文章编号:1007-2780(2026)08-1094-08

无取向的高性能液晶智能窗

谭钦月[1], 王旭鹏[1], 李　阳[1], 刘永军[1], 李登辉[2*]
(1. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院 工业和信息化部重点实验室,
黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 核生化灾害防护化学全国重点实验室, 北京 102205)

摘要:针对传统液晶智能窗材料体系及制备流程复杂的问题,本文选用负介电各向异性向列液晶作为基体,掺杂阳离子表面活性剂,在无取向处理的情况下,利用ITO导电玻璃制备电控调光智能窗。系统研究了在交流电场下,不同掺杂比例的液晶智能窗在可见光范围内的透射率变化。对比研究了无取向、平行取向和垂直取向3种液晶盒的调光效果,结果表明无取向液晶盒的调光效果优于其他两种取向结构。该类液晶智能窗依靠交变电场诱导离子湍流可以实现透明与雾态的可逆切换,在可见光光谱范围内光强透射率降低60%左右,其上升和下降响应时间分别为31.92 ms和88.01 ms。该器件无需取向处理、结构简单且易制备,为低成本建筑智能窗的产业化应用提供了新方案。

关　键　词:电控智能窗;负性向列液晶;表面活性剂;离子湍流
中图分类号:O753.2　**文献标识码**:A　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0112　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0112

Non-oriented high-performance liquid crystal smart windows

TAN Qinyue[1], WANG Xupeng[1], LI Yang[1], LIU Yongjun[1], LI Denghui[2*]

(1. *Key Laboratory of Photonic Materials and Devices Physics for Oceanic Applications*, *Ministry of Industry and Information Technology of China*, *College of Physics and Optoelectronic Engineering*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*;
2. *State Key Laboratory of Chemistry for NBC Hazards Protection*, *Beijing* 102205, *China*)

Abstract: To address the issues of complex material systems and preparation processes in traditional liquid crystal(LC) smart windows, this study employs negative dielectric anisotropy nematic LC as the base matrix, doped with a cationic surfactant, to fabricate electrically controlled dimming smart window using ITO conductive glass without any alignment treatment. We investigated the transmittance variations of LC smart windows with different doping ratios under an alternating current(AC) electric field across the visible light spectrum. A comparative study on the dimming performance of three LC cell configurations—unaligned, parallel-aligned, and homeotropically aligned (vertical), revealed that the unaligned LC cells outperform the other two alignment structures. The proposed LC smart window achieves reversible switching between transparent and hazy states

收稿日期:2026-06-22;**修订日期**:2026-07-17.
基金项目:黑龙江省自然科学基金 (No. LH2020E072)
Supported by National Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. LH2020E072)
*通信联系人,E-mail:lidenghui@mail.nankai.edu.cn

via ion turbulence induced by the alternating electric field. Within the visible light spectrum, the optical transmittance decreases by approximately 60%. The rise and decay response times are 31.92 ms and 88.01 ms, respectively. Requiring no alignment treatment, this device features a simple structure and is facile fabrication, offering a novel solution for the industrial application of low-cost smart windows in buildings.

Key words: electrically controlled smart window; negative nematic liquid crystal; surfactant; ion turbulence

