液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-21

液晶与电致变色的融合:材料体系、器件结构与多功能集成

李　琳[1*],刘尚杰[1],肖轶睿[1],汤玉琪[2],李　全[2]
(1.苏州科技大学 材料科学与工程学院,江苏 苏州 215009;
2.东南大学 智能材料研究院和智能科学与工程学院,江苏 无锡 214135)

摘要:电致变色技术凭借低电压、低功耗等优势,在智能窗、显示与防眩目后视镜等领域应用前景广阔。液晶兼具液体流动性与晶体各向异性,其电场响应性和光学各向异性为多维度光学调控提供了独特平台。近年来,液晶与电致变色的融合正在重塑智能调光领域的研究版图。本文围绕材料体系、器件结构与多功能集成三个层面,系统综述了液晶基电致变色智能窗与显示器件的研究进展。首先介绍电致变色器件的基本结构与性能参数;随后按液晶的两种角色展开:一是作为功能增强组分,不参与电致变色反应,仅提供光散射调控、结构色或偏振调控,与电致变色层形成电控调光与电控变色的双功能集成,并通过胆甾相液晶、纤维素纳米晶等实现色域拓展与信息加密;二是作为电致变色活性组分,液晶分子本身参与氧化还原反应,或与电解质离子形成电荷转移络合物而贡献颜色变化,包括液晶/铵盐和液晶/离子液体体系。最后对该领域的机理争议、性能瓶颈与发展方向进行了展望,以期为高性能、低成本、多功能液晶基电致变色器件的商业化应用提供参考。

关　键　词:电致变色;液晶;多功能器件
中图分类号:O753;O646　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0207　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0207

Integration of liquid crystals and electrochromism: material systems, device architectures and synergy

LI Lin[1*], LIU Shangjie[1], XIAO Yirui[1], TANG Yuqi[2], LI Quan[2]

(1. *School of Materials Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215009, *China*;
2. *Institute of Intelligent Materials and School of Intelligent Science and Engineering, Southeast University, Wuxi* 214135, *China*)

Abstract: Electrochromic technology shows broad application prospects in smart windows, displays, and anti-glare rearview mirrors owing to its low driving voltage and low power consumption. Liquid crystals (LCs), combining the fluidity of liquids with the anisotropy of crystals, provide a unique platform for

收稿日期:2026-09-28;**修订日期**:2026-10-27.
基金项目:国家自然科学基金(No. 52403242);江苏省自然科学基金(No. BK20231344);江苏省研究生科研实践创新计划(No. 26CXJH6049)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52403242); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20231344); Postgraduate Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. 26CXJH6049)
*通信联系人,E-mail:linli@usts.edu.cn

multidimensional optical modulation through their electric-field responsiveness and optical anisotropy. Recently, the integration of LCs and electrochromism is reshaping the research landscape of smart light modulation. This review focuses on the material systems, device architectures, and multifunctional integration of LC-based electrochromic smart windows and display devices. First, the basic structures and performance parameters of electrochromic devices are introduced. Then, the discussion is organized according to the two roles that LCs play in the devices: (i) as functional enhancement components, where LCs do not participate in electrochromic reactions but provide light-scattering modulation, structural color, or polarization control, enabling dual-functional integration of electrically controlled light modulation and electrochromic coloration, as well as color gamut expansion and information encryption through cholesteric LCs and cellulose nanocrystals; and (ii) as electrochromic active components, where LC themselves participate in redox reactions or form charge-transfer complexes with electrolyte ions to produce color changes, including LC/ammonium salt systems and LC/ionic liquid systems. Finally, the current mechanistic controversies, performance bottlenecks, and future development directions are discussed, aiming to provide a reference for the commercialization of high-performance, low-cost, multifunctional LC-based electrochromic devices.

Key words: liquid crystals; electrochromism; multifunctional devices

1 引　　言

随着全球能源危机加剧以及消费者对智能化、舒适化生活的追求，智能调光玻璃技术成为研究热点。电致变色(Electrochromism，EC)技术凭借其低电压、低功耗等特点，在建筑、伪装及智能穿戴等领域展现出广阔的应用前景[1-5]。1961年，J. R. Platt将某些染料在强电场作用下吸收光谱发生移位的现象定义为电致变色[6]。1969年，科学家S. K. Deb在研究三氧化钨(WO_3)薄膜时，发现其在电场作用下能在透明与蓝色之间发生可逆的颜色变化[7]，并于1973年提出了著名的“氧空位色心”变色机理[8]，拉开了EC技术发展的序幕。1984年，Claes G. Granqvist和Carl M. Lampert提出并论证了使用基于WO_3制作智能窗的概念[9,10]。

至今，电致变色的定义是指在外加电场作用下，电致变色材料因发生氧化还原反应导致光学性质(透过率、反射率等)发生可逆变化的现象。电致变色材料可分为有机与无机两大类[11]。无机WO_3是最经典的无机电致变色材料，具有变色对比度高、循环稳定性好等优点，但响应速度相对较慢(几秒至几十秒)，且对红外调控有限[12]。有机电致变色材料主要包括聚苯胺等聚合物和紫罗精等小分子[13]。有机电致变色材料的分子结构可设计性高，研究人员可以通过化学合成来调控材料的变色特性，实现从单一颜色到多色效果[14]。此外，有机材料具有较快的响应速度，可适用于汽车防眩目后视镜、高性能智能窗户等产品，但在长期化学稳定性、耐候性和抗辐射能力方面相比于无机材料仍存在差距[15]。针对这些不足，研究人员开始对传统电致变色材料进行改进，以提升其综合性能[16-18]。

近年来，液晶与电致变色两大技术体系的融合，正在重塑智能调光领域的研究版图[19,20]。液晶是一种介于固态与液态之间的物质，既具有液体的流动性，也具有晶体的各向异性，在电场、磁场或温度的作用下能够实现分子的取向重构，调控光线的偏振状态，从而调控透过率的变化[21]。液晶对光的调控特性与实现电致变色的要求高度契合[22]，因此研究人员将电致变色与液晶结合以实现多种调控功能[23,24]。在液晶与电致变色交叉融合的体系中，液晶可以扮演两种截然不同的角色：一是作为功能增强组分，不直接参与电致变色反应，而是利用其光学各向异性、电场响应性和自组装特性为器件提供独立的调光、结构色或偏振调控功能；二是作为电致变色活性组分，液晶分子本身直接参与电控显色并直接贡献颜色变化。

本文围绕液晶与电致变色的融合，从材料体

系、器件结构与多功能集成三个层面，系统综述了液晶基电致变色智能窗与显示器件的研究进展。文章首先介绍电致变色器件（Electrochromic Device，ECD）的结构与性能参数（第2节），然后按照液晶在ECD中扮演的两种角色分别展开论述：（1）液晶作为功能增强组分的器件（第3.1节），包括电控调光与电控变色的双功能集成、结构色与电致变色的协同；（2）液晶作为电致变色活性组分的器件（第3.2节），包括液晶/铵盐体系和液晶/离子液体体系。

2　电致变色器件的结构与性能参数

2.1　电致变色器件的结构

ECD是电致变色材料实现实际应用的基本工作单元。自1969年Deb开展开创性工作以来，ECD的结构设计经历了从单电极测试结构到多层集成器件的持续演进。目前，最经典且应用最广泛的ECD为五层结构，分别为导电电极、电致变色层、离子传输层（电解质层）、离子存储层和对电极（图1）。根据工作方式，ECD可分为透射型器件和反射型器件。其中，在反射式ECD中，电致变色层产生的颜色会受到离子存储层的颜色影响，导致亮度低、色度差。

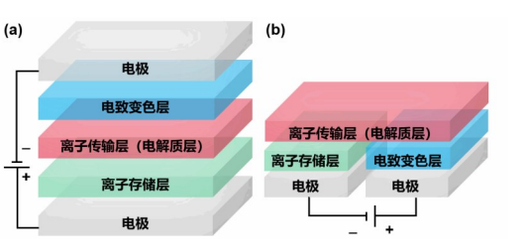


图1　电致变色器件结构：（a）层状结构与（b）横向结构。

Fig. 1　Configurations of electrochromic devices: (a) layered and (b) lateral structures.

两侧的透明导电电极负责电子与电荷的传输，常用材料包括氧化铟锡（ITO）、氟掺杂氧化锡（FTO）、银纳米线[25,26]、金属网格[27,28]、石墨烯[29]、碳纳米管[30]及其复合材料等。电致变色层是器件的核心功能层，主要包含电致变色材料，承担颜色变化与光学调制的任务[11]。离子传输层，即电解质层，负责器件内部离子的传导，必须保持良好的电化学可逆性、稳定性、容量以及与电致变色材料的兼容性。常用的电解质材料分为溶液、凝胶和固体三种，例如锂盐、铵盐、离子液体掺杂的溶液/凝胶/薄膜[31]、导电聚合物（例如聚离子液体[32]）、离子液晶[33]等。离子存储层含有能够发生可逆电化学氧化（还原）的活性材料，可以用来平衡电致变色层还原（氧化）过程中的电荷，因此要求其具有良好的电化学可逆性、稳定性、容量及与电致变色材料的兼容性。

根据器件架构，ECD可分为层状结构（图1a）与横向结构（图1b）。在层状结构中，电致变色层与一侧导电电极构成工作电极，离子存储层与另一侧导电电极构成对电极，电解质夹于两者之间。该结构适用于智能窗等常规ECD，能够提供最大的有效着色面积、优异的离子扩散和快速响应，但由于层状结构的限制，反射型显示器件中电致变色层产生的颜色会受到离子存储层颜色效应的影响，导致亮度和色度下降。当层状结构中电致变色材料与电解液可混合时，所得混合物被简单地夹在两个导电电极之间，可形成“一体化”（All-in-one）结构的ECD[34]。尽管该设计对电致变色材料与电解液的相容性有要求，但从工业化角度来看，其着色度高、制造工艺简化的优势仍极具吸引力。在横向设计中，工作电极与对电极平行排列，电解质涂覆于两电极之上。横向设计的ECD由于离子扩散路径延长，响应时间通常长于层状设计，但其离子存储层在材料种类、形状和位置上具有更宽的选择范围，从而保证了显示颜色的多样性和器件的集成性。此外，此类设计仍要求观察者透过电解质层观察，这会降低实际器件的颜色质量和反射率。

2.2　电致变色器件的性能参数

在ECD中，评价一个器件的性能通常需要从光学调制、响应速度、着色效率、循环稳定性与光学记忆等多个维度进行综合考量。这些性能指标不仅决定了器件在智能窗、显示器、防眩目后视镜等场景中的适用性，也直接反映了材料体系、器件结构与驱动方式之间的协同水平。

光学对比度（Optical Contrast），又称光学调制（Optical Modulation），是衡量电致变色材料或器件颜色切换能力的最基本参数。它定义为器件在着色态与褪色态（或不同颜色态）之间，在特定波长（通常为最大吸收波长）处的透光率差值

