

文章编号: 1007-2780(2025)10-1423-17

智能调光技术研究进展及产业化情况分析

赵海燕^{1,2}, 王玲^{3*}, 杨槐^{1*}

(1. 北京大学材料科学与工程学院, 北京 100871;

2. 北京科技职业大学, 北京 100176;

3. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘要:在当前能源效率优化与光调控智能化需求不断提升的背景下, 开发具有高响应速度、低能耗特性且易量产集成的智能调光技术至关重要。近年来, 基于电致变色、响应性液晶及纳米材料调控的创新调光技术快速发展。通过将动态响应基元与光学基板复合, 构建出可主动调节光线透过率的智能材料体系。该技术突破了传统静态遮光局限, 在新能源汽车智能座舱、节能建筑动态幕墙、可穿戴设备柔性显示等新兴领域展现变革性应用前景。通过多物理场协同调控机制, 调光系统可实现毫秒级透光率切换、自适应光热管理及人机交互功能, 为智慧城市和绿色科技提供核心支撑。本文系统分析了主流调光技术的原理演进与产业化路径, 聚焦聚合物分散液晶(PDLC)、电致变色(EC)、悬浮粒子(SPD)以及新兴的染料液晶(DLC)四类方案, 阐释其光散射、电化学、粒子取向及染料吸光等核心调控机制, 梳理关键性能优化方向, 涵盖材料改性、结构设计及工艺升级策略。结合新兴应用场景, 探讨不同技术的动态调光适配性与功能延展潜力。针对产业化进程, 评述耐久性、兼容性 & 标准化等共性挑战, 并展望智能化协同与生态化制造趋势, 为跨领域应用提供发展框架。

关键词: 调光技术; 技术原理; 产业链; 应用现状

中图分类号: TB34; TN141.9 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2025-0167 CSTR: 32172.14.CJLCD.2025-0167

Research progress and industrialization analysis of smart dimming technology

ZHAO Haiyan^{1,2}, WANG Ling^{3*}, YANG Huai^{1*}

(1. School of Material Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Polytechnic University, Beijing 100176, China;

3. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Amid growing demands for energy efficiency optimization and intelligent light regulation, the development of smart dimming technologies featuring high response speed, low energy consumption, and scalable manufacturing integration is imperative. Recent advancements in electrochromic (EC), responsive liquid crystals, and nanomaterial-mediated dimming systems have accelerated innovation. By integrating stimuli-responsive functional units with optical substrates, smart material systems capable of actively modulating light transmittance have been engineered. These technologies overcome the limitations of

收稿日期: 2025-08-15; 修订日期: 2025-09-02.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2023YFB3812800)

Supported by National Key R&D Program of China (No.2023YFB3812800)

*通信联系人, E-mail: yanghuai@pku.edu.cn; lwang17@tju.edu.cn

conventional static shading, demonstrating transformative potential in emerging fields such as smart cockpits for new energy vehicles, dynamic façades for energy-efficient buildings, and flexible displays for wearable electronics. Leveraging multi-physics coupling mechanisms (*e.g.*, electric/thermal fields), dimming systems achieve millisecond-scale transmittance switching, adaptive photothermal management, and human-machine interaction, thereby underpinning smart cities and green technology initiatives. This review systematically examines the evolutionary principles and industrial pathways of mainstream dimming technologies, focusing on four key approaches: polymer-dispersed liquid crystal (PDLC), electrochromic (EC), suspended particle device (SPD), and dye-doped liquid crystal (DLC). It elucidates their core regulatory mechanisms—including light scattering, electrochemical reactions, particle orientation, and dye-mediated absorption. It synthesizes performance optimization strategies spanning material modification, structural design, and process innovation. The analysis further evaluates the adaptive capabilities of these technologies for dynamic dimming and functional expansion across emerging applications. Critical challenges in industrialization, such as durability, compatibility, and standardization gaps, are assessed, while outlining future trends toward intelligent synergy and eco-conscious manufacturing. This framework aims to guide cross-domain deployment of advanced dimming solutions.

Key words: dimming technology; technical principle; industry chain; application status

1 调光技术概述

调光技术作为一种能够主动调节光线透过率的创新解决方案,已成为现代智能材料领域的重要组成部分^[1]。这种技术通过外部刺激(如电场、温度、光照等)改变材料的光学特性,实现透光率的可控调节,在建筑、交通、消费电子等多个领域展现出巨大应用潜力。随着节能环保需求增长和智能化浪潮推进,全球调光玻璃市场呈现强劲增长态势。据研究数据显示,当前全球智能调光玻璃市场持续增长,2023年市场规模达到40亿人民币,2026年预计将突破200亿^[2]。

调光技术的核心价值在于它能够动态管理光线与热量,在满足视觉舒适度的同时实现能源效率优化。在建筑领域,智能窗户可减少约30%的空调能耗^[2];在汽车领域,调光天幕可阻挡99%以上的紫外线;在航空领域,电致变色舷窗已取代传统的机械遮光板,提升用户体验。目前市场上的主流调光技术主要包括聚合物分散液晶(PDLC)、电致变色(EC)、悬浮粒子(SPD)以及新兴的染料液晶(DLC)技术,每类技术都有其独特的物理原理、性能特点和应用场景^[3]。

随着新能源汽车、绿色建筑和消费电子产品的快速发展,调光技术正经历从“单一功能”向“多功能集成”的转型。未来调光玻璃不仅是光

调节介质,还将融合透明显示、能量采集、人机交互等创新功能,成为智能生态系统的重要组成部分。本文系统梳理各类调光技术的工作原理、产业链布局、应用现状及发展趋势,为相关领域的研究者和产业界提供全面参考。