1 引　　言

动态调控光型智能窗技术在建筑节能、光电子器件、交通装备等领域展现出广阔的应用前景[1-2]。液晶智能窗凭借成本低、响应速度快、调光性能优异、驱动方式灵活等突出优势，已成为研究热点，主流产品分为聚合物分散液晶(PDLC)与聚合物稳定胆甾液晶(PSCLC)两大体系[3-4]。Wu等将导电层材料与偶氮苯相混合，制备了具有良好紫外线屏蔽性能又能够提供颜色变化的PDLC[5]。Li等将紫外固化的PDLC浸渍到脱木素改性的透明木材中，制备出兼具热致变色、紫外屏蔽与隔热性能的液晶智能窗[6]。Wang等制备了功能性纳米纤维增强的PSCLC，纳米起到提升近红外屏蔽能力和增强聚合物网络结构的作用[7]。Yang等将丙烯酸酯单体引入聚合物，经紫外固化制备出了含刚性均聚物链与柔性聚合物网络的智能窗[8]。Yu等制备了两性离子修饰的聚合物分散液晶复合材料，通过在ITO玻璃或PET膜表面涂覆两性离子层后进行紫外固化，降低了智能窗的电压，兼具低能耗、高稳定性与良好柔性的特点[9]。Li等研发了融合掺杂离子的聚合物稳定液晶与电致变色层的彩色光散射器件，通过调控交流电场频率实现透明与光散射态切换[10]。Wang等人采用多辊成型工艺制备了PDLC/PSCLC双层复合薄膜智能窗[11]。除PDLC、PSCLC外，基于动态散射模式(DSM)的离子掺杂型液晶智能窗因结构简单同样受到关注，具有低电压驱动的特点且应用广泛[12-13]，DSM模式还被拓展至图案化透明显示等新型光电器件[14]。本文提出利用负性向列液晶结合阳离子表面活性剂、仅依靠低频交流电场诱导的动态散射模式的液晶智能窗。从材料配置到加工工艺简化智能窗制备流程，为液晶智能窗的产业化应用提供新方案。

由于阳离子型表面活性剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)在液晶中能够解离出自由离子，同时DTAB的长烷基链与液晶分子有良好的相容性，利用DTAB与负性液晶掺杂开展了基于离子动态散色型液晶智能窗的研究。系统研究了DTAB不同掺杂浓度与液晶取向状态对器件性能的影响。

2 实　　验

实验原料：负介电向列液晶HNG30400-200(99%，江苏和成)；十二烷基三甲基溴化铵DTAB(99%，上海科拉曼)；ITO导电玻璃；紫外封边胶；丙酮、无水乙醇(分析纯，用于基板清洗)。

材料配置：按质量分数配制3组液晶样品。样品A：95% HNG30400-200与5%DTAB混合；样品B：90% HNG30400-200与10% DTAB混合；样品C：85% HNG30400-200与15% DTAB混合。利用恒温磁力搅拌器将混合后的样品在60 ℃下搅拌3 h至DTAB完全溶解，在高于清凉点温度下将液晶通过毛细现象注入到空盒中。

液晶盒制备：ITO玻璃裁切成1.5 cm×2.0 cm，利用丙酮和去离子水超声清洗干净，氮气吹干。液晶层厚度10 μm，分3种结构封装：(1)无取向液晶盒：基板导电面无任何PI涂覆和摩擦处理，裸片对位封边，预留毛细注液口；(2)平行取向盒：基板涂平行型PI取向剂，高温固化后进行摩擦处理；(3)垂直取向盒：基板涂布垂直取向PI，固化定型。3种盒体边缘用UV胶密封，毛细法注入配置的液晶，密封注液口，侧边粘贴导电铜箔用于外接交流电源。液晶盒结构如图1所示。

样品测试：利用紫外分光光度计(日本岛津UV-2450)对液晶盒样品进行400～800 nm可见光透射谱测量，液晶盒外加50 Hz、100 Hz、500 Hz、1 kHz频率的交流电压(电压范围0～30 V，间隔5 V)。利用偏光显微镜(奥利巴斯CX31)观测不同电压下液晶微观织构形貌。

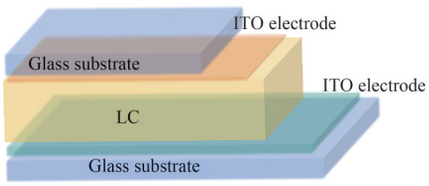


图 1 液晶盒结构图

Fig. 1 Structure diagram of liquid crystal cell

3 结果与讨论

3.1 不同浓度DTAB掺杂无取向液晶盒电光特性

为了探究DTAB掺杂负性液晶智能窗的雾态变化特性，在不同驱动频率和不同电压下，对不同DTAB掺杂浓度的液晶智能窗的透射率进行测试，测试结果如图2～图4所示。图2、图3和图4分别对应DTAB浓度（质量分数）为5%、10%和15%的样品透射谱。