(ΔT)或反射率差值(ΔR)。

$$\Delta T = T_b - T_c \ , \tag{1}$$

$$\Delta R = R_b - R_c \ , \tag{2}$$

其中,T_b和T_c分别为褪色态和着色态的透射率,R_b、R_c分别为褪色态和着色态的反射率。对比度(Contrast Ratio,CR)是另一个广泛采用的指标,描述着色态与褪色态之间的颜色变化程度,常用T_b/T_c或者R_b/R_c表示。光学对比度直接决定器件在智能窗等应用中的遮光或隔热效果。差值越大表示光谱变化范围越宽,调光能力越强。对于透射型器件,典型的ΔT范围在50%-83%之间。其中,有机/聚合物体系多在50%-72%(如PEDOT:PSS体系为47.9%,紫精/普鲁士蓝器件可达71.42%)。对于反射型器件,ΔR典型值在27%-83%之间,如Fabry-Perot腔结构的ΔR低至27.67%,而Cr/Ag/WO_3体系可达83.0%。多数ECD的光学调制仍集中在30%-70%之间[11,35],其中结构色型器件的ΔT通常更小(约26%-40%)[36,37],仅少数优化体系可达90%以上[38]。除可见光波段外,基于局部配位缺陷WO_{3-x}薄膜的ECD还可实现近红外波段的原位可调减光[39],为智能窗同时调控可见光与近红外热辐射提供了途径。

响应时间(Response Time)指在加电压下器件从一种状态切换到另一种状态所需的时间,通常包含着色时间和褪色时间。一般定义为器件在特定波长处达到其最大光学调制量90%所需的时间。响应时间越短,器件切换越灵敏。该参数受限于离子在电解质和电致变色层中的迁移速率及电子传输效率。目前,高性能有机器件可做到亚秒级,而无机器件通常在数秒到数十秒之间。就液晶基体系而言,其电光(散射)响应由液晶指向矢的电场取向重构主导,通常在毫秒量级(<3 ms)[40,41];而电致变色响应取决于离子迁移与界面反应,多在1-30 s之间,其中以紫罗精为显色单元的体系可低至1-2 s[41],以液晶/铵盐电荷转移络合为显色机制的体系则普遍在3-30 s[38,42]。此外,响应速度定义为光学调制量与响应时间的比值,可在兼顾光学调制的基础上更合理地评价不同器件的响应能力。

着色效率(Coloration Efficiency)是指单位面积注入的电量所引起的光学密度(吸光度)的变化。着色效率是评价电致变色材料与器件能量效率的实用指标。着色效率较高的ECD在相同注入电荷下可获得更高的光学调制,在智能窗和显示器等应用中更具吸引力。不同材料体系的着色效率差异巨大,可从约100到超过1500 $cm^2 \cdot C^{-1}$[35]。其中,WO_3基器件通常在30-100 $cm^2 \cdot C^{-1}$[12,35],紫精与导电聚合物体系多在100-500 $cm^2 \cdot C^{-1}$[13,14];液晶基电致变色体系受显色物种在电极界面浓度与扩散的限制,着色效率多在数十至数百$cm^2 \cdot C^{-1}$(如252.6[38]与336.4 $cm^2 \cdot C^{-1}$[36]),仅少数优化体系接近聚合物水平。

循环稳定性(Cycle Stability)是评价电致变色材料与器件寿命的关键指标,表示ECD在经历一定次数着色/褪色循环后保持光学调制等性能稳定的能力。为满足实际需求,循环稳定性通常应达到10^4-10^6次循环,且性能衰减很小,这是当前电致变色材料与器件进一步发展和商业化推广的主要瓶颈。然而,目前已报道的液晶基ECD循环次数多在数十至数百次(如35次[42]、100次[36]),与上述目标相差2-3个数量级,这与其显色过程依赖液晶/电解质在电极界面的不可逆副反应直接相关。循环稳定性受多种因素影响,包括电致变色材料、对电极材料、电解质性质、施加电压及器件尺寸等。例如,为获得足够高的颜色对比度,电致变色层通常需达到数百纳米厚度,但较厚的电致变色膜与导电基底附着力较差,在循环过程中活性材料易剥落,从而显著降低循环稳定性。此外,过高的切换电压会因结构变化或化学副反应导致电致变色材料降解,使器件循环稳定性变差、寿命缩短。

光学记忆,又称双稳态(Bistability),是指在撤去外加电压后器件保持着色或褪色状态的能力,即断电后器件能否记住当前颜色而不自动恢复。通常,褪色时间长(记忆好)对节能有利,例如智能窗希望在断电后仍保持着色状态。这种非易失性行为直接决定了智能窗的静态功耗水平,是实现建筑节能目标的核心优势之一。在电致变色显示器中,光学记忆效应同样具有重要意义。由于器件可在不持续输入电功率的情况下维持其光学状态,因此特别适合低频信息刷新场景,如电子货架标签、电子纸、广告牌等,甚至可用于信息存储。对于传统电致变色体系,器件在断电后往往存在电荷泄漏,导致着色态自发褪色

(自擦除),因此双稳态设计是提升器件实用性的重要方向。从保持时间看,依赖电荷泄漏自擦除的常规体系,其着色态通常仅能维持数秒至数分钟[43, 44];而通过聚合物网络稳定焦锥态、或采用离子液体与凝胶电解质抑制离子扩散的体系,着色态可保持数小时乃至更久[45]。

3　液晶与电致变色的融合

3.1　液晶作为功能增强组分

在展开讨论之前先明确本文对液晶“角色”的划分标准。液晶与铵盐(或离子液体)共存时的显色机理存在两种表述:早期Nakamura等[44]将TBA^+与8CB在阴极产生的颜色归因于电荷转移络合物的形成,认为液晶本身并未发生氧化还原;近期的研究则依据循环伏安与核磁结果将其归因于液晶分子得失电子生成自由基离子。但两种表述目前都缺少区分性的直接证据(如自由基捕获、原位电子顺磁共振),且并不互斥:电荷转移络合物的形成本身即伴随部分电子转移,进一步得失电子便成为自由基离子,二者更可能是同一电子转移过程在不同阶段或不同测试条件下的表现。据此,本文不再以“是否发生氧化还原”为判据,也不在活性组分内部再作细分,而只以“器件的电控显色是否必须由液晶分子参与”作为唯一判据,分为二类:(1)液晶不参与电致变色,显色由外加电致变色材料执行,液晶仅提供光散射、结构色或偏振调控,归入3.1节“功能增强组分”;(2)液晶参与电控变色,即显色物种必须包含液晶分子,无论文献将其描述为电荷转移络合物还是自由基离子,均归入3.2节“活性组分”。此外,在电致变色聚合物分散液晶(Electrochromic Polymer Dispersed Liquid Crystal, ECPDLC)中,液晶微滴既承担电控散射(功能增强),又参与显色(活性组分),按显色机制将其归入3.2节。作为功能增强组分时,液晶主要扮演三类角色:(1)作为独立的光散射调控单元,与电致变色层形成电控调光+电控变色的双功能器件;(2)作为结构色单元,通过胆甾相液晶(Cholesteric Liquid Crystal,CLC)的选择性反射,与电致变色材料的吸收特性形成叠加,拓展色域;(3)作为偏振调控介质,利用液晶对偏振光的调制能力,与电致变色材料的光学各向异性耦合,实现偏振依赖的多模式显示与信息加密。

3.1.1　电控调光与电控变色的双功能集成

与3.2节中液晶直接参与电致变色反应不同,本节讨论的体系中液晶仅作为光散射调控单元,电致变色功能由额外引入的电致变色分子(如紫罗精)或电致变色层(如PEDOT:PSS)承担。液晶在无电场时随机取向、与基体折射率失配而强烈散射光,器件呈不透明态;施加交流电场后,液晶指向矢沿电场方向重排,若液晶寻常光折射率与基体折射率匹配,器件转为透明态。与此同时,在直流(DC)电场下,电致变色分子在电极界面发生氧化还原反应,使器件着色或褪色。由于交流(AC)电场驱动液晶取向与直流电场驱动电化学反应的响应机制彼此独立,器件可在不透明无色、不透明有色、透明无色、透明有色四种状态之间自由切换,实现电控调光与电控变色的双功能集成。

Nicoletta等[40]首次报道了基于可切换向列相乳液的双功能器件。他们将双酚A甘油酯二丙烯酸酯与向列相液晶TN10427按不同比例混合,并引入由乙基紫罗精二高氯酸盐、N,N-二甲基-4,4′-偶氮二苯胺和碳酸丙烯酯组成的电致变色混合物,通过快速冷却诱导相分离制备了向列相乳液。在该体系中,液晶仅承担电控光散射功能,而电致变色功能由乙基紫罗精承担。在交流电场(1 kHz,$<$1 V/μm)下,器件透光率从4%升至80%,响应上升时间小于2 ms;在直流电场(0.014 V/μm,1 s脉冲)下,乙基紫罗精在阴极被还原,器件由浅黄色变为深蓝色,着色态可稳定保持数分钟至一天。该工作首次证明,液晶的电控散射与电致变色分子的电控显色可以在同一器件中独立运行,但受限于乳液基体的低回复力,其褪色时间长达10^2–10^3 s,严重制约了实际应用。随后,Nicoletta等[41]将基体由流体单体替换为聚合物制备了ECPDLC薄膜。聚合物网络的固态特性显著增强了液滴界面的回复力,使电光响应的上升时间降至3 ms以下、衰减时间降至约2 ms,着色和褪色时间分别缩短至约2 s和1 s。器件在交流电场(1 kHz,1.5 V/μm)下透光率约从2%升至80%,在直流电场(0.03 V/μm)下透光率约约40%降至10%,实现了快速、可逆的双功能切换。聚合物基体不仅改善了电光响应速

度，还通过限制电致变色分子的扩散提高了器件的稳定性，为双功能器件的实用化奠定了基础。

Lanzo等[46]针对电致变色向列相乳液褪色时间长的问题，引入表面活性剂卵磷脂对液滴界面进行修饰。加入卵磷脂使液晶液滴的指向矢构型由双极型转变为径向型，降低了液滴间的折射率差异，从而提高了关态透光率，同时增大了阈值与饱和电压。更重要的是，径向构型增强了液滴界面的回复力，使撤去交流电场后的衰减时间从约15 min急剧缩短至约200 ms。器件在直流电场(0.02 V/μm)下由透明无色态(透光率约84%)切换为透明蓝色态(透光率约40%)，褪色时间约15 s。该工作通过界面工程在低饱和电压与快速响应之间取得了良好平衡，使电致变色向列相乳液向实用化迈出了关键一步。

Li等[45]将聚合物稳定离子掺杂胆甾相液晶(Polymer-Stabilized Ion-Doped Cholesteric Liquid Crystal，PSICLC)与PEDOT：PSS电致变色层复合，构建了一种可着色光散射器件(图2)。该器件以负性介电各向异性液晶为主体，掺杂手性剂S811、可聚合单体RM257、光引发剂IRG184和$LiClO_4$，通过光聚合形成聚合物网络稳定胆甾相。$LiClO_4$为电水动力学效应和电致变色反应提供离子。基于离子掺杂液晶的电水动力学效应和介电响应，施加低频交流电场(50 Hz，20 Vrms)使器件由透明转变为光散射态，施加高频交流电场(5000 Hz，20 Vrms)则恢复透明；基于PEDOT：PSS的电致变色特性，施加负直流电压使器件着色，施加正直流电压使其褪色。通过电场频率和方向的组合调控，器件可获得透明、光散射、着色透明、着色光散射四种工作状态，且各状态在撤去电场后无需电压维持。器件中聚合物网络含量和手性剂含量分别影响聚合物网络结构与胆甾相螺距，进而决定驱动电压和对比度，优化后的双稳态对比度达22.02，低频驱动阈值电压为7.91 Vrms、饱和电压为14.82 Vrms，高频驱动阈值电压为7.67 Vrms、饱和电压为19.15 Vrms。电致变色层厚度对器件光学性能影响显著，0.39 μm厚度样品在透明态和着色光散射态的总透光率分别为71.58%和37.72%，综合性能最优。该器件将液晶的调光功能与电致变色层的调色功能独立解耦，为智能窗和节能显示器件提供了新方案。