2 主流调光技术原理及特点

针对目前市场上的主流调光技术,表1对比了电致变色(EC,含有机与无机两类)、悬浮粒子(SPD)、染料液晶(DLC)、聚合物分散液晶(PDLC)四种智能材料技术。有机EC采用卷对卷涂布工艺,以聚噻吩/PET膜为核心材料,响应时间60 s (1.6 m^2),适用于汽车天幕、曲面建筑幕墙;无机EC经磁控溅射制备,基于 WO_3/NiO /玻璃基板,响应达5 min/ m^2 ,主要应用于平面建筑幕墙与航空舷窗。SPD通过卷对卷涂布集成卤化铅纳米棒/HPMC,响应仅1~2 s,适配豪华车天窗与特种车辆。染料液晶依托液晶显示器(LCD)工艺,以染料为关键材料,15 ms超快响应,用于磁悬浮列车车窗、绿色建筑等动态调光场景。PDLC同样采用卷对卷涂布,液晶/预聚物体系实现 $<20 \text{ ms}$ 响应,覆盖室内隔断、柔性智能窗及投影屏等柔性化、高透光需求领域。四者核心差异体现在材料体系、工艺路径及响应效率,共同支撑建筑、交

表 1 聚合物分散液晶、电致变色、悬浮粒子以及新兴的染料液晶技术对比

Tab. 1 Comparison of polymer dispersed liquid crystal, electrochromic, suspended particle and emerging dye liquid crystal technologies

技术类型	有机 EC	无机 EC	SPD	DLC	PDLC
核心工艺	卷对卷涂布	磁控溅射	卷对卷涂布	LCD	卷对卷涂布
关键材料	聚噻吩/PET膜	WO ₃ /NiO/玻璃基板	卤化铅纳米棒/ HPMC	二色性染料	液晶/聚合物
调光模式	蓝红/透明	蓝/透明	蓝/透明	黑/白	散射/透明
均匀性	四周渐变到中心	四周渐变到中心	变色均匀	变色均匀	变色均匀
透过率调节	6.7%~57.3%	0.8%~56%	1%~62%	18%~55%	6.5%~81%
响应时间	60 s (1.6 m ²)	5 min/m ²	1~2 s	15 ms	<20 ms
能耗参数	<0.5 W/m ²	<0.5 W/m ²	3~7 W/m ²	0.5~5 W/m ²	1~10 W/m ²
使用场景	汽车天幕、 曲面建筑幕墙	平面建筑幕墙、 航空舷窗	豪华车天窗、 特种车辆	磁悬浮列车车窗、 汽车车窗、绿色建筑	室内隔断、投影屏、 柔性智能窗

通、航空等多元场景的智能调光需求。

2.1 聚合物分散液晶技术

聚合物分散液晶(PDLC)是最早实现商业化的电控调光技术,其工作原理基于液晶分子在电场作用下的取向变化。PDLC结构由两层透明导电材料(通常为ITO涂层)夹持一层聚合物与液晶的混合物构成,液晶微滴以微米级尺寸分散在聚合物基质中。在通电状态下(通常需60~110 V交流电压),液晶分子沿电场方向有序排列,折射率与聚合物匹配,光线可直线穿透,材料变为透明状态(图1(a))。在断电状态下,液晶分子随机排列,与聚合物基质的折射率不匹配,导致光线强烈散射,呈乳白色雾化状态,透光而不透明(图1(b))^[4-5]。

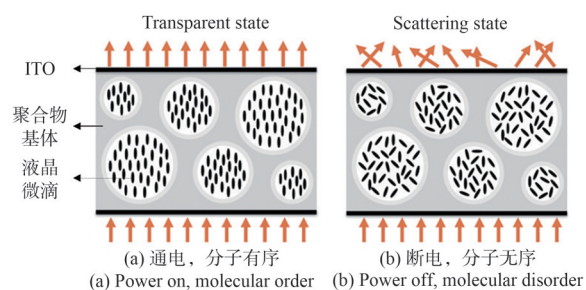


图 1 PDLC 技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PDLC technical principle

PDLC的核心优势在于其较快的响应速度(毫秒级切换)和成熟的制备工艺。该技术采用相分离法生产^[6],其中紫外光固化工艺因效率高、毒性小而成为主流。然而,PDLC存在两个明显

局限:一是只有开/关两种状态,无法实现透光率的连续调节;二是隔热性能有限,在雾化状态下虽能提供良好的隐私保护(可遮挡10 cm外的物体),但实际对光线并无阻隔作用,太阳光仍然可以在被散射的状态下进入室内。在光学表现方面,PDLC的雾度值较高(通常>5%),透光状态下视觉清晰度不如EC玻璃,但其独特的白色雾化效果在建筑隔断设计中具有独特优势^[7]。

当前,PDLC薄膜的研究聚焦于材料优化与功能拓展^[8-11]。国内外研究人员主要通过两种策略进行改进:一是调整单体结构以调控薄膜微观结构,进而优化电光性能;二是掺入纳米粒子或引入其他纳微材料,旨在降低驱动电压、增加内部散射中心以提高光学对比度,并提升响应速度至毫秒级。同时,研究人员致力于开发光/热/电多重响应型、柔性化及节能化(如结合红外反射涂层)的智能器件,推动PDLC应用从传统智能窗向柔性显示、AR/VR透镜和生物医学等领域延伸。Wu等^[12]通过制备具有双层PDLC结构的复合薄膜(PDLC-PVA-PDLC),发现较小且均匀的聚合物网孔尺寸有助于提升光学对比度和电光性能。他们进一步在双层结构中掺杂表面改性的MoO₂纳米粒子,显著提高了光学对比度(提升90%以上)并保持良好调光性能。此外,Wu团队^[13]还引入Gd₂O₃纳米粒子和罗丹明B类荧光染料制备的双层PDLC薄膜具有优异的逐级驱动功能和稳定的耐久性能,在不同角度的紫外光照射下也产生了优异的防伪效果。