从图2～图4可以看出，5%的DTAB掺杂相较于其他两个浓度，透过率总体变化较为明显，结合阳离子表面活性剂在向列相液晶中的解离与迁移规律[15]，具体分析如下：(1) 5% DTAB（样品A）：低掺杂浓度下DTAB解离充分，体系游离阳离子充足，50～500 Hz频率电场中离子迁移时间充裕，稳定生成离子湍流，随电压升高透射率持续下降。整个光谱范围内，0 V下透射率为70%左右，施加30 V电压后透过率降至10%左右，可见透过光强降低60%左右。随频率升至1 kHz，离子迁移滞后、湍流减弱，但仍保有50%以上的光强衰减，综合性能相较最优。(2) 10% DTAB（样品B）：离子浓度升高出现局部团聚，有效游离离子占比下降。低频50 Hz仍存在较弱的光强变化，在同等电压下透射降幅仅在20%左右。500 Hz及以上高频下离子难以定向移动，电光响应没有明显改进。(3) 15% DTAB（样品C）：表面活性剂过量，团聚严重，有效载流子数量锐减，全波段区间透过率曲线近乎重合，光强变化不足20%，离子湍流难以生成，器件基本失去电控调光能力。此外，从图3和图4的光谱中可以看出，部分谱线出现周期性，这是由玻璃基板表面反射产生的法布里-珀罗干涉造成的。综上分析，掺杂浓度对负性液晶的电驱动透射率调控具有显著影响。5%

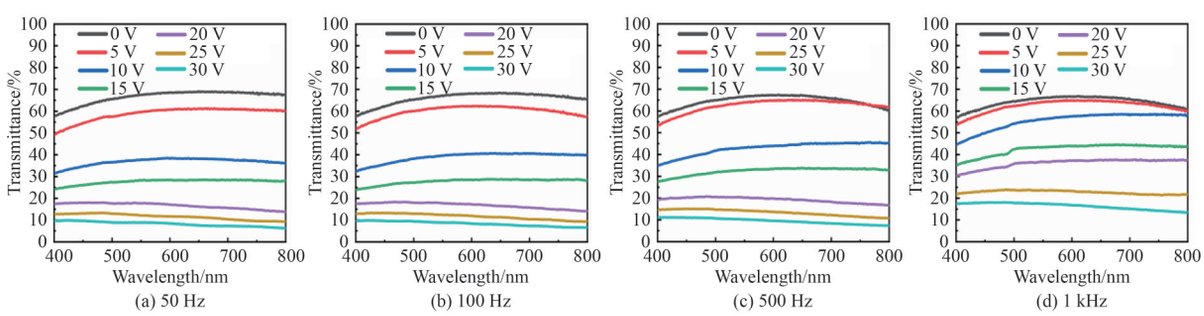


图2 掺杂5% DTAB的无取向液晶盒在不同驱动频率和电压下的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of unaligned liquid crystal cells doped with 5% DTAB under different driving frequencies and voltages

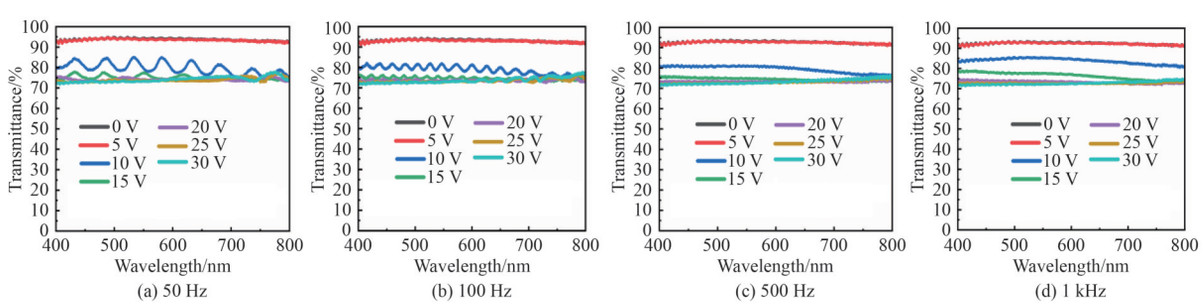


图3 掺杂10% DTAB的无取向液晶盒在不同驱动频率和电压下的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of unaligned liquid crystal cells doped with 10% DTAB under different driving frequencies and voltages