液晶的引入为ECD开辟了独立的透光率调控维度，使器件从单一的颜色调控拓展为透光率与颜色的双通道独立调控。从向列相乳液到聚合物分散液晶，再到表面活性剂修饰的乳液体系，以及进一步与固态电致变色层复合的聚合物稳定离子掺杂胆甾相液晶体系，研究者通过基体改性、界面工程与器件结构优化不断拓展双功能器件的材料体系与调控维度，为智能窗的隐私管理、节能调节以及多模式显示提供了可行的技术路径。

3.1.2 结构色与电致变色的协同

结构色源于光与周期性微纳结构的干涉、衍

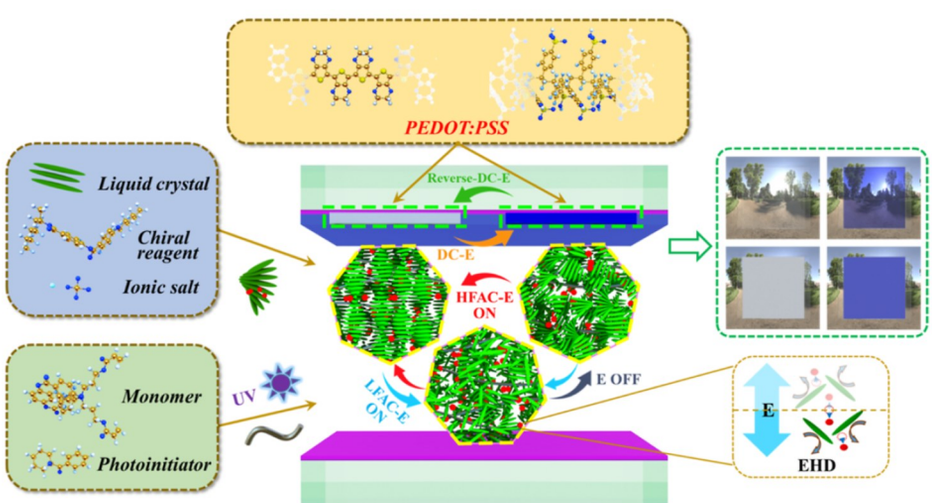


图2 PSICLC与电致变色层复合构成可着色光散射器件的原理示意图[45]

Fig. 2 Schematic illustration of a colorable light-scattering device constructed by combining PSICLC with an electrochromic layer[45]

射或散射等物理过程，具有高亮度、高饱和度、永不褪色和视角/偏振依赖性等独特优势[47]。将结构色引入ECD，可在不改变电致变色材料本征吸收特性的前提下，通过调控微纳结构的周期、折射率或取向，拓展器件的色域与色彩维度，突破传统电致变色材料颜色单一、色纯度不足的瓶颈[24, 48]。CLC具有本征的周期性螺旋结构，属于一维光子晶体[49, 50]，是ECD中引入结构色的理想功能单元。在本节讨论的体系中，液晶不参与电致变色反应，而是作为结构色单元，利用其本征的周期性螺旋结构、可自组装性和电场响应性，为ECD引入可调结构色。

CLC因其选择性反射特定波长圆偏振光的特性而备受关注。Zhao等[51]提出了一种将CLC层与紫罗精凝胶垂直堆叠的电致变色显示器（图3）。该器件为多层堆叠结构，自下而上依次为ITO玻

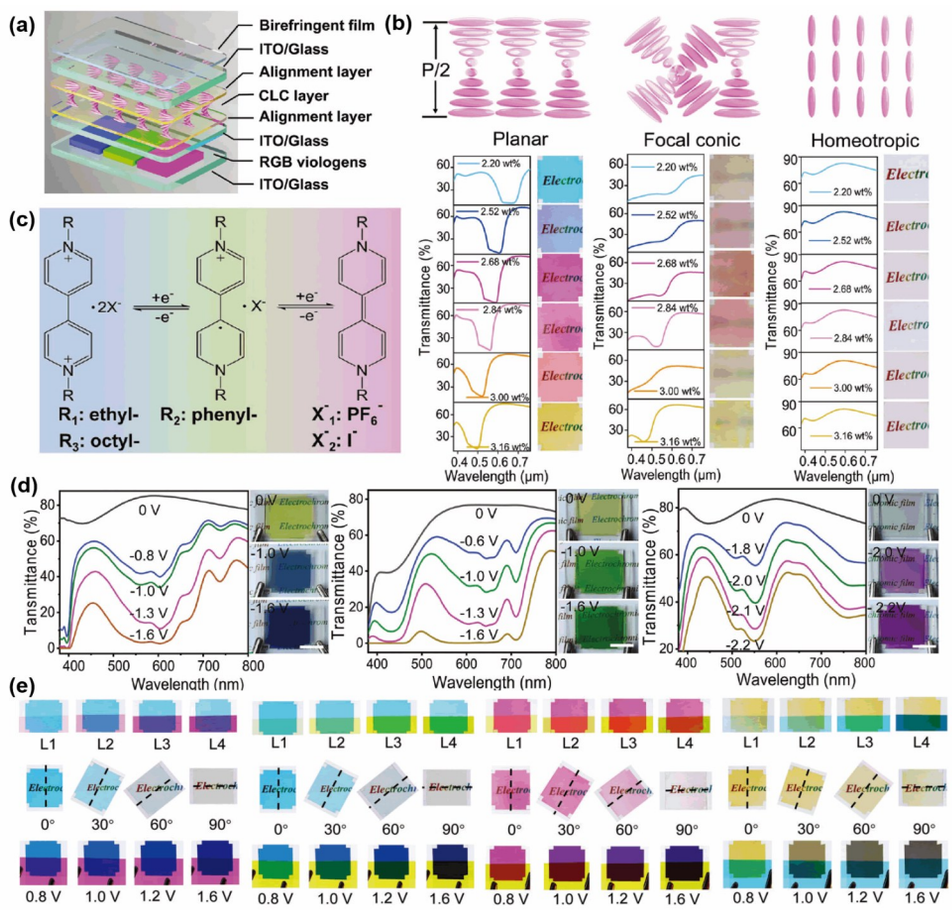


图3　集成CLC的紫精基电致变色器件的示意图与性能。(a)含功能层、取向层与导电层的器件结构；(b)棒状液晶分子的三种状态：平面态、焦锥态、垂面态及其对应的光学透过率与色彩；(c)紫精在外加偏压下于透明态与深蓝色态之间切换的化学机理；(d)不同电压下，RGB紫精基电致变色器件在可见光光谱范围内的透过率变化；(e)偏振光、旋转角度及电压对复合电致变色器件外观的影响：器件初始颜色分别为青色、品红色、黄色；背光源颜色依次为品红色、黄色、青色[51]。

Fig. 3　Schematics and characteristics of viologen based electrochromic devices integrating cholesteric liquid crystals. (a) Detailed structure of the device with functional, alignment, and conductor layers; (b) Three alignment states of rod like liquid crystal molecules: planar, focal conic and homeotropic states with their corresponding different optical transmittance and colors; (c) Chemical mechanism of viologen switching between transparent and dark blue states under bias stimuli; (d) Transmittance variation of RGB viologen based electrochromic devices under different voltages across the visible spectrum; (e) Influence of polarized light, rotation angles and voltages on the appearance of composite electrochromic devices: the initial colors of the devices are cyan, magenta and yellow, and the backlight colors are magenta, yellow and cyan, respectively[51].

璃、紫罗精凝胶层、ITO玻璃、取向层、CLC层、取向层、ITO玻璃和双折射薄膜(图3a)。CLC由向列相液晶掺杂手性剂S5011构成,改变S5011浓度(2.20 - 3.16 wt%)调控螺距,使CLC在平面态下呈青、蓝、红、粉、橙、黄等结构色(图3b);施加电压后CLC可切换至焦锥态(光散射)或垂直态(透明),且焦锥态在撤去电压后可长期保持。RGB紫罗精凝胶层分别含二辛基紫罗精(DOV(I)$_2$,红色)、二苯基紫罗精(DPV(PF_6)$_2$,绿色)和二乙基紫罗精(DEV(PF_6)$_2$,蓝色),在0.6 - 2.2 V电压下可实现透明-着色可逆切换(图3c、d)。通过施加电压、旋转器件角度和手性剂浓度,器件可实现多模式色彩调制。CLC初始色为青、红、黄时,分别与不同颜色背光叠加,再通过旋转角度(0 - 90°)调控偏振态、通过电压调控紫罗精层着色,可获得丰富的单、双和三色叠加效果(图3e)。引入10 μm厚双折射薄膜可显著增强CLC层的透射率,色域面积较未引入时扩大约5倍。该工作将CLC的高色纯度、丰富色调与紫罗精的大光学调制、低电压响应相结合,为三维彩色电致变色显示器提供了新思路。

Yu等[36]提出了一种将图案化CLC聚合物网格层嵌入黑色电致变色聚合物(ECP-Black)器件的新策略(图4a)。CLC层通过掩膜辅助光聚合制备为网格状结构,既保留了离子传输通道以确保器件导电性,又通过手性剂调控在可见光谱内实现可调结构色(图4b)。ECP-Black层通过电压调控其黑色-无色切换,为CLC结构色的显现与隐藏提供了可调背景。该结构色ECD可通过丝网印刷、喷涂和旋涂等方法简便制备,并继承了CLC的视角依赖性和圆偏振选择性,实现了电致变色与结构色的双模式显示(图4c、d)。以绿色结构色器件为例,其着色效率达336.4 $cm^2 \cdot C^{-1}$,着色和褪色时间分别为1.2 s和1.0 s,100次循环后光学调制保持96%。更重要的是,通过进一步引入图案化掩膜,器件可实现红、绿、蓝多色图案的电压调控显现与隐藏(图4e),结合视角依赖性和圆偏振依赖性(图4f、g),构建了多参数认证的高安全信息加密平台。这一策略兼顾了器件结构的简洁性和制备的便捷性,为低成本、大面积结构色增强ECD提供了可行路径。

纤维素纳米晶(Cellulose Nanocrystal,CNC)可通过蒸发诱导自组装形成具有左手螺旋结构的胆甾相,是天然光子晶体材料,其反射波长可通过螺距调控[52,53]。与CLC相比,CNC具有来源可再生、可生物降解、环境友好等优势[54],且其手性向列结构在干燥后能够稳定保留,呈现明亮的虹彩结构色,同时还具备优异的力学性能和可加工性[55]。将CNC与电致变色材料复合,可在保留结构色的同时赋予材料电致变色功能,从而构建可持续的绿色电致变色光子晶体器件。

Feng等[37]通过CNC、氧化淀粉(OS)、单宁酸(TA)与PEDOT:PSS的共组装制备了具有手性光学和电致变色双重功能的光子晶体复合涂层(图5a)。TA与OS形成的氢键交联网络赋予复合涂层优异的耐水性和耐酸性,使其能够承受浓硫酸处理以去除绝缘PSS,从而在仅含3.43 wt% PEDOT的条件下实现249.4 $S \cdot cm^{-1}$的高电导率。截面SEM图显示,PEDOT主要分布于CNC类晶团聚体之间的间隙中,并沿孤立CNC棒状结构形成导电网络(图5b)。该复合涂层在0.8至−0.6 V电压变化下,颜色从绿、黄、橙、红(PEDOT褪色态)变为深蓝色(PEDOT着色态)(图5c),在630 nm处透射率变化达40.2%(图5d)。经20000 s循环测试后,光学调制保留92.5%,表现出优异的循环稳定性(图5e)。此外,CNC的手性向列结构在电致变色过程中保持稳定,圆二色信号未发生位移,表明电致变色过程不干扰CNC的手性光学特性。