研究人员也着力增强PDLC的红外调制能

力及解决其广泛应用面临的挑战,如电光特性与红外反射率的协同调整、复杂图案制备以及多刺激响应状态显示。Zhong等^[14]将纳米纤维膜和相变微胶囊膜与PDLC层协同集成,通过精细调控体系配比、纳米纤维厚度和微胶囊浓度,成功获得了高光学对比度的复合薄膜,并实现了优异的红外屏蔽效率,其采用的模板静电纺丝技术为制备可图案化PDLC器件提供了新思路。Wang等^[15]通过在PDLC中掺杂氧化铝/氧化锌纳米粒子(AZO NPs)和负载钨酸铯纳米粒子($\text{Cs}_{0.33}\text{WO}_3$ NPs)的纳米纤维,不仅提升了电光性能,还显著增强了红外屏蔽性能。温度调节测试表明,该薄膜可智能调节红外反射,内部温度较未掺杂薄膜降低达 12.1°C ,展现出卓越的热调节能力。

2.2 电致变色技术

电致变色(EC)技术基于化学反应完成光线调控,通过电化学氧化还原反应实现材料光学性能的可逆变化,主要以变色材料属性划分为无机EC和有机EC两种方向^[16]。无机EC器件的核心结构由5层功能薄膜组成,如图2所示:两层透明导电层(作为电极)、电致变色层(如三氧化钨 WO_3)、电解质层(离子传导介质)和离子存储层(如氧化镍 NiO)^[17]。当施加正向电压时,锂离子从存储层经电解质迁移至电致变色层,引发还原反应(如 $\text{WO}_3 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{LiWO}_3$),材料吸收可见光,玻璃变为深色;当电压极性反转时,离子返回存储层,电致变色层恢复透明状态^[18-19]。

近年来,为满足新一代无机电致变色器件需求,三氧化钨(WO_3)材料的优化研究聚焦于新型

结构设计、掺杂和结晶度控制。在结构设计方面,研究者致力于制备多孔或纳米结构 WO_3 薄膜。多孔结构通过增加有效比表面积和离子传输通道,显著改善电化学与电致变色性能。Zhang等^[20]开发了单组分非晶多孔 WO_3 薄膜,凭借增强的离子输运和无相变特性,实现了超快响应(着色 6.4 s ,褪色 7.2 s),并利用 Li^+ 注入/脱出诱导的可调表面等离子体共振(SPR)吸收,独立调控近红外与可见光波段。同样,纳米结构薄膜因其高比表面积,既能提升颜色光学对比度,又能缓冲体积变化从而提高循环稳定性。Pan等^[21]合成的“珊瑚状”纳米结构 WO_3 薄膜展现出优异的性能:快速响应($5\text{ s}/6\text{ s}$)、高着色效率($56.5\text{ cm}^2/\text{C}$)、大光学调制幅度(78.1%),并在 $15\,000$ 次循环后性能无衰减,这归功于其大比表面积、更多反应位点以及丙三醇增强的薄膜粘附力与结构联锁。

掺杂改性也是提升 WO_3 性能的关键策略。引入掺杂剂不仅能改变材料结构,还能优化电致变色特性。Cai等^[22]制备的星型结构Ti掺杂 WO_3 薄膜在红外区域($2\,000\text{ nm}$)的光学调制幅度从 39.7% 显著提升至 64.6% ,这归因于结晶度降低及星形结构带来的低电荷转移与离子扩散电阻。此外, WO_3 的电致变色性能与其结晶度密切相关。非晶 WO_3 (a- WO_3)具有无序结构,利于离子脱嵌,响应快且调制幅度高,但稳定性差;结晶 WO_3 (c- WO_3)结构有序致密,循环寿命长,但着色效率低、响应慢。为结合两者优势,Zhao等^[23]通过单步磁控溅射并调控基底温度,制备了表面非晶、底部结晶的梯度结构 WO_3 薄膜。该薄膜兼具非晶相的高调制幅度($1\,000\text{ nm}$ 处 72.5% ,优于纯非晶的 70.7% 和结晶的 58.9%)和快速响应(着色 5.3 s ,褪色 3.0 s),以及结晶相的良好稳定性($1\,000$ 次循环后调制幅度仍保持约 60%),实现了非晶相快速离子传输与结晶相结构稳定的协同效应。

另外,通过多层结构设计也能有效改善 WO_3 性能,还可以赋予材料更多的应用型功能。Yang等^[24]设计了一种锂离子嵌入深度可控的 WO_3/VO_2 复合多层机构。当施加的电压持续降低到 -3.5 V 时,该器件会切换到暗态。在这种状态下,它能阻挡 94.2% 的 670 nm 波长光和 96.6% 的 $1\,500\text{ nm}$ 波长光,实现从亮到暗的大幅度调节。Cao等^[25]设计了一种全固态 WO_3 多层结构,在外加电场