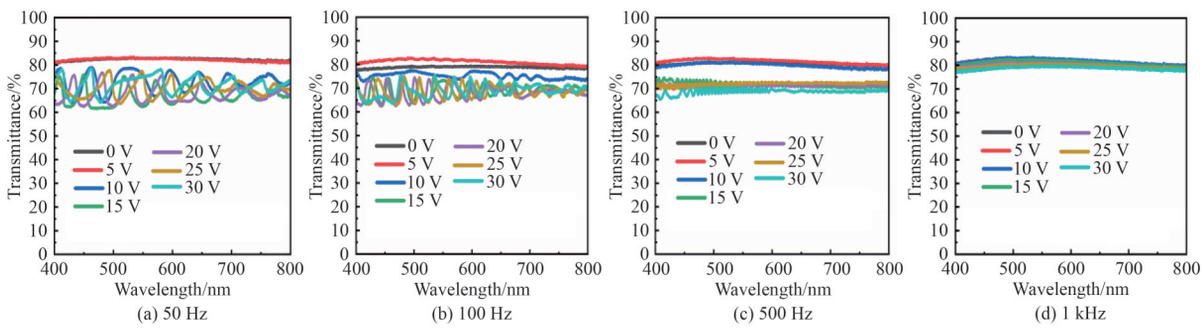


图 4　掺杂 15% DTAB 的无取向液晶盒在不同驱动频率和电压下的透射谱

Fig. 4　Transmission spectra of unaligned liquid crystal cells doped with 15% DTAB under different driving frequencies and voltages

DTAB 体系在各驱动频率下的透射率随电压变化明显，调控范围大。随着浓度提高至 10%，体系开始出现离子团聚导致离子湍流强度减弱，电压调控幅度明显下降。当浓度进一步增至 15% 时，团聚效应占据主导，透射谱几乎不随电压变化，电场调控能力基本丧失。负性液晶中掺杂 5% DTAB 并在 500 Hz 条件下驱动，可实现最优的透射率调控性能。

为了进一步验证高浓度离子掺杂液晶盒中是否发生了相分离现象，在正交偏光显微镜下进行了液晶盒的降温实验。图 5(a)和图 5(b)分别为 DTAB 掺杂浓度 10% 和 15% 的液晶盒在不同温度下的偏光显微照片，从图中可以看出，温度处于各向同性态时液晶盒显示黑态，随着温度降低出现斑驳的亮斑，说明两者出现相分离现象，这也是导致调制能力变弱的主要原因。

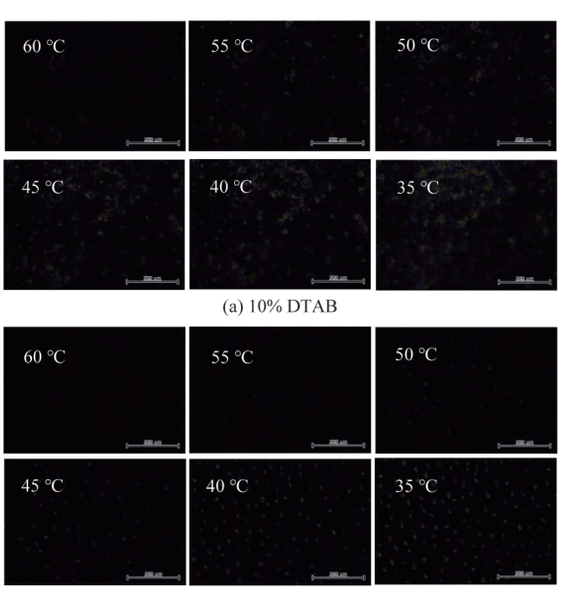


图 5　不同掺杂浓度、不同温度下液晶盒的偏光显微镜照片。

Fig. 5　Polarized optical micrographs of the liquid crystal cells at different doping concentrations and temperatures