Fan等[56]通过将CNC与聚苯胺(PANI)复合,制备了具有手性向列结构的CNC-PANI薄膜(图5f)。CNC首先自组装形成左手螺旋胆甾相结构,PANI复合后不仅为CNC结构色提供了深色背景以增强色彩可见度,还赋予薄膜导电性和电致变色性能。该复合薄膜对湿度、pH和有机溶剂均表现出反射波长、结构色和电导率的多重响应,并可作为化学报警器集成到电路中。在此基础上,他们构建了基于PANI和CNC薄膜的对称ECD用于信息加密。CNC图案隐藏在电致变色层与离子导体之间,当施加1.5 V电压时,PANI层由绿色变为蓝色,隐藏的“UBC”图案在1 s内显现,且CNC图案的手性向列结构使其在左旋圆偏振片下呈现明亮虹彩、在右旋圆偏振片下消失,为防伪提供了额外维度。在3.1节讨论

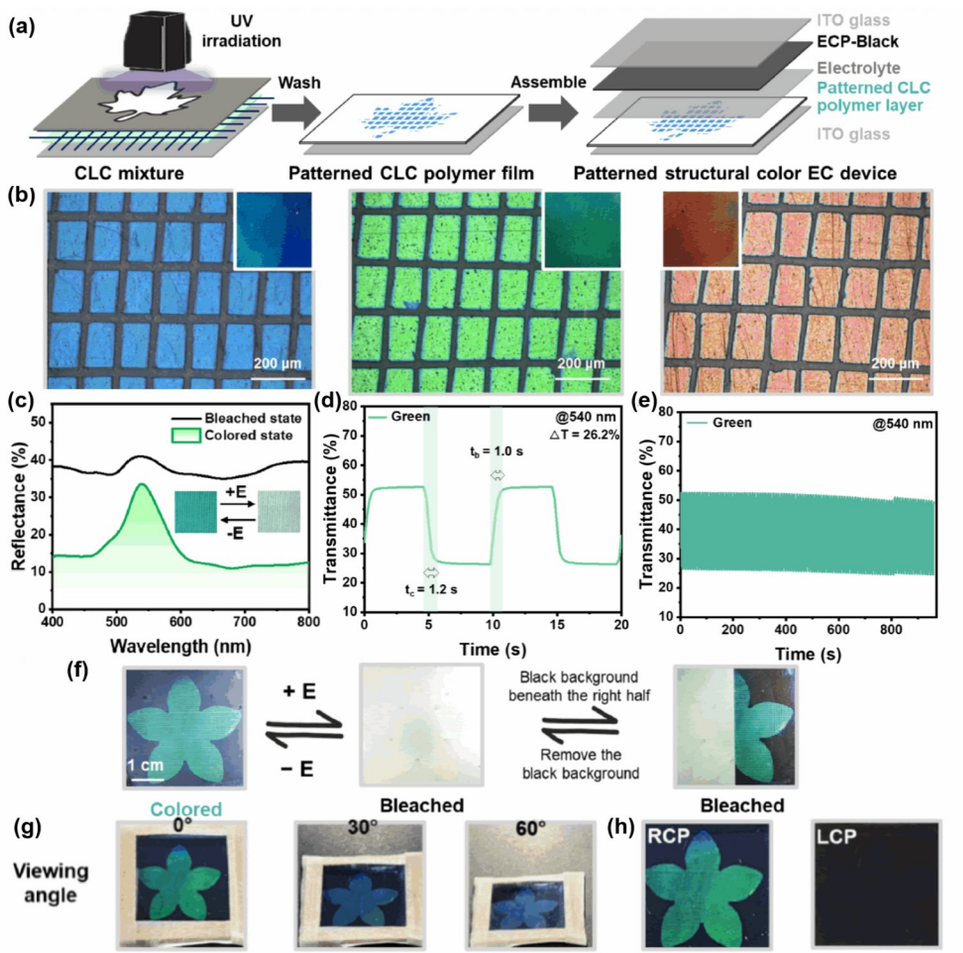


图4　基于图案化CLC聚合物网格的结构色电致变色器件:(a)制备流程示意图与结构示意图;(b)网格化CLC聚合物薄膜的偏光显微图像;(c)绿色结构色器件在着色态和褪色态的照片及反射光谱;(d)绿色结构色器件的响应时间与循环稳定性;(e)图案化结构色器件在电压调控下的多色图案显现与隐藏;(f)器件的视角依赖性;(g)器件的圆偏振依赖性[36]。

Fig. 4　Structural-color electrochromic devices based on patterned CLC polymer networks: (a) Schematic illustrations of the fabrication procedure and structure; (b) Polarized-light microscopic images of gridded CLC polymer films; (c) Photographs and reflection spectra of the green structural-color device in the colored and bleached states; (d) Response time and cycling stability of the green structural-color device; (e) Voltage-controlled revealing and hiding of multicolored patterns for the patterned structural-color device; (f) Viewing-angle dependence of the device; (g) Circular-polarization dependence of the device[36].

的体系中,液晶均不直接参与电致变色反应,而是分别以光散射调控单元和结构色单元的身份,为ECD引入独立的透光率调控通道和结构色维度,体现了液晶与电致变色在材料体系与器件结构层面的融合。前者通过液晶微滴的电场取向重构实现电控调光与电控变色的双功能集成,后者通过CLC的选择性反射、CNC的手性向列结构以及图案化液晶聚合物网格实现结构色与电致变色的协同,两者共同拓展了液晶基ECD的功能边界。然而,上述体系中液晶仅作为功能增强组分存在,电致变色功能仍需依赖紫罗精、PEDOT:PSS等电致变色材料。此外,液晶分子本身也可以直接参与电致变色反应,成为显色物种,将放在下面3.2节讨论。

3.2　液晶作为电致变色活性组分的器件

3.2.1　液晶/铵盐体系

在液晶与电致变色交叉融合的研究历程中,Nakamura等开展了一系列奠基性工作[43,57-59]。他

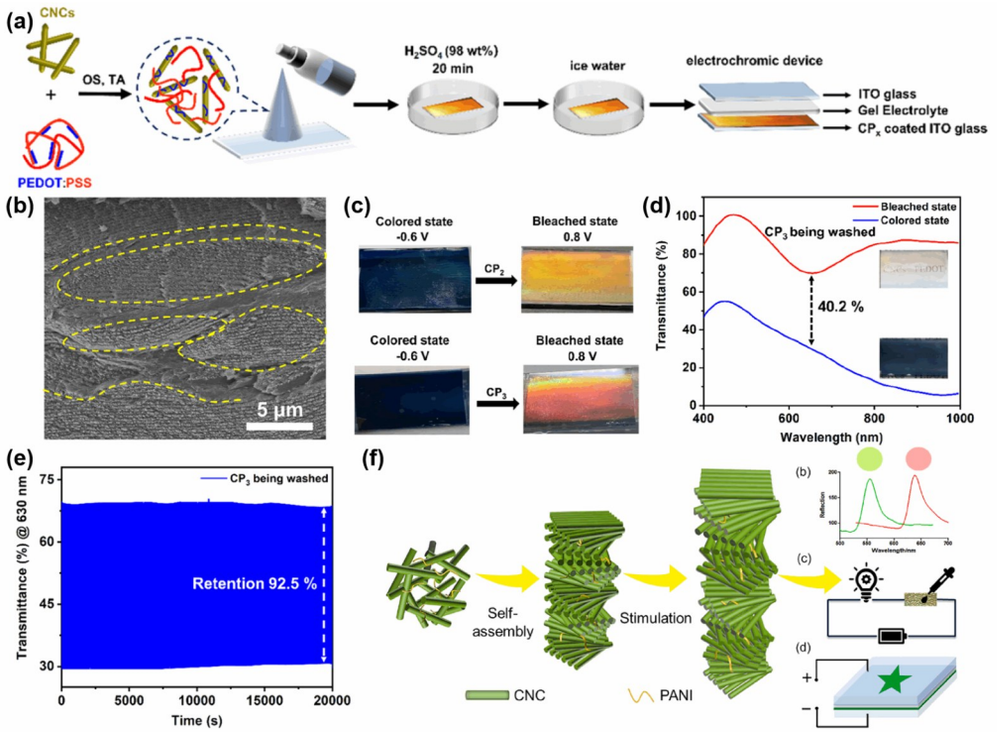


图5 基于CNC的结构色电致变色器件。(a)CNC/OS/TA/PEDOT:PSS复合涂层的制备流程与器件结构示意图;(b)复合涂层的截面SEM图像,虚线标出CNC类晶团聚体;(c)复合涂层在着色态(−0.6 V)与褪色态(0.8 V)的照片;(d)复合涂层的透射光谱,630 nm处透射率调制为40.2%;(e)复合涂层在630 nm处光学调制的循环稳定性,20 000 s后保持92.5%;(f)CNC-PANI复合薄膜的自组装制备、结构色调控与电致变色器件应用示意图[37,55]。

Fig. 5 CNC-based structural-color electrochromic devices. (a) Schematic illustration of the fabrication procedure and device structure of the CNC/OS/TA/PEDOT:PSS composite coating; (b) Cross-sectional SEM image of the composite coating, with CNC crystallite aggregates outlined by dashed lines; (c) Photographs of the composite coating in the colored (−0.6 V) and bleached (0.8 V) states; (d) Transmission spectra of the composite coating, showing a transmittance modulation of 40.2% at 630 nm; (e) Cycling stability of the optical modulation at 630 nm, retaining 92.5% after 20 000 s; (f) Schematic illustration of the self-assembly, structural-color tuning and electrochromic device application of CNC-PANI composite films[37,55].

们先后报道了液晶材料在电场诱导下的可逆变色现象,系统揭示了液晶电致变色的基本规律与动力学特征,并探索了其器件应用潜力,为后续液晶基电致变色材料与器件的发展奠定了重要的实验与理论基础。1982年,Nakamura等[43]首次报道了液晶材料的电致变色现象。研究发现,在液晶材料(如4-正辛基-4′-氰基联苯,8CB)中溶解少量电解质(如四正丁基碘化铵,TBAI),施加直流电流或低频交流电压时会发生可逆的颜色变化:着色首先在阴极产生,随后逐渐向阳极扩展,撤去电压后颜色逐渐褪去。该变色现象不仅在液晶相(向列相、近晶相和胆甾相)中发生,在各向同性相中同样可以观察到。这一发现首次将液晶的有序性与电致变色功能结合于同一材料体系,开启了液晶电致变色研究的新方向。该工作明确提出,液晶材料本身并不显色,只有在电解质存在时才会发生电化学诱导的着色,且正离子(如TBA^+)在着色过程中起关键作用。他们据此提出了一个初步的机理模型:在阴极,TBA^+与8CB分子发生还原反应,生成电荷转移络合物(TBA^+8CB),从而产生颜色;在阳极则生成碘分子,碘分子扩散至着色区域后与着色物种反应,使颜色褪去。然而,该模型缺乏对液晶氧化还原态的直接光谱表征。

Cupelli等[60]报道了一种基于电解质-液晶分散体的双功能聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal,PDLC)器件。该器件通过将季铵盐电解质溶液(如四丁基四氟硼酸铵/碳