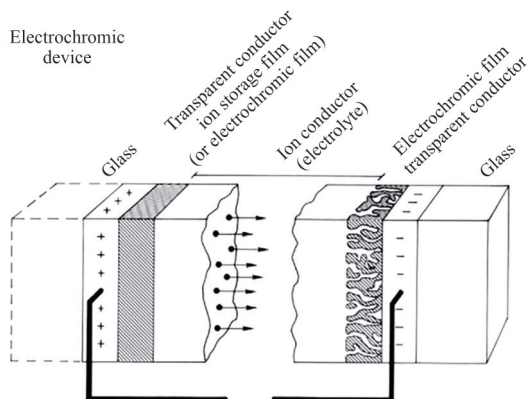


图2 无机电致变色器件结构图

Fig. 2 Schematic diagram of inorganic electrochromism device

下固态电解质中的 Na^+ 传输到 PEDOT:PSS, PEDOT:PSS 再将质子泵送到 WO_3 层引发变色,表现出高对比度(在 650 nm 处的吸光度大于 90%)、快速响应(显色至 90% 需要 0.7 s,漂白至 65% 需要 0.9 s,到 90% 需要 7.1 s)、良好的着色效率(在 670 nm 处 $109 \text{ cm}^2/\text{C}$)和优异的循环稳定性(3 000 次循环后对比度下降小于 10%)。这种驱动机理有效阻止了 Na^+ 大量扩散到电致变色层,绝缘固态聚合物电解质层承载大部分施加电压,从而避免在高压运行时 PEDOT:PSS 中产生氢气。基于全固态电化学电池便捷的制备与封装特性,有望在连续化加工和总成设计中实现大面积应用。

与传统无机 EC 技术依赖金属离子迁移不同,有机 EC 通过分子层面的电子转移与结构变化实现颜色切换,在柔性、色彩表现及能耗方面具有显著优势^[26]。有机 EC 技术的本质是电化学驱动的可逆电子转移过程,其核心结构包含 5 层功能薄膜:两层透明导电层(作为电极)、电致变色层(如紫罗精衍生物、聚苯胺、聚噻吩等)、电解质层(如凝胶态高分子电解质)和离子存储层(如普鲁士蓝类似物)^[27]。通过掺杂的方法也能提升有机电致变色材料的调制性能,由图 3(a)可以看出,当掺杂程度逐渐变大时,会出现极化、产生双极子,在共轭链上传递电荷,使得导电性能提高,电致变色响应更快、着色效率更高、对比度更大。然而,过度掺杂会导致结构不稳定性和光学缺陷,造成使用寿命缩短等问题。施加正向电压时,EC 层分子接受电子被还原(如紫罗精阳离子 \rightarrow 自由基),分子能级改变导致可见光吸收增强,呈现深色;电压极性反转,EC 层分子失去电子被氧化,分子恢复透明态(图 3(b))。此过程伴随离子(H^+ 或 Li^+)在电解质层与离子存储层之间的迁移,以维持电荷平衡^[28-29]。

聚噻吩类共轭聚合物凭借优异的电致变色性能、易合成、低氧化还原电位和强可加工性,被视为未来电致变色领域的理想候选材料。然而,因循环稳定性差、响应时间长以及普遍采用单电极结构的局限,阻碍了其进一步发展,提升循环寿命成为关键挑战。针对此,互补型电致变色器件(ECDs)因其独特的双电极结构(电致变色层+离子存储层均由电致变色材料构成)

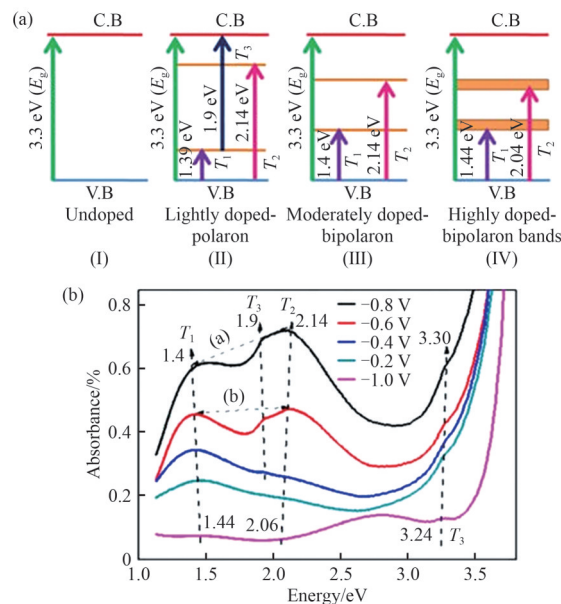


图 3 有机电致变色原理图

Fig. 3 Schematic diagram of organic electrochromism

展现出显著优势:两电极的电致变色响应近乎同步。这不仅减少了电解液损耗,还能实现颜色叠加,从而赋予器件更高的光学对比度、着色效率和更优异的循环稳定性。EC 层与离子储存层的厚度匹配是决定互补型器件性能的核心因素^[30-33]。

近年来,研究者们围绕互补型 ECDs 展开了广泛探索。Kang 等^[34]以 PANI 为阳极、PEDOT 为阴极组装器件,发现 PANI 厚度为 60 nm 时光学对比度最优。Kao 等^[35]使用 PEDOT 阴极和 PG1 阳极,在 510 nm 处实现了 55.5% 的光学对比度及优异稳定性。Shen 等^[36]采用碳纳米管修饰的 PANI-CNTs(阳极)和 PEDOT-CNTs(阴极),显著提升了器件性能(650 nm 处着色效率高达 $836 \text{ cm}^2/\text{C}$, 630 nm 处光学对比度 58.5%),且在 500 次循环后无衰减,远优于未修饰的对照组(570 nm 处光学对比度 35%)。他们还开发了基于普鲁士蓝(PB)和 PProDOT- Et_2 的互补器件,590 nm 处的光学对比度达 59.3%,1 200 次循环后保持率为 98%。Fu 等^[37]合成了新型可溶液加工聚合物(P2~P4),其中 P2 性能突出(光学对比度 57.3%,响应时间 1.9 s/0.4 s,1 000 次循环后保持率 73.1%,着色效率 $657.5 \text{ cm}^2/\text{C}$)。特别地,他们利用 P3(理想的抗蓝光离子储存层)和黑色聚合物 ECP-black,成功制备了柔性互补型电致

变色太阳眼镜,该器件可在黑色态与高透抗蓝光态间可逆切换(响应时间 1.5 s/4.5 s,400~700 nm 光学对比度 49%,着色效率 470.8 cm²/C),有力推动了智能眼镜应用。