3.2　3 种基板取向方式性能对比

为了探究液晶取向对液晶智能窗雾态特性的影响[16]，分别制备了平行取向与垂直取向的液晶盒，研究了不同驱动频率与电压下的雾态性能变化。图 6 和图 7 分别给出了掺杂 5% DTAB 的平行取向和垂直取向液晶盒的透过率随电压的变化关系。从图 6 可以看出，液晶盒透过率有一定的变化，变化范围小于 20%，同时光谱整体变化起伏较大，这同样是由法布里-珀罗干涉所致。从图 7 可以看出，整体透过率变化在 30% 左右。结合不同基板锚定作用对液晶分子排布的影响机制[17]，对比 3 类液晶盒，分析湍流对透过率变化的影响如下：(1)无取向盒：基板无锚定，对液晶分子束缚较弱，液晶初始排布杂乱，电场极易驱动阳离子形成湍流，全频段透射率变化范围最大，实现了良好的雾态变化；(2)平行取向盒：PI 摩擦诱导液晶定向排列，分子排布规整、抑制离子迁移，中压区间湍流与取向竞争导致透射曲线不规则波动，调光稳定性变差；(3)垂直取向盒：负液晶本征倾向垂直电场排布，与基板垂直锚定作用契合，电场很难打乱分子排布，离子湍流被大幅抑制，全电压透射变化小于 30%。总之，无取向液晶盒可以实现良好的雾态变化。

本体系为负性向列液晶添加阳离子表面活性剂 DTAB 的二元组份无手性剂掺杂，所以器件

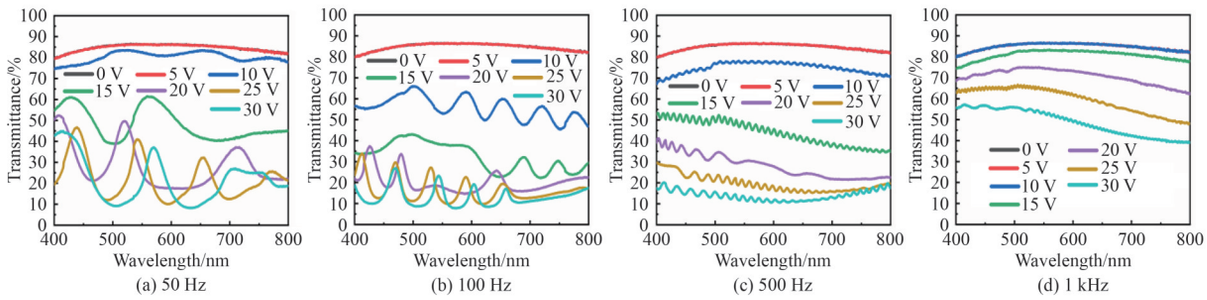


图 6 掺杂 5% DTAB 的平行取向液晶盒在不同驱动频率和电压下的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of parallel-aligned liquid crystal cells doped with 5% DTAB at different driving frequencies and voltages

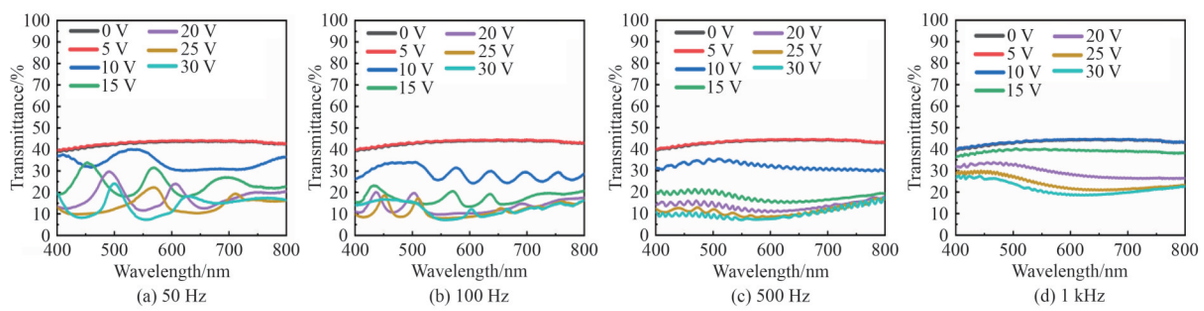


图 7 掺杂 5% DTAB 的垂直取向液晶盒在不同驱动频率和电压下的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra of vertically aligned liquid crystal cells doped with 5% DTAB under different driving frequencies and voltages