酸丙烯酯）与向列相液晶（E7、E49等）及聚合物基体（如PMMA）混合，经热致相分离制备获得电致变色聚合物分散液晶ECPDLC器件，液晶以微米级液滴形式分散于聚合物网络中。该器件首次在不引入导电低聚物或紫罗精等额外电致变色分子的前提下，仅依靠电解质与液晶本身实现了电光与电致变色的独立双重调控：在交流电场下，液晶液滴取向重构使器件在几毫秒内由不透明散射态切换为透明态；在直流电场下，铵根离子与液晶分子在阴极形成有色电荷转移络合物，使器件在几秒内由无色变为有色，从而获得不透明无色、不透明有色、透明无色、透明有色四种可独立切换的光学状态。该工作中，液晶同时充当电光调控介质和显色分子，铵盐同时充当显色物种和电导增强剂，显著简化了双功能器件的制备工艺，为液晶基多功能调光与显示器件的一体化设计提供了新思路。

Xian等[61]报道了一种采用光聚合诱导相分离法制备的ECPDLC器件（图6）。将液晶4-氰基-4'-戊基联苯（5CB）、丙烯酸酯单体混合物（IBOMA/HPMA/CHMA/HDDA）、光引发剂（TPO）与电解质双十二烷基二甲基溴化铵（DDAB）混合，经紫外光固化30 min，获得含液晶微滴的聚合物网络，并通过正交实验优化出丙烯酸酯与5CB质量比42.9%、DDAB与5CB质量比25.0%、盒厚10 μm的最佳制备参数。

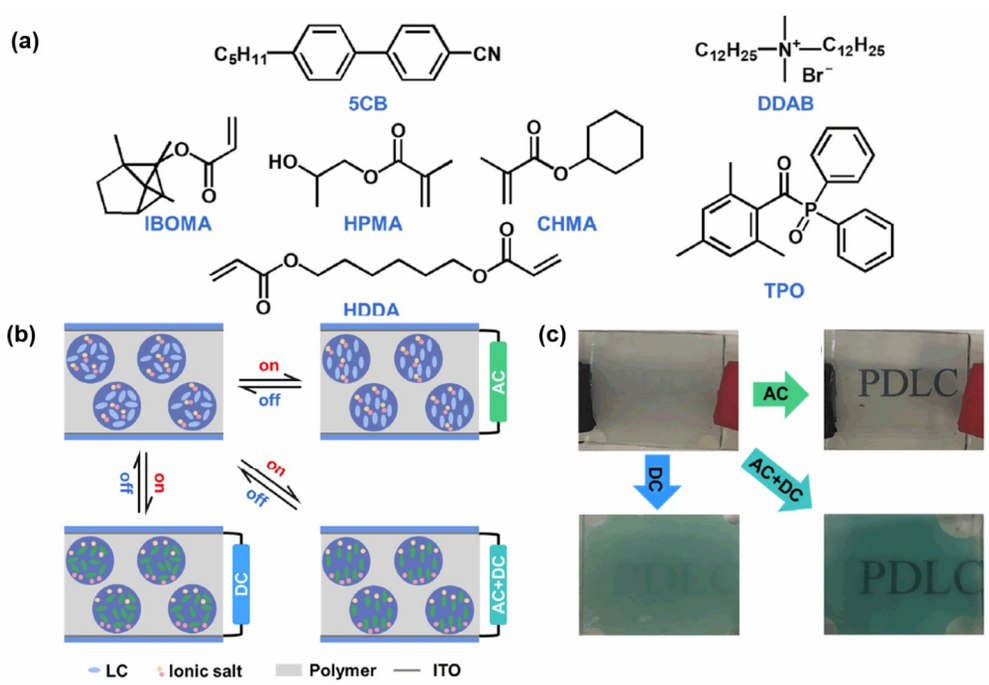


图6　双响应电致变色聚合物分散液晶的(a)材料、(b)工作原理和(c)四种工作状态照片：无色不透明、绿色不透明、无色透明、绿色透明[61]。

Fig. 6　(a) Materials and (b) working principle of a dual-responsive electrochromic polymer dispersed liquid crystal and (c) photographs of four working states: colorless and opaque; green and opaque; colorless and transparent; green and transparent[61].

An等[38]报道了一种可以实现高透明态与深黑色态可逆变换的液晶基电致变色智能窗（图7）。5CB液晶与20 wt% 四丁基溴化铵（TBAB）的混合物注入20 μm厚、垂直取向的液晶盒中制备，通过^{1}H NMR和循环伏安法证实5CB在氧化过程中芳香环电子密度重排并生成有色络合物。在5 V驱动电压下，实现了466 nm处92.4%的透光率调制、70.7%的透射率差以及252.6 $cm^2 \cdot C^{-1}$的高着色效率，着色与褪色时间分别为3.9 s和14 s。该工作突破了以往液晶基ECD仅能实现红、绿等单一颜色且透射率差有限的瓶颈，首次在液晶体系中实现了从高透明态到深黑色态的完全切换，且不依赖光散射即可实现无雾度遮蔽，在隐私调控、节能与热管理

方面均优于传统的宾主液晶和聚合物网络液晶体系。An等对该体系变色机理的归属与Nakamura等[43]的早期报道存在明显分歧。Nakamura等将TBA^+与8CB在阴极形成的显色物种描述为液晶被还原后与阳离子络合的产物($TBA^+\cdot 8CB^-$);而An等则通过^1H NMR观察到氧化后5CB芳香区质子信号向低场移动,将其归因于芳香环电子密度降低、共振结构改变,即5CB在氧化过程中失去电子,TBA^+作为稳定抗衡离子、Br^-作为电荷载体参与电荷平衡。然而,该"氧化"归属仍缺乏直接证明5CB自由基阳离子存在的谱学证据,原文亦承认低场位移"并不意味着存在持久自由基物种"。结合近期关于铵根阳离子在阴极具有电化学活性、可与液晶分子发生耦合电子转移的讨论[42, 43, 61],An等观察到的NMR低场位移更可能反映的是5CB与氧化态卤素物种或还原态铵根物种之间电荷转移相互作用导致的电子密度重分布,而非5CB本身的直接电氧化。这一机理分歧表明,液晶/铵盐体系的显色本质,究竟是液晶的氧化、还原,还是铵根-液晶电荷转移络合物的形成,仍有待进一步厘清。

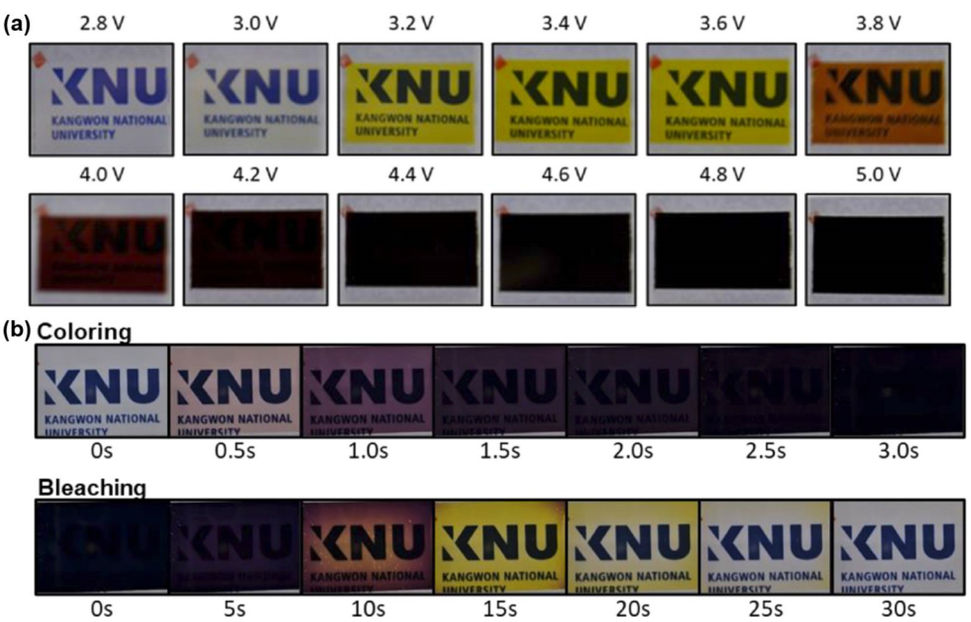


图7 (a)2.8~5 V下光学图像展示颜色转变过程;(b)时间分辨光学图像记录器件在透明与不透明状态间的动态转变[38]。

Fig. 7 (a) Sequential optical images captured from 2.8 to 5 V demonstrate the gradual color transition; (b) Time-resolved optical images show the dynamic switching of the device between transparent and opaque states[38].

Ma等[62]报道了首个基于印刷ECPDLC的图像集成智能窗(图8)。器件以向列相液晶E7、含TBAI的离子液体和聚合物单体NOA65为墨水,通过压电驱动按需滴落(Drop-on-Demand, DoD)喷墨打印技术在ITO玻璃上精准沉积液晶液滴,经组装和UV固化后形成可同时调控透光率与颜色的ECPDLC像素阵列。该器件在低频直流偏压(约3 V)下通过TBAI与E7的氧化还原反应实现可逆着色,在高频交流电压下通过液晶取向与聚合物折射率匹配实现光散射调控,从而获得透明无色、透明有色、不透明无色、不透明有色四种独立可调状态。并成功打印出牛津大学Keble学院徽标等图案,分辨率约42 DPI,单个液滴的开启响应时间可短至约0.01 s。该工作的创新在于首次将DoD喷墨打印与ECPDLC体系结合,建立了可同时控制透光率和颜色的可打印墨水设计框架,通过优化打印参数和液滴尺寸显著抑制了"死区"并实现了高分辨率图案化,为下一代多功能智能窗和可定制显示技术提供了可扩展的制造路径。

Yang等[42]报道的ECPDLC器件以BHR40110混合液晶和四丁基溴化铵(TBAB)为主要组分,通过引入丙烯酸酯单体(TMHA/HPMA)经光聚合诱导相分离,并结合激光刻蚀技术对ITO

电极进行图案化加工。在直流电场下，TBAB解离出的TBA^+向阴极迁移，并与液晶中二苯乙炔类、氰基联苯类基团的苯环发生还原反应，随电压从0升至15 V依次形成黄色和绿色络合物，实现白→黄→绿的多色可逆切换，着色响应时间最短约16 s，循环35次后仍保持稳定；在交流电场下通过液晶微滴取向实现透明-不透明的散射调控，二者结合可获得六种可切换光学状态。该工作利用混合液晶多组分显色的叠加效应拓展了色域和变色电压区间（可达10 V），并通过激光刻蚀与分区刻蚀技术构建了透明图案显示、双面图案切换及基于编码表与解密规则的324种组合的多维防伪模式，为ECPDLC在彩色显示与高级防伪领域的应用提供了新方案。尽管铵盐体系率先揭示了液晶电致变色的基本规律，并在器件简化方面展现出独特优势，但其局限也随着研究深入逐渐显现。一方面，季铵盐在液晶中的溶解度有限，浓度过高时易析出，导致着色均匀性和循环稳定性下降；另一方面，铵盐电解质的电化学窗口较窄，在高电压下易发生分解，限制了变色电压区间的进一步拓展。此外，以碘化物为代表的铵盐在氧化过程中会在阳极生成卤素分子，这些卤素分子虽可扩散至阴极使着色态褪去，但其自身也参与不可逆副反应，长期循环后容易造成器件性能衰减。