EC 技术的核心优势在于其低能耗(仅需 3 V 直流电压)、低雾度(<2%,接近普通玻璃的视觉清晰度)和连续调光能力。与 PDLC 的二元状态不同,EC 玻璃可实现从透明(透光率>70%)到深色(透光率<5%)的多级调节,为用户提供更精准的光线控制。在隔热性能方面,EC 玻璃表现卓越,紫外线阻隔率高达 99.9%^[38];无机 EC 的红外线隔绝效果显著,可以同时针对可见光和近红外光进行调节,能有效降低室内热负荷^[39]。然而,EC 技术的主要局限是响应速度较慢(约 5 m²/min),且玻璃尺寸越大变色均匀性越难控制,早期产品还存在偏蓝色问题。

EC 技术已发展至第三代:第一代紫罗精技术存在漏液、可靠性差问题(如 2005 年法拉利 Superamerica 跑车);第二代无机非金属材料(如 WO₃)变色速度慢、成本高;第三代薄膜电致变色技术采用柔性固态材料,解决了前两代缺陷,应用领域从防眩后视镜扩展到天窗、侧窗等大尺寸场景,代表性产品有蔚来 ET5T、比亚迪海狮 07EV 等车型的天幕系统。

2.3 悬浮粒子技术

悬浮粒子(SPD)技术基于悬浮粒子的取向控制实现调光效果。其结构由两层玻璃或塑料面板构成,内表面涂覆透明导电材料,中间填充含有数百万个悬浮粒子的液体薄膜(图 4)。这些粒子通常为杆状纳米结构,具有强烈的光吸收特性。在断电状态下,粒子因布朗运动随机排布,可吸收 99% 以上的可见光,玻璃呈现深色甚至近乎不透明状态。当施加高电压(通常需 110 V 交流电)时,粒子在电场作用下排列成直线,允许光线通过,玻璃变为透明^[40-41]。

SPD 调光方案通过在两层玻璃或塑料面板间填充悬浮粒子实现调光。该方案具有宽范围透光调节能力、快速响应与高环境防护性、优异的遮阳与隔热性能、宽视角与高均匀性等优点,但仍存在以下局限性:高驱动电压与能耗、光学缺陷与颜色限制、环境适应性受限、成本与工艺挑战等问题。

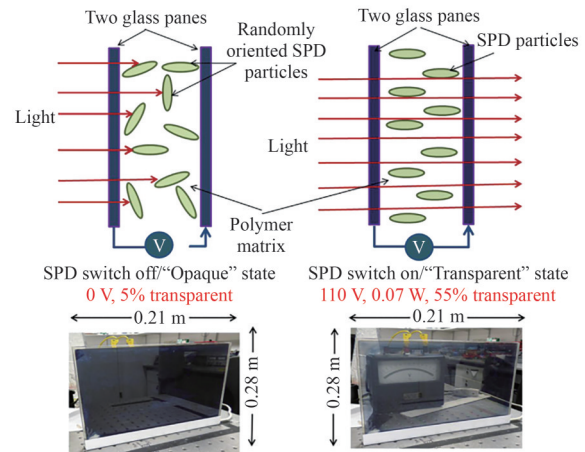


图 4 SPD 技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of SPD technology

近年来,研究者们围绕 SPD 调光方案展开了广泛探索。Huang 等^[42]成功制备出导电性优异、透明度高且稳定的铜-氧化石墨烯核壳纳米线薄膜,并首次利用该材料作为电极制备了光致发光器件。基于铜-氧化石墨烯纳米线的器件展现出 42% 的优异透光率变化范围,此外,器件在开关操作过程中表现出良好的可逆性和稳定性,褪色和着色过程的响应时间分别仅需 20 s 和 40 s。Ren 等^[43]采用湿化学法成功合成了有机金属多碘化物纳米棒。这些纳米棒含有高极化率的碘元素,对电场具有高度响应性,使其成为理想的光控粒子材料。最终制备出的器件展现出卓越的光学性能与稳定性:光调制率高达 73.7%,弯曲达 180°且无结构损伤。Huang 等^[44]通过采用柔性透明聚合物基体,开发出一种简便高效的自动化刀片涂覆组装技术,成功制备出大面积独立式银纳米线(NW)透明导电电极(TCEs)。这种新型电极具有高透光率、优异导电性、卓越柔韧性、长期稳定性和结构完整性等优势。其出色的柔韧性使其可弯曲超过 10 000 次仍保持性能稳定。作为概念验证,这些电极被用于制造智能窗户应用的柔性悬浮颗粒装置(SPD)。实验数据显示,该装置的光学透射率变化幅度达 60.2%,切换时间仅需 21 s,稳定性与文献报道的最佳 SPD 性能相当。更值得一提的是,基于本技术制备的 SPD 展现出显著优于市售 TCE 基器件的机械柔韧性,可实现 180°折叠且经 200 次以上循环仍无明显性能衰减。Kim 等^[45]采用含银纳米颗粒(Ag NPs)的水-甲苯乳液进行条状涂布工艺,成

功制备出透明导电薄膜。系统控制各种材料和工艺条件,探索了一种增强 TCEs 电光性能的涂层策略,从而实现 $86\% \pm 0.2\%$ 的透射率、 $4\% \pm 0.2\%$ 的雾度和 $35 \pm 2.8 \Omega/\text{m}^2$ 的薄层电阻。王志浩等^[46]以单官能团羧酸酯作为溶剂,通过控制单官能团羧酸酯溶剂的分子量及油水分配系数(ClogP)值,从而得到不同长径比的碘-吡嗪调光颗粒。所得调光颗粒为纳米棒状结构,形貌规整且稳定性良好,将其应用于光阀器件,调节光通量效果良好,有利于进一步推动 SPD 光阀的发展。