无螺旋结构和焦锥散射，光强调制源于交变电场下的离子湍流效应，这一效应在负介电各向异性液晶体系中已有相关机理研究佐证[18-19]：(1)驱动电压为 0 V 时，DTAB 解离阳离子均匀分散在液晶中，无定向运动，液晶分子无序排布，折射率均匀，由于液晶层厚仅 10 μm，因此器件透过率较高；(2)交流电场驱动使得阳离子定向迁移形成局部空间电荷，诱发离子湍流，剪切力打乱液晶排布，形成大量随机折射率微区，出现对可见光漫散射的湍流区导致器件雾化；(3)掺杂过高时离子团聚，自由离子变少，湍流无法生成，失去调光能力。

3.3 智能窗的光学性能

为了更直观地观察液晶在加电前后的微观变化，图 8 给出了电场频率为 500 Hz 时不同电压下，负性液晶掺杂 5% DTAB 的液晶盒偏光显微镜照片。从图中可以看出，在未施加电压的初始状态下，器件呈现清晰连续的层状条纹织构，表明液晶分子与离子在体系中分布均匀，未出现明显的无序扰动，此时对应高透射率的透明态。随着电压的升高，离子湍流开始出现并逐渐增强。随着电压减小，离子湍流强度逐渐减弱直至消失，宏观上表现为液晶盒的透射率能够随着电压实现可逆调节。这一现象直接证实了强电场下离子定向迁移并诱发离子湍流的现象，无序的湍流结构对可见光产生强烈散射，宏观表现为透射率大幅度降低。

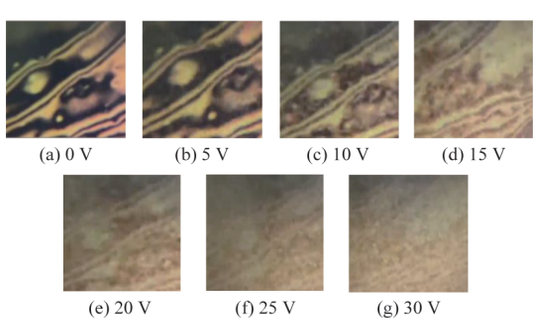


图 8 掺杂 5% DTAB 的液晶盒在不同电压下的正交偏光显微照片

Fig. 8 POM micrographs of liquid crystal cells doped with 5% DTAB under different applied voltages

图 9 给出了掺杂 5% DTAB 的无取向液晶盒在不同电压下雾态变化的实物图。从图中可以

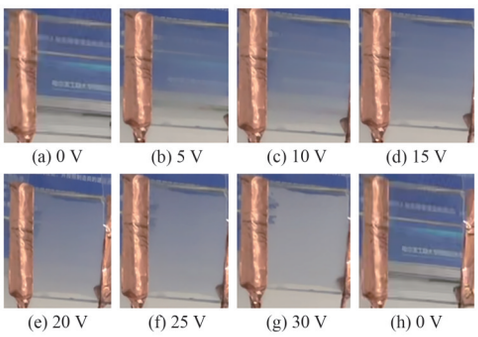


图 9　不同电压下液晶盒的雾化实物图

Fig. 9　Photographs of liquid crystal cell haze performance under different voltages

看出，10 V左右雾化即可发生，随电压增加雾化越加明显，撤除电压后液晶盒重新恢复透明态。由于负性液晶中掺杂了离子，导致液晶盒电阻率降低，在体系中存在正介电各向异性，使液晶分子顺着电场方向排列；同时，体系中还存在负介电各向异性，使液晶分子垂直电场方向排列。在适当驱动频率和电压下，液晶盒内部的指向矢出现起伏变化即形成了离子湍流，从而使液晶散射增强，导致液晶盒呈现雾态，否则呈现透明态。