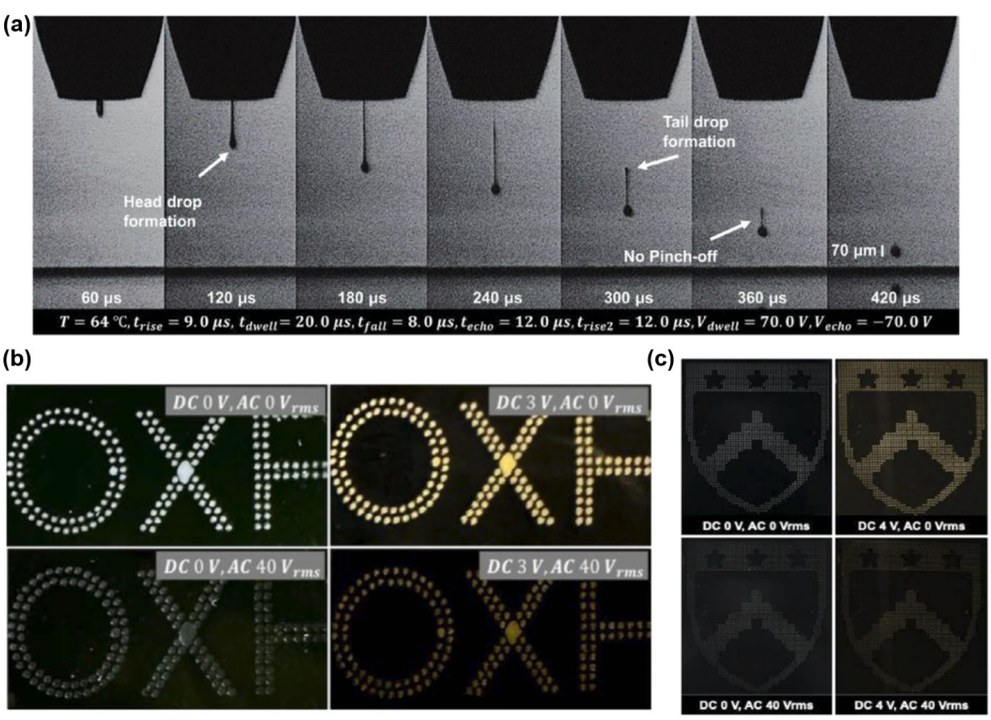


图8　(a)打印ECPDLC墨水时采集的阴影图像。墨水从直径80 μm的喷嘴喷出；(b)打印制备的ECPDLC器件，显示缩写字符“OXF”；(c)最终器件的工作演示：采用ECPDLC液滴进行打印制备，显示牛津大学基布尔学院校徽[62]。

Fig. 8　(a) Shadowgraphy images captured during printing of ECPDLC ink. The ink is ejected from a nozzle with an 80 μm diameter; (b) The printed ECPDLC device displaying the abbreviation "OXF"; (c) Operation demonstration of the final device: the Keble College, University of Oxford logo is printed using ECPDLC droplets[62].

3.2.2　液晶/离子液体体系

离子液体（Ionic Liquid，IL）具有极低的挥发性、宽电化学窗口、高离子电导率和良好的热稳定性，既能作为电解质提供离子传输通道，又能通过阳离子与阴离子的结构设计调控其与液晶的相容性和电化学行为，已在电化学领域得到广泛应用[63]。在ECD中引入离子液体电解质，有助于缩短切换时间、提高循环性和长期稳定性[64]。

He等[65]报道了一种由液晶与离子液体组成的红色ECPDLC器件。他们以含二苯乙炔衍生物1-乙氧基-4-[2-(4-戊基苯基)乙炔基]苯（PEB）

为电致变色组分，以阴/阳离子可设计的离子液体为电解质，考察其对ECPDLC电光性能的调控作用。PEB在中性态下几乎无色，在电场作用下在阳极失去一个电子生成强着色的自由基阳离子(图9a)。该氧化态物种在电极表面富集并产生可见光吸收，从而使器件呈现红色；当施加反向电压或撤去电压时，氧化态物种被还原回中性态，颜色随之褪去。系统筛选了一系列含$[NTf_2]^-$、$[BF_4]^-$、$[PF_6]^-$、$[OTf]^-$、$[TFA]^-$等阴离子及咪唑、哌啶、季铵等阳离子的离子液体，发现含$[NTf_2]^-$阴离子的离子液体具有足够宽的电化学稳定窗口(大于3 V)，PEB-[Bmim][NTf_2]在2.5 V下获得了47.6%的最大透射率调制，兼具较低工作电压与较高光学对比度(图9b)。进一步将原位生成的Pd纳米颗粒引入[Bmim][NTf_2]电解质后，着色电位降至2.4 V，同时保持了约45.0%的透射率差。最后，以含二苯乙炔衍生物的商用混合液晶SLC1717与[Bmim][NTf_2]构筑ECPDLC器件，获得了不透明无色、不透明红色、透明无色、透明红色四种可独立调控的光学状态(图9c)。该工作不仅验证了离子液体作为液晶电致变色电解质的可行性，还通过离子液体结构筛选与纳米颗粒功能化，为后续液晶/离子液体电致变色体系的性能优化提供了重要参考。

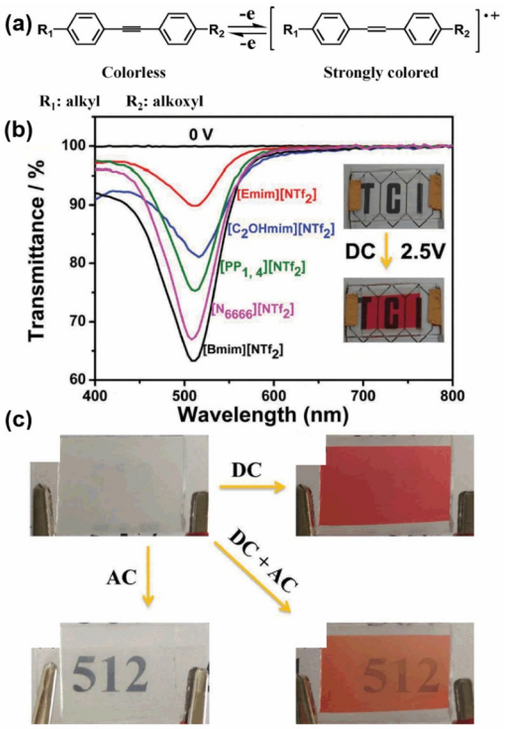


图9 (a)取代二苯乙炔衍生物的电致变色机理；(b)PEB-离子液体在2.5 V直流电压下的透射光谱，插图为对应的器件照片；(c)不同电压下，灯箱上拍摄的ECPDLC器件四种状态照片：不透明无色(直流0 V，交流0 V)、不透明着色(直流3 V，交流0 V)、透明无色(直流0 V，交流70 V，100 Hz)、透明着色(直流3 V，交流70 V，100 Hz)[65]。

Fig. 9 (a) Electrochromic mechanism of substituted diphenylacetylene species; (b) Transmittance spectrum of PEB-ionic liquid at 2.5 V DC, with the inset showing the optical photograph of the device at this voltage; (c) Photographs showing four states of an ECPDLC cell taken on a light box at different applied voltages: opaque and uncolored (0 V DC, 0 V AC), opaque and colored (3 V DC, 0 V AC), transparent and uncolored (0 V DC, 70 V AC, 100 Hz), and transparent and colored (3 V DC, 70 V AC, 100 Hz)[65].

在上述工作基础上，He等[66]将离子液体[Bmim][NTf_2]作为支持电解质掺入PDLC体系获得双功能绿色ECPDLC。该器件在交流电场下液晶微滴取向重构实现不透明-透明的透光率调控，在直流电场下5CB与离子液体发生氧化还原反应生成绿色络合物实现无色-绿色的着色调控，从而获得不透明无色、不透明绿色、透明无色、透明绿色四种可独立切换的状态(图10a-c)。Baratta等[67]进一步提出了反向模式ECPDLC的概念。他们以负性介电各向异性的向列相液晶EN-40与离子液体[Bmim][Tf_2N]构成氧化还原对，以1,4-亚苯基双[4-(6-丙烯酰氧基己氧基)苯甲酸酯]为单体，通过聚合诱导相分离制备反向ECPDLC。该器件的初始态为透明无色，在交流电场下液晶取向垂直于电场方向而变为不透明无色，在直流电场下EN-40被氧化并与$[Bmim]^+$形成粉红色络合物，从而获得透明无色、不透明无色、透明粉色、不透明粉色四种状态(图10d，e)。与正向模式PDLC相比，反向模式器件在断电时保持透明，从安全和节能角度更适合车载与建筑窗应用。

Yu等[68]将离子液体掺杂ECPDLC的调控维度拓展至温度，构建了电、热双响应的多功能智能窗。该器件以5CB、离子液体[Bmim][Tf_2N]

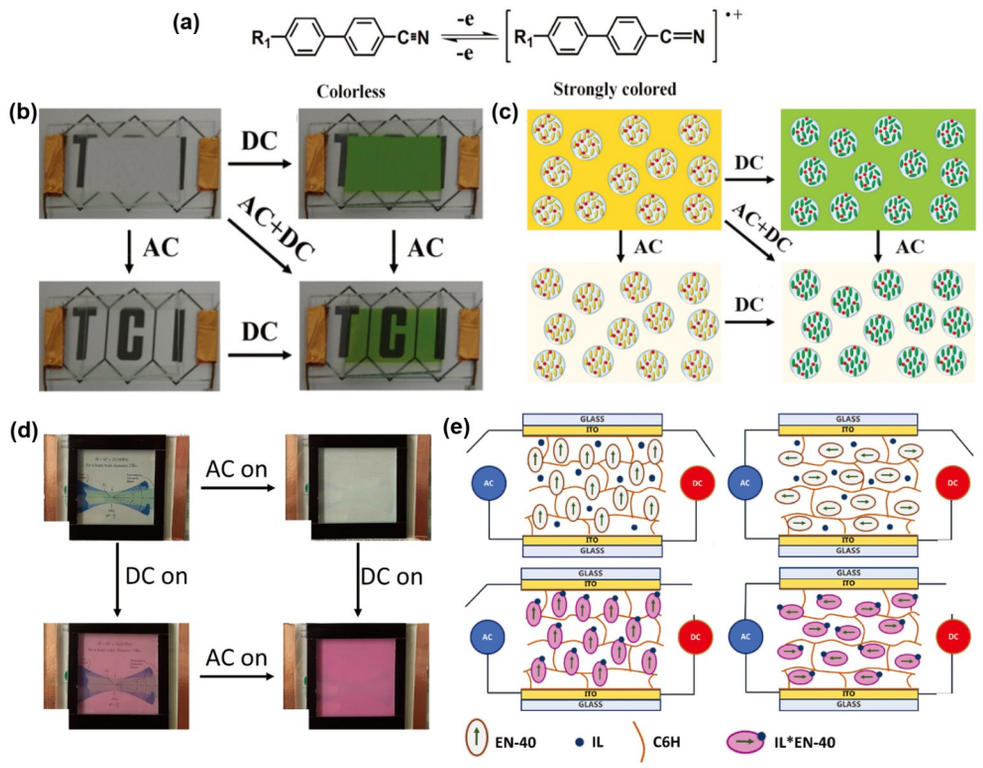


图10　氰基烷基联苯类物质的(a)电致变色机理。ECPDLC的(b)四种工作状态照片：不透明无色状态(无电场)、不透明着色状态(5 V直流电压)、透明无色状态(45 V交流电压)、透明着色状态(同时或分步施加45 V交流电压与5 V直流电压)及(c)器件工作机理。反向模式ECPDLC的(d)四种工作状态照片：透明无色状态(交流、直流电场均关闭)；不透明无色状态(交流电场开启，直流电场关闭)；透明着色状态(交流电场关闭，直流电场开启)；不透明着色状态(交流、直流电场均开启)及(e)器件工作机理[66,67]。

Fig. 10　(a) Electrically color-changing mechanism of cyano-alkyl-biphenyl derivatives; (b) Photographs of the electrically switchable color-changing ECPDLC under different applied voltages: opaque and uncolored state without an electric field, opaque and colored state under 5 V DC, transparent and uncolored state under 45 V AC, transparent and colored state under simultaneous or step-by-step application of 45 V AC and 5 V DC; (c) Schematic diagram of the working process of the ECPDLC device[66,67].

