L, YANG W J, *et al.* High-resolution erasable “Live” patterns based on controllable ink diffusion on the 3D blue-phase liquid crystal networks [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(15): 2110985.
- [20] LIU Y Y, DERBY B. Experimental study of the parameters for stable drop-on-demand inkjet performance [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(3): 032004.

作者简介:



张志立,男,硕士研究生,2022年于南通大学获得学士学位,主要从事液晶变色材料的研究。E-mail: Zhangzhili49@126.com



黄艳艳,女,博士,教授,2013年于苏州大学获得博士学位,主要从事手征特异材料的电磁传输特性及光调制效应方面的研究。E-mail: yyhuang@ntu.edu.cn