为了探究器件的光学性能及响应特性，对液晶盒在不同驱动电压下的雾度变化曲线、器件的光学响应时间、电流-电压特性以及循环寿命进行了测试。图 10(a)给出了液晶盒透过率随电压的变化关系。图 10(b)为液晶盒的循环寿命测量结果，可以发现在重复测量 150 次后，雾化性能没有显著退化。图 10(c)给出了液晶盒在施加 25 V电压时的光学时间响应特性，其上升时间为 31.92 ms，下降时间为 88.01 ms。图 10(d)为液晶盒的电流随电压的变化关系，图中可以看出两者接近于线性关系，同时有微安量级的电流形成。

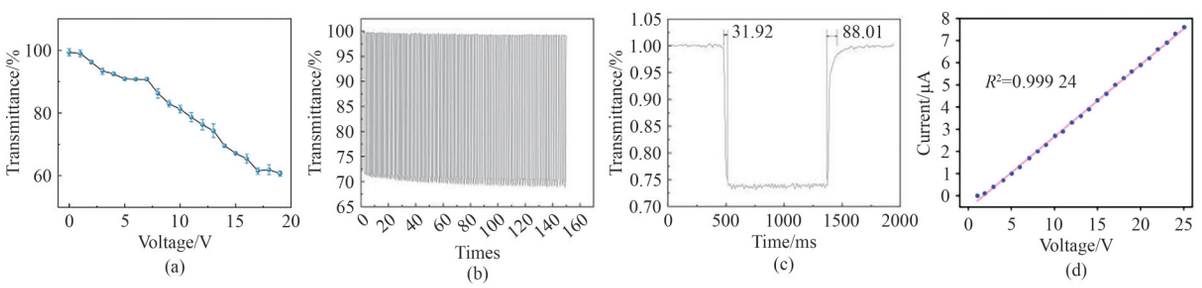


图 10　(a)液晶盒透过率随电压的变化关系；(b)液晶盒的循环寿命；(c)液晶盒的响应时间；(d)液晶盒的电流随电压的变化关系。

Fig. 10　(a) Transmittance of the liquid crystal cell as a function of voltage; (b) Cycling lifetime of the liquid crystal cell; (c) Response time of the liquid crystal cell; (d) Current of the liquid crystal cell as a function of voltage.

4　结　　论

本文利用阳离子表面活性剂DTAB掺杂负性向列液晶制备了电控液晶智能窗，研究了在不同频率和不同电压下，DTAB不同掺杂浓度与液晶取向状态对器件雾态性能的影响。研究结果表明，在无取向处理的情况下，掺杂 5% DTAB的液晶智能窗具有较好的雾态变化，可见光波段透射调控幅度大于60%。DTAB浓度大于10%后出现了相分离，导致器件雾态性能下降。器件上升响应时间为31.92 ms，下降响应时间为88.01 ms。器件循环寿命在测量150次后未发现明显强度调制的退化，可实现透明与雾态的可逆切换。该液晶智能窗设计方案简化了制备流程、降低了原料与加工成本，在建筑节能、汽车等领域具备良好的产业化应用前景。

参　考　文　献：

[1]　GRANQVIST C G. Recent progress in thermochromics and electrochromics: a brief survey [J]. *Thin Solid Films*, 2016, 614: 90-96.

[2] 赵海燕,王玲,杨槐. 智能调光技术研究进展及产业化情况分析[J]. 液晶与显示,2025,40(10):1423-1439.
ZHAO H Y, WANG L, YANG H. Research progress and industrialization analysis of smart dimming technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1423-1439. (in Chinese)

[3] OH S W, JI S M, HAN C H, *et al*. A cholesteric liquid crystal smart window with a low operating voltage [J]. *Dyes and Pigments*, 2022, 197: 109843.