和丙烯酸酯单体为原料，通过光聚合诱导相分离制备，兼具三种调控模式：交流电场(70 V)驱动液晶取向实现不透明-透明切换，温度驱动5CB在清亮点(约35 ℃)附近发生各向异性-各向同性相变实现热致调光，直流电场(4.0 V)驱动5CB与离子液体氧化还原反应实现无色-绿色切换。该工作将电致变色与热致调光、电致散射调控集成于同一液晶/聚合物复合材料中，且发现着色态在温度变化时仍可保持，为多功能智能窗的集成化设计提供了新的思路。

Wu等[44]针对ECPDLC颜色单一的不足，将离子液体与绿色颜料三氧化二铬(Cr_2O_3)共同引入，制备了可用于自适应伪装的可变色PDLC薄膜。该器件以E7液晶、NOA65聚合物、离子液体和Cr_2O_3为原料，混合后注入液晶盒并经光固化制备。研究发现，离子液体与液晶在直流电场下发生氧化还原反应使薄膜由无色变为黄色，而Cr_2O_3本身提供绿色背景，二者叠加使薄膜可在绿色与黄色之间可逆切换。通过调节离子液体与Cr_2O_3的比例，可进一步实现白色-黄色及绿色-黄色之间的可逆转变，工作电压5 V，着色与褪色时间分别为30 s和14 s。该工作通过离子液体与无机颜料的协同作用突破了ECPDLC单一颜色的限制，并将其应用场景从智能窗拓展至可见光自适应伪装。Zhang等[69]将离子液体掺杂与聚合物稳定胆甾相液晶(Polymer Stabilized Cholesteric Liquid Crystal, PSCLC)的宽带反射特性相结合，制备了兼具红外反射与电致变色的双功能薄

膜。该薄膜通过聚合诱导螺距梯度法制备，具有约1000 nm的宽带红外反射能力；掺入离子液体[Bmim][Tf_2N]后，薄膜在直流电场(3.6 V)下由无色变为有色，且其宽带反射性能未被破坏。在模拟房屋实验中，以该薄膜为窗口的模型房在模拟太阳光照射下的饱和温度仅为27.8 ℃，明显低于对照样品的30.4 ℃，证明了其在建筑热管理中的节能效果。该工作将电致变色功能与宽带红外反射功能集成于同一PSCLC薄膜中，在不牺牲红外调控能力的前提下赋予薄膜低压电致变色性能，为电致变色节能智能窗的制备提供了新途径。

综上，3.2节讨论的体系中液晶分子本身直接参与电致变色反应，成为显色物种，这与3.1节中液晶仅作为功能增强组分的角色形成鲜明对比，共同构成了液晶与电致变色融合的完整材料体系。在液晶/铵盐体系中，液晶与铵根阳离子在阴极形成电荷转移络合物而显色，虽机理尚有争议，但材料来源广泛、成本极低；在液晶/离子液体体系中，液晶在阳极被氧化生成自由基阳离子，或与离子液体形成有色络合物，离子液体的可设计性为调控变色电位、色域和循环稳定性提供了更多自由度。上述工作逐步将液晶电致变色体系从单一的颜色调控拓展为兼具透光率调控、热致调光、红外反射与多色显示的多功能集成平台，为液晶基电致变色智能窗与显示器件的发展提供了丰富的材料与器件设计策略。

4 结论与展望

本文从材料体系、器件结构与多功能集成三个层面，系统综述了液晶基电致变色智能窗与显示器件的研究进展。按液晶在器件中的角色，可将现有体系分为两类：作为功能增强组分时，液晶不参与电致变色反应，仅提供调光、结构色或偏振调控；作为活性组分时，液晶分子参与显色并直接贡献颜色变化。

作为功能增强组分，液晶微滴的电场取向重构为器件引入了独立的透光率调控通道，与电致变色显色相互解耦，形成了AC调控透光/散射、DC调控颜色/透明度的双通道范式；经基体改性与界面工程，其响应速度与稳定性持续提升。结构色进一步拓展了色彩维度：CLC的选择性反射赋予器件高色纯度和多模式色彩调制，CNC提供了可持续的手性光子晶体平台，图案化液晶聚合物网格则实现了结构色与电致变色的简便集成与多参数信息加密。

作为活性组分，液晶/铵盐体系利用铵根阳离子与液晶在阴极形成的电荷转移络合物实现显色，原料广、成本低，但响应和循环寿命有限，显色机理(液晶的氧化/还原抑或络合物的形成)仍有争议；液晶/离子液体体系则利用离子液体的宽电化学窗口和高离子电导率，将调控维度拓展至热致调光、红外反射与自适应伪装。离子液体替代传统有机溶剂和卤素盐显著提升了环境友好性，生物质材料与喷墨打印等工艺展示了与现有卷对卷产线兼容的工业化路径。

表1汇总了16个代表性体系的差异。“功能增强”路线以毫秒级电光响应和额外调控维度见长，但显色仍依赖外加材料，结构色体系ΔT偏小；“活性组分”路线结构简单、驱动电压低(3–5 V)，但显色物种归属未定，响应多在数秒以上、循环多在数十至数百次。这种“响应—调制—寿

表1 液晶基电致变色体系的角色定位、显色机制与典型性能对比

Tab. 1 Roles, coloration mechanisms and typical performance comparison of liquid crystal-based electrochromic systems

文献	体系	液晶角色	显色/调光机制	光学调制	响应时间	着色效率 $cm^2 \cdot C^{-1}$	循环稳定性	优势与局限
[40]	向列相乳液	功能增强	液晶电控散射＋紫罗精还原	4%–80%(交流)	＜2 ms(电光)；褪色 10^2–10^3 s	—	未报道	双通道独立；褪色极慢
[41]	ECPDLC薄膜	功能增强	聚合物网络增强液滴回复力	交流2%–80%；直流40%→10%	电光＜3 ms/2 ms；着色2 s/褪色1 s	—	未报道	双通道独立、响应快、稳定性提升
[46]	卵磷脂修饰乳液	功能增强	界面修饰，液滴转为径向构型	直流84%→40%	衰减200 ms；褪色15 s	—	未报道	低饱和电压；快速松弛

续表

文献	体系	液晶角色	显色/调光机制	光学调制	响应时间	着色效率 $cm^2 \cdot C^{-1}$	循环稳定性	优势与局限
[45]	PSICLC/PEDOT:PSS	功能增强	离子掺杂液晶电水动力学＋电致变色层	71.6%/37.7%	电光毫秒级(7.9–19.2 Vrms)	—	双稳态、断电保持	四态、频率可调；驱动电压高
[51]	CLC＋紫罗精凝胶	功能增强	选择性反射＋紫罗精	色域扩大约5倍	着色3.4–4.8 s；褪色2.8–99 s	91.0–216.9	1000次无明显衰减	色纯度高；褪色时间分散宽
[36]	图案化CLC/ECP-Black	功能增强	结构色＋黑色电致变色背景	26.2%@540 nm	1.2 s/1.0 s	336.4	100次保持96%	可丝印、可加密；ΔT偏小
[37]	CNC复合涂层	功能增强	手性向列结构＋PEDOT:PSS	40.2%@630 nm	—	—	2×10^4 s保持92.5%	可再生；响应未优化
[43]	8CB/TBAI	活性	阴极电荷转移络合物	85%→10%(向列相)	着色数秒；漂白5–10 s	—	循环后取向劣化	首例报道；机理未定
[38]	5CB/TBAB	活性	液晶氧化(存在争议)	92.4%@466 nm	3.9 s/14 s	252.6	30次稳定	高透明↔深黑；机理争议
[42]	BHR40110/TBAB	活性	多组分络合，白→黄→绿	多色，≤15 V	≥16 s	—	35次稳定	多色、324种编码；响应慢
[62]	E7/TBAI印刷	活性	TBAI与E7氧化还原	调制0→70%	液滴开启0.01 s	—	>50次(着色)	42 DPI图案化；均匀性待解
[65]	PEB/离子液体	活性	PEB氧化为自由基阳离子	47.6%@2.7 V	—	—	—	低压、离子液体可设计；单色
[66]	5CB/离子液体	活性	液晶/离子液体氧化还原(绿)	83%(10 wt% IL)	着色5 s/褪色20 s	—	—	双功能；色域窄
[67]	反向模式ECPDLC	活性	EN－40氧化＋$[Bmim]^+$络合	CR 113.1	交流<2 ms；直流着色<1 min	—	—	断电透明；漂白5–8 min
[68]	电-热双响应	活性	液晶/离子液体氧化还原＋清亮点相变	交流0.5%→90%	—	—	—	三模式集成；交流70 V
[69]	离子液体-PSCLC	活性	宽带红外反射＋电致变色	红外带宽约1000 nm	着色1.5 min/褪色9 min	—	—	热管理；褪色慢

注："—"表示原文献未报道；表中数据均取自正文所引文献，各文献的测试波长、电压波形与器件面积不同，仅供定性比较。

命"的取舍，正是其难以同时满足智能窗与显示需求的原因。

尽管已取得上述进展，液晶与电致变色的融合仍面临三方面制约：其一，显色机理尚不统一，液晶/铵盐体系的显色物种究竟是液晶的氧化/还原态，还是铵根—液晶电荷转移络合物，仍缺乏原位光谱电化学与电子顺磁共振等直接证据[38,43]；其二，性能难以兼顾，液晶的引入提升了响应速度与调控维度，却使光学调制多停留在30%–70%、循环次数多在数十至数百次，距智能窗的实用要求($\Delta T>50\%$、10^4–10^6次循环)仍有2–3个数量级的差距[36,38,42]；其三，多功能集成时散射、结构色、红外反射与电致变色相互制约，往往需要更高的驱动电压[45,68]。

针对上述问题，未来可从三方面推进：材料上，设计本征可氧化还原的液晶分子与低黏度、宽电化学窗口的功能化离子液体，兼顾色域与循环寿命；器件上，发展反向模式、双频驱动与图案化电极，降低交流驱动电压并抑制功能串扰；方法与工艺上，借助原位表征厘清显色机理，结合机器学习等数据驱动手段加速材料与结构优化[70]，并推进喷墨打印、卷对卷等大面积制备工艺，以支撑智能窗、多色显示与防伪加密等应用。

参 考 文 献：

[1] GRANQVIST C G, ARVIZU M A, BAYRAK PEHLIVAN İ, *et al*. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review [J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 259: 1170-82.

[2] WU S, SUN H, DUAN M, *et al*. Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(5): 101370.

[3] CANNAVALE A, AYR U, FIORITO F, *et al*. Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort [J]. *Energies*, 2020, 13(6): 1449.

[4] FU H, ZHANG L, DONG Y, *et al*. Recent advances in electrochromic materials and devices for camouflage applications [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2023, 7(12): 2337-58.

[5] DU Z, WANG S, GU C, *et al*. Recent advances in photo- or electro-chromic smart windows and their thermal regulation [J]. *Responsive Materials*, 2025, 3(2): e20250007.