SPD 技术最显著的优点是超宽的光调节范围(透光率可在 $0.1\% \sim 60\%$ 之间连续变化)和较强的隐私效果,使其在强光环境下表现优异。然而,该技术也存在明显不足:一是高能耗(工作电压超过 100 V),存在安全隐患;二是偏蓝色现象严重,影响视觉舒适度;三是雾度较高($>5\%$),导致成像清晰度下降。这些特性限制了 SPD 的应用场景,目前主要集中于高端市场。SPD 玻璃在交通领域的应用占比最高,尤其是高端汽车品牌如奔驰的侧窗和天窗产品,因其能提供极致的遮阳效果和连续的明暗调节。

2.4 染料液晶技术

染料液晶是近年来兴起的创新调光方案,由京东方(BOE)率先应用于高速磁悬浮列车车窗。其核心技术是利用二向色性染料分子对光的选择性吸收特性,结合液晶的电场调控能力^[47-49]。在液晶层中添加偶氮类或蒽醌类二色性染料,当施加电压时,液晶分子带动染料分子定向排列,实现亮态与暗态的切换(图5)。与 PDLC 的光散射机制不同,染料液晶通过选择性吸光实现调光,在黑态纯度、响应速度等光学性能上有显著提升^[50]。

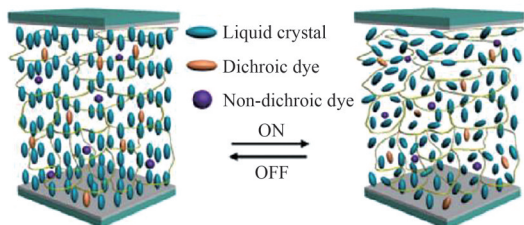


图5 染料液晶调光技术原理图

Fig. 5 Schematic diagram of dye liquid crystal dimming technology

染料液晶技术的突破性优势在于高通透性(雾度 $<3\%$)、低功耗(工作电压 12 V 左右)和快速响应(毫秒级)。在暗态下,其透光率可降至 $<1\%$,搭配适合的总成结构可有效隔绝紫外线和红外线^[51]。染料液晶调光玻璃可根据应用需求设计为整面调光或分区调光模式。在高速磁悬浮列车中,乘客可通过车窗上的透明显示按键自主调节亮度,系统还支持触控、语音等多种交互方式。这种技术融合了光学调控与人机交互功能,代表了调光技术的智能化发展方向。

染料液晶调光技术是一种基于二向色性染料与向列相液晶结合的光电技术,通过电场控制分子排列实现透光率的动态调节。该方案具有响应速度快、调光范围宽、驱动电压低、能耗低、光学品质高以及设计灵活和更好的隐私保护等优点,但仍存在光热稳定性不佳、隔热性能效果不够优秀、工艺复杂度高等技术局限性。

近年来,研究者们围绕染料液晶调光技术展开了广泛探索。Sun 等^[52]成功研制出高性能多染料掺杂的 PDLC 智能窗,并系统研究了染料掺杂对其电光性能的影响。通过掺杂二向色染料,使样品在关闭态仅显微弱着色,在开启态则呈现强烈着色,这种差异源于二向色染料的取向依赖性吸收特性。通过采用互补吸收特性的混合染料,可借助减法原理消除 PDLC 样品在关闭态的着色现象,从而显著增强光学对比度。实验结果表明,该方法为制备具有高视觉光学对比度与快速响应时间的彩色 PDLC 智能窗提供了可行方案,使其在光管理与建筑美学领域展现出广阔的应用前景。Li 等^[53]研发了一款基于液晶电致变色(CLC)的三态智能玻璃,可实现对整个可见光谱范围内的光学透射率动态调控。六端子电极结构使 CLC 在任意螺旋螺距下都能实现三态切换,为实际应用提供了极大的灵活性。这款智能玻璃可作为窗户使用,在透明(LH)、着色(P)和不透明(FC)3种状态间自由切换,既能满足动态采光需求,又能保障隐私保护。Zhu 等^[54]开发了一种聚合物稳定的染料掺杂胆甾型液晶(PS-DDCLCs)智能窗,该材料具有宽泛的温度适应性和快速弛豫特性,通过巯基-迈克尔加成聚合反应形成聚合物网络结构,有效防止染料在聚合过程中发生吸收损耗和变色现象。该反应采用碱催化或亲核

引发路径,而非自由基引发。在 20~60 °C 温度范围内,PS-DDCLCs 展现出低雾度和短弛豫时间的优异性能,并且该材料可保持完全黑色状态。Kim 等^[55]提出一种混合锚定结构的胆甾相液晶(HA-CLC)单元,该单元同时包含平面态和焦锥态液晶。在初始不透明状态下,入射光首先被平面态的染料分子吸收,随后被焦锥态中随机取向的液晶产生后向散射和前向散射。通过在基板表面采用垂直锚定与平面锚定相结合的设计方案,无需额外加工工艺即可实现这种混合锚定结构。在 HA-CLC 单元中,靠近平面排列层的液晶处于平面态,而靠近垂直排列层的液晶则呈现焦锥态。实验结果表明,与双层光闸结构相比,HA-CLC 单元在透明态下可提供显著更高的透光率,同时其驱动电压也比聚合物分散液晶(PDLC)薄膜大幅降低。