[4] 张志立,王翔,黄文彬,等. 用于图案化打印的聚合物稳定液晶材料[J]. 液晶与显示,2025,40(9):1243-1250.
ZHANG Z L, WANG X, HUANG W B, *et al*. Polymer-stabilized liquid crystals for pattern inkjet printing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(9): 1243-1250. (in Chinese)

[5] WU J, LI J, HUANG J H, *et al*. A flexible colored polymer-dispersed liquid crystal smart windows with excellent near-infrared shielding performance [J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(33): 15714-15726.

[6] LI C A, AHN J G, JEONG H J, *et al*. Polymer dispersed liquid crystals-impregnated switchable thermochromic transparent woods with excellent ultraviolet blocking performance for smart windows [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(6): 393.

[7] WANG X F, LU Y F, QIU T K, *et al*. Polymer stabilized cholesteric liquid crystals enhanced by functional nanofibers loaded with CuS NPs and ATO NPs for efficient smart windows and advanced infrared camouflage/anti-counterfeiting technologies [J]. *Applied Materials Today*, 2025, 42: 102540.

[8] YANG X N, LI X S, WANG F F, *et al*. Multistable polymer-stabilized cholesteric liquid crystal smart windows enabled by EHD and dielectric effects: a thiol-acrylate polymer network modulation strategy [J]. *Optical Materials*, 2026, 174: 117996.

[9] YU P, HE Z M, ZHAO Y Z, *et al*. Zwitterion-treated liquid crystal composites for low-energy-consumption smart windows and wearable devices [J]. *Applied Materials Today*, 2023, 30: 101724.

[10] LI X S, GUO Y Q, ZHANG M S, *et al*. Colorable light-scattering device based on polymer-stabilized ion-doped cholesteric liquid crystal and an electrochromatic layer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(5): 7184-7195.

[11] WANG X F, ZHAO Y Z, LU Y F, *et al*. Multi-roll forming to prepare PDLC & PSCLC dual-layer films for energy-efficient and privacy-protecting smart windows in buildings [J]. *Applied Materials Today*, 2025, 47: 102982.

[12] ZHANG R C, SONG Z C, CAO W X, *et al*. Multispectral smart window: dynamic light modulation and electromagnetic microwave shielding [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 223.

[13] ZHANG Y, YANG X L, ZHAN Y Y, *et al*. Electroconvection in zwitterion-doped nematic liquid crystals and application as smart windows [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(3): 2001465.

[14] 刘文轩,张洋,陈家文. 基于动态散射模式的图案化透明显示器[J]. 液晶与显示,2025,40(2):337-344.
LIU W X, ZHANG Y, CHEN J W. Patterned transparent displays based on dynamic scattering mode [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(2): 337-344. (in Chinese)

[15] PAGIDI S, SRIVASTAVA A K, PANDEY N, *et al*. Reduced driving electric field of ionic salt doped nano-structured polymer dispersed liquid crystals device [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 399: 124444.

[16] 方欣宇,赵家辉,喻箫,等. 基于图案化取向的液晶面内偏振分束器[J]. 液晶与显示,2025,40(6):827-835.
FANG X Y, ZHAO J H, YU X, *et al*. In-plane polarization beam splitter based on patterned liquid crystal alignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(6): 827-835. (in Chinese)

[17] HAH H, SUNG S J, HAN M, *et al*. Effect of the shape of imprinted alignment layer on the molecular orientation of liquid crystal [J]. *Materials Science and Engineering*: C, 2007, 27(4): 798-801.

[18] KOBAYASHI F, SASAKI Y, FUJII S, *et al*. Negative viscosity of liquid crystals in the presence of turbulence: conductivity dependence, phase diagram, and self-oscillation [J]. *Physical Review E*, 2020, 101(2): 022702.

[19] 尚小虎，姜皓译，宋振鹏，等. 负性液晶电致图案化及其衍射特性[J]. 液晶与显示，2024，39(3)：312-321.
SHANG X H, JIANG H Y, SONG Z P, *et al*. Electro-patterning and diffraction properties in negative liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 312-321. (in Chinese)

作者简介：



李登辉，男，博士，副研究员，2021年于南开大学获得博士学位，主要从事光场调控、光与物质相互作用方面的研究。E-mail：lidenghui@mail.nankai.edu.cn