[6] PLATT J R. Electrochromism, a possible change of color producible in dyes by an electric field [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1961, 34(3): 862-3.

[7] DEB S K. A novel electrophotographic system [J]. *Applied Optics*, 1969, 8(S1): 192-5.

[8] DEB S K. Optical and photoelectric properties and colour centres in thin films of tungsten oxide [J]. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 1973, 27(4): 801-22.

[9] SVENSSON J S E M, GRANQVIST C G. Electrochromic tungsten oxide films for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Materials*, 1984, 11(1): 29-34.

[10] LAMPERT C M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Materials*, 1984, 11(1): 1-27.

[11] RAI V, SINGH R S, BLACKWOOD D J, *et al*. A review on recent advances in electrochromic devices: a material approach [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(8): 2000082.

[12] MEHMOOD A, LONG X, HAIDRY A A, *et al*. Trends in sputter deposited tungsten oxide structures for electrochromic applications: A review [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(15): 23295-313.

[13] JAMDEGNI M, KAUR A. Review—polymeric/small organic molecules-based electrochromic devices: how far toward realization [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2022, 169(3): 030541.

[14] BEAUJUGE P M, REYNOLDS J R. Color control in π-conjugated organic polymers for use in electrochromic devices [J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(1): 268-320.

[15] CELIESIUTE R, RAMANAVICIENE A, GICEVICIUS M, *et al*. Electrochromic sensors based on conducting polymers, metal oxides, and coordination complexes [J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2019, 49(3): 195-208.

[16] WANG Y, SUN X, LIU Q, *et al*. Functional gel materials for next-generation electrochromic devices and applications [J]. *Chemical Society Reviews*, 2025, 54(7): 3475-512.

[17] YANG G, ZHANG Y-M, CAI Y, *et al*. Advances in nanomaterials for electrochromic devices [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(23): 8687-720.

[18] YU X, GUO P, CHEN J, *et al*. Recent advances in multifunctional electrochromic devices [J]. *Responsive Materials*, 2024, 2(2): e20240013.

[19] 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): 1423-39.
ZHAO H, WANG L, YANG H. Research progress and industrialization analysis of smart light modulation technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1423-1439.

[20] WANG L, LI Q. Photochromism into nanosystems: towards lighting up the future nanoworld [J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(3): 1044-97.

[21] BISOYI H K, LI Q. Liquid crystals: versatile self-organized smart soft materials [J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(5): 4887-926.

[22] SHEN W, LI G. Recent progress in liquid crystal-based smart windows: materials, structures, and design [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(1): 2200207.

[23] WANG Z, WANG X, CONG S, *et al*. Fusing electrochromic technology with other advanced technologies: A new roadmap for future development [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2020, 140: 100524.

[24] LI L, YU Z, YE C, *et al*. Structural color boosted electrochromic devices: strategies and applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 334(12): 2311845.

[25] ZHANG H, SUN F, CAO G, *et al*. Bifunctional flexible electrochromic energy storage devices based on silver nanowire flexible transparent electrodes [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(1): 015503.

[26] LIN S, BAI X, WANG H, *et al*. Roll-to-roll production of transparent silver-nanofiber-network electrodes for flexible electrochromic smart windows [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(41): 1703238.

[27] LI T, LI S, LI X, *et al*. A leaf vein-like hierarchical silver grids transparent electrode towards high-performance flexible electrochromic smart windows [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 225-32.

[28] LI H, ZHANG W, ELEZZABI A Y. Transparent zinc-mesh electrodes for solar-charging electrochromic windows [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(43): 2003574.

[29] XU Y, LIU J. Graphene as transparent electrodes: Fabrication and new emerging applications [J]. *Small*, 2016, 12(11): 1400-19.

[30] VARGHESE HANSEN R, YANG J, ZHENG L. Flexible electrochromic materials based on CNT/PDA hybrids [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 258: 21-35.

[31] XU L, ZHANG L, LIU D, *et al*. A comprehensive review of the functionalized integrated application of gel polymer electrolytes in electrochromic devices [J]. *Nano—Micro Letters*, 2026, 18(1): 106.

[32] YANG B, YANG G, ZHANG Y-M, *et al*. Recent advances in poly(ionic liquid)s for electrochromic devices [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(14): 4730-41.

[33] LIU K, VARGHESE J, GERASIMOV J Y, *et al*. Controlling the volatility of the written optical state in electrochromic DNA liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 11476.

[34] ZHENG R, WANG Y, PAN J, *et al*. Toward easy-to-assemble, large-area smart windows: all-in-one cross-linked electrochromic material and device [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(24): 27526-36.

[35] GU C, JIA A-B, ZHANG Y-M, *et al*. Emerging electrochromic materials and devices for future displays [J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(18): 14679-721.

[36] YU Z, WANG J, LI L, *et al*. Cholesteric liquid crystal polymer grids enabling facile fabrication of structural color-enhanced electrochromic devices for advanced security encryption with multi-mode display effects [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521: 166731.

[37] FENG K, LU M, WEI G, *et al*. Cellulose nanocrystals/poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) photonic crystal composites with electrochromic properties for smart windows, displays, and anticounterfeiting/encryption applications [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(8): 10848-59.

[38] AN C-H, S-YEOM, LEE J-H, *et al*. Highly transparent to deep black electrochromic smart windows based on liquid crystals [J]. *Dyes and Pigments*, 2025, 242: 112928.

[39] 马岩, 臧浩良, 有心, 等. 基于局部配位缺陷 WO_{3-x} 薄膜的电致变色原位可调谐近红外减光片 [J]. 发光学报, 2025, 46(9): 1684-93.

MA Y, ZANG H, YOU X, *et al*. Electrochromic in-situ tunable near-infrared light attenuator based on localized coordination-defective WO_{3-x} films[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(09): 1684-1693.

[40] NICOLETTA F P, CUPELLI D, DE FILPO G, *et al*. Electrochromism in switchable nematic emulsions [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(21): 4260-2.

[41] NICOLETTA F P, CHIDICHIMO G, CUPELLI D, *et al*. Electrochromic polymer-dispersed liquid-crystal film: A new bifunctional device [J]. *Advanced Functional Materials*, 2005, 15(6): 995-9.

[42] YANG D, LU Y, CHEN X, *et al*. A dual-response multicolor electrochromic polymer dispersed liquid crystal for display and anti-counterfeiting applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 513: 162833.

[43] NAKAMURA K, KANEKO S, ITO Y, *et al*. Electrochemically induced coloration of liquid crystal materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(3): 1792-6.

[44] WU W, SUN X, ZHAO X, *et al*. Electrically tunable coloration in polymer dispersed liquid crystal films for adaptive camouflage [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, 13(19): 9693-704.

[45] LI X, GUO Y, ZHANG M, *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): 7184-95.

[46] LANZO J, DE BENEDITTIS M, DE SIMONE B C, *et al*. Improvement of response times in electrochromic switchable nematic emulsions [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(16): 3349-51.

[47] KINOSHITA S, YOSHIOKA S, MIYAZAKI J. Physics of structural colors [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2008, 71(7): 076401.

[48] CHEN J, SONG G, CONG S, *et al*. Resonant-cavity-enhanced electrochromic materials and devices [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(47): 2300179.

[49] JI B, QIN L, YU Y-L. Dynamic structural colors in helical superstructures: from supramolecules to polymers [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2025, 43(3): 406-28.

[50] WANG J, SONG Z-P, LI Y-X, *et al*. Robust shape-memory chiral photonic elastomers with multi-stimuli responsiveness [J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(32): e73257.

[51] ZHAO S, CHEN L, HUANG W, *et al*. Transparent multicolor electrochromic displays with ingenious hues adjustment by integrating cholesteric liquid crystal with viologen gel [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(19): 2300503.

[52] HABIBI Y, LUCIA L A, ROJAS O J. Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(6): 3479-500.

[53] LIU J, QING Y-M, WU J-J, *et al*. Responsive cellulose nanocrystal-based liquid crystals: From structural color manipulation to applications [J]. *Responsive Materials*, 2025, 3(3): e70020.

[54] AROCKIASAMY F S, MANOHARAN B, SANTHI V M, *et al*. Navigating the nano-world future: Harnessing cellulose nanocrystals from green sources for sustainable innovation [J]. *Heliyon*, 2025, 11(1): e41188.

[55] GOYAL M, SHI C, HASSANPOUR M, *et al*. Exploring chiral photonic cellulose nanocrystal composites: From self-assembly to advanced applications [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2026, 347: 103688.

[56] FAN J, XU M, XU Y-T, *et al*. A visible multi-response electrochemical sensor based on cellulose nanocrystals [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457: 141175.

[57] NAKAMURA K, NAKADA K, ITO Y, *et al*. Electrochromic characteristics of liquid-crystal materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(1): 135-40.

[58] NAKAMURA K, ODA Y, SUGIMOTO M. A novel laser‐addressed smectic liquid-crystal light valve [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(2): 593-5.

[59] NAKAMURA K, ODA Y, SEKIKAWA T, *et al*. Electrochromic characteristics of organic materials with a simple molecular structure [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1987, 26(6R): 931.

[60] CUPELLI D, DE FILPO G, CHIDICHIMO G, *et al*. The electro-optical and electrochromic properties of electrolyte-liquid crystal dispersions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(2): 024515.

[61] XIAN H, LI L, DING Y, *et al*. Preparation and orthogonal analysis for dual-responsive electrochromic polymer dispersed liquid crystal devices [J]. *Polymers*, 2023, 15(8): 1860.

[62] MA J-S, KAMAL W, PRADEEP A, *et al*. Advanced image-integrated smart windows using printed electrochromic polymer-dispersed liquid crystal droplets [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(31): e01586.

[63] ARMAND M, ENDRES F, MACFARLANE D R, *et al*. Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(8): 621-9.

[64] POH W C, L-SEH A, WU W, *et al*. Rapidly photocurable solid-state poly(ionic liquid) ionogels for thermally robust and flexible electrochromic devices [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(51): 2206952.

[65] HE Z, YUAN X, ZHAO Y, *et al*. A greener electrochromic liquid crystal based on ionic liquid electrolytes [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(8): 1110-9.

[66] HE Z, YU P, MA H, *et al*. Dynamically color-changing polymer-dispersed liquid crystals containing ionic liquid for

smart window applications [J]. *Liquid Crystals*, 2023, 50(2): 270-7.

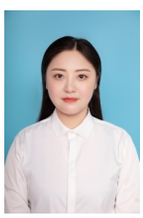
[67] BARATTA M, NEZHDANOV A, MASHIN A I, *et al*. Electrochromic reverse-mode PDLCs as smart windows [J]. *Liquid Crystals*, 2023, 50(13-14): 2295-305.

[68] YU P, LIU J, ZHANG W, *et al*. Ionic liquid-doped liquid crystal/polymer composite for multifunctional smart windows [J]. *Dyes and Pigments*, 2023, 208: 110817.

[69] ZHANG H, LIU J, ZHAO X, *et al*. Electrically induced coloration of polymer-stabilized cholesteric liquid crystal films with broadband reflection capability for smart windows [J]. *Dyes and Pigments*, 2022, 203: 110316.

[70] ZHOU Z, CHEN C, LI B, *et al*. Machine learning-assisted highly efficient thermal management in function-oriented thermochromic smart windows [J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 277.

作者简介:



李　琳,女,博士,副教授,2017年于肯特州立大学获得博士学位,主要从事液晶功能材料与器件的研究。E-mail:linli@usts.edu.cn