3 主流调光技术的工艺路径

聚合物分散液晶(PDLC)、电致变色(EC)、悬浮粒子(SP)及染料液晶(DLC)技术是当前主流的智能调光技术,它们各具特色且适配多元场景。PDLC 基于紫外固化相分离工艺,通过液晶微滴与聚合物基体的相分离实现雾态(透光不透明)与透明态切换,响应时间 <20 ms,成本低且应用广泛,但需持续供电维持透明状态,多用于室内隔断及隐私门窗。EC 分无机与有机两类:无机 EC 采用磁控溅射沉积 WO_3 等多层膜,响应较慢(约 5 min/m^2),适用于建筑幕墙;有机 EC 通过卷对卷涂布聚噻吩等材料,响应更快且兼容柔性基底,适配消费电子及曲面车窗。SPD 利用纳米粒子物理变色,响应速度极快但驱动电压高(约 110 V),存在色偏问题,多用于高端汽车天窗。染料液晶工艺兼容传统 LCD 产线,通过液晶分子排列调控透光率,支持夹胶或中空结构,透光率高且可动态调光,适用于轨道交通及地标建筑。四者核心差异体现在材料体系(液晶/无机氧化物/纳米粒子)、工艺路径(涂布/溅射/夹胶)及性能表现(响应速度、隔热性、驱动电压),共同支撑建筑、交通、家居等领域的智能化调光需求。

3.1 聚合物分散液晶技术

聚合物分散液晶(PDLC)基于紫外固化相分离工艺(图 6),将向列相液晶、预聚物及光引发剂

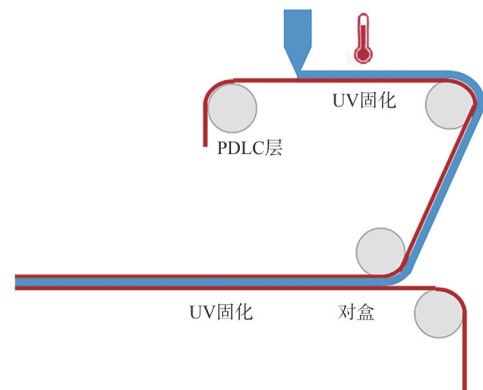


图 6 PDLC 产品制造工艺

Fig. 6 Manufacturing process of PDLC products

混合,刮涂于 PET-ITO 膜上后 UV 照射,诱导液晶微滴从聚合物基质中相分离,形成散射态(雾度 $>5\%$)。二次 UV 固化强化网络,响应时间 $<20 \text{ ms}$ ^[56]。PDLC 仅能实现雾态与透明态之间的转变,无可调灰阶,且处于雾态时不阻断光线,无隔热能力。PDLC 技术发展成熟,成本低,因此现阶段 PDLC 调光玻璃的应用最为广泛。但 PDLC 在透过状态下也存在一定程度的散射效果,且只有不断施加电压才能保持透明,因此更适用于打造具有隐私效果的室内玻璃隔断及门窗,在建筑幕墙和汽车玻璃上有较多的使用限制。

在实际应用中,PDLC 调光玻璃采用“三明治结构”:两层玻璃之间是 PVB 胶膜和 PDLC 液晶薄膜,经高温高压复合而成。这种结构使其具备良好的安全性能,即使碎裂也能保持整体完整性。

3.2 电致变色技术

无机电致变色(EC)依赖磁控溅射镀膜工艺(图 7)。超白玻璃基板(3~6 mm)经清洗后,在真空设备中依次溅射沉积 5 层功能膜:底层 ITO (150~200 nm)、离子存储层(NiO/V_2O_5 , 300~400 nm)、电解质层($LiTaO_3$, 50~100 nm)、电致变色层(WO_3 , 400~500 nm)及顶层 ITO (150~200 nm)^[57]。镀膜后需退火提升材料致密性,最后与第二层玻璃通过 PVB 夹层在高压釜中复合(130 °C, 1.2 MPa)。此工艺仅适用于平面玻璃,曲面镀膜厚度偏差 $>15\%$,且响应速度随面积增大而显著下降(约 5 min/m^2),大多应用于大面积建筑幕墙。以 Sage Glass、View 等公司为代表,其产品已于写字楼、机场等多种场景得到应用,如

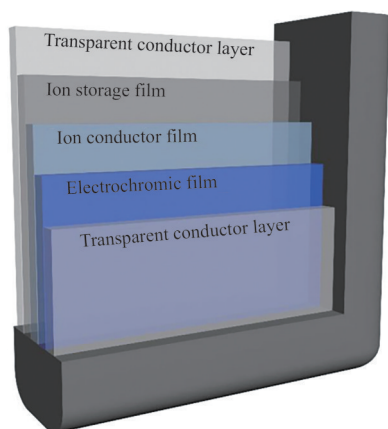


图 7 无机 EC 产品制造流程

Fig. 7 Manufacturing process of inorganic EC products

腾讯深圳办公大楼采光顶即采用 Sage Glass 系列产品。

有机 EC 采用卷对卷涂布柔性工艺(图 8),以 PET-ITO 薄膜(0.1~0.3 mm 厚)为基底,经等离子清洗后,通过狭缝涂布依次涂布电致变色层(聚噻吩/聚苯胺复合材料)、全固态凝胶电解质(如 PEO-LiTFSI)及离子存储层(普鲁士蓝)。涂布后经分段烘箱干燥与紫外固化交联,最后与钢化玻璃通过 PVB 胶膜热压复合(140 °C, 1.2 MPa)^[58-59]。有机 EC 材料可兼容刚性和柔性基底,且响应速度比无机 EC 快,可应用于消费电子及使用曲面玻璃的交通领域。光羿科技公司推出的柔性 EC 产品已在手机及乘用车天窗中得到应用。

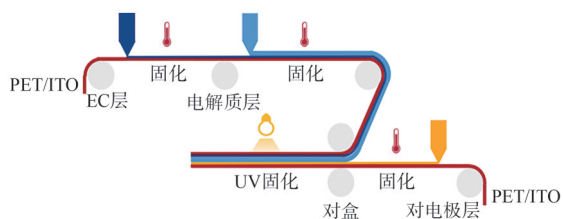


图 8 有机 EC 产品制造流程

Fig. 8 Manufacturing process of organic EC products

3.3 悬浮粒子技术

悬浮粒子 (SPD) 制造工艺与有机 EC 类似,采用卷对卷涂布柔性工艺,先合成杆状纳米粒子(卤化铅或金属氧化物,长径比 10:1),分散于羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 溶液中形成 0.1%~0.5% 浓度(质量分数)分散液(图 9)。以 PET 薄膜(0.1~0.3 mm 厚)为基底,经等离子清洗后,通过狭缝涂布依次沉积透明导电层(ITO 或银纳米线)、SPD 层^[58]。涂布后经分段烘箱干燥与紫外固化交联,最后与钢化玻璃通过 PVB 胶膜热压复合(140 °C, 1.2 MPa)。SPD 变色是物理过程,相较于 EC 的化学过程具有更优异的变色响应速度,但也存在着着色偏蓝的现象,且 SPD 驱动电压高(约 110 V),实际使用时存在一定安全隐患。现市面上 SPD 调光技术大多来源于 RFI 公司,作为 RFI 公司的专利技术,SPD 产品通过不同授权公司实现制作生产,现已应用于多款高端乘用车。除此之外,国内精一公司、迪飞公司也推出了同类型产品,目前在建筑及乘用车项目均有应用。

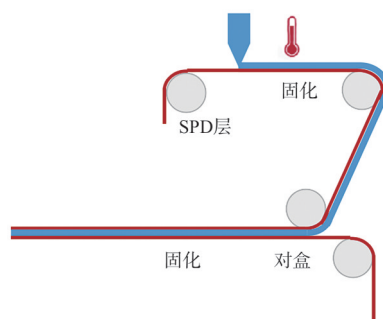


图 9 SPD 产品制造流程

Fig. 9 Manufacturing process of SPD products

3.4 染料液晶技术

染料液晶调光功能层生产工艺与传统 LCD 产线适配(图 10),包含阵列(Array)、成盒(Cell)、模组(Module)工序,现有 LCD 产线均可对应,根

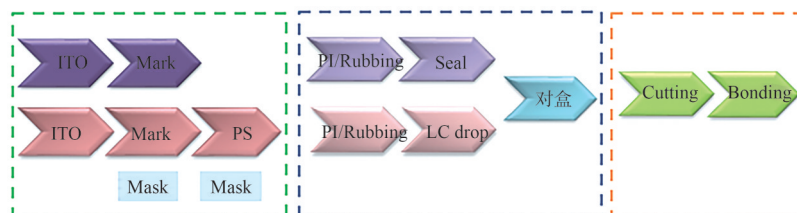


图 10 染料液晶产品制造流程

Fig. 10 Manufacturing process of dye liquid crystal products

据尺寸需求可以在相应世代线生产^[60-61]。调光层具体结构为:上下基板、透明导电层(ITO)、取向层(PI)、染料液晶、间隔物(BS/PS)以及封框胶(Seal)。为兼容多种尺寸、多款形状的产品需求,阵列段采用整面ITO的方式制作,无需新开掩模版。根据不同现地的生产工艺,间隔物使用PS/BS均可对应。

调光功能层制作完成后,下一步即进行调光玻璃总成的制作。利用PVB胶片的粘结特性将调光层与钢化玻璃制成夹胶玻璃,或在此基础上增加中空气体层,构成中空调光玻璃。在乘用车领域,一般采用夹层调光玻璃(LGU);而在建筑、轨道交通等领域,一般使用中空调光玻璃(IGU)。目前染料液晶类产品已在乘用车、轨道交通以及地标性建筑中得到应用。

4 产业链与企业分析

聚合物分散液晶(PDLC)、电致变色(EC)、悬浮粒子(SPD)及染料液晶(DLC)技术共同构成智能调光产业的核心技术矩阵,形成差异化竞争格局。在PDLC领域,中国产业链完整,康得新公司、隆昇光电公司等本土企业占据建筑及汽车市场主导地位,年产能达1200片/天的隆昇光电公司2025年产值预计超6亿元,而Polytronix公司、Gauzy公司等国际企业仍保持技术先发优势。EC技术呈现中外博弈态势,创欣科技公司以近100项专利打破Gentex公司垄断;光羿科技公司通过柔性基底和固态电解质实现能耗降低90%,推动国产EC镜片年产能突破1100万片。SPD市场高度集中,Gauzy公司、Research Frontiers公司主导高端汽车天窗市场,中国企业精一公司、迪飞公司加速技术渗透。DLC作为新兴赛道,京东方公司联合福耀公司开发磁悬浮列车智慧视窗;群创光电公司首创废液晶循环技术,推动成本下降30%。4类技术通过材料创新(液晶/无机氧化物/纳米粒子)、工艺突破(卷对卷涂布/溅射镀膜)及场景适配(建筑/汽车/消费电子),共同驱动智能调光产业向高透光、低功耗、柔性化方向升级。

4.1 PDLC 技术企业格局

PDLC产业链已形成全球性竞争格局,涵盖材料供应商、薄膜生产商和终端玻璃制造商。在材料端,纳微科技、石家庄斯迪亚诺精细化工等

企业提供核心液晶材料;固乐邦、雅霖特种新材料等企业则专注PDLC膜胶水研发。在薄膜制造领域,中国企业占据重要地位,24家主要企业分布在华东(浙江、江苏、上海、江西)和华南(广东)地区。其中康得新公司在建筑和汽车领域均有布局,其产品广泛应用于室内隔断、室外幕墙、商场橱窗等场景,并能与投影设备结合形成智能商业显示系统。隆昇光电公司则专注于汽车高端市场,年产能可达1200片/天,产品应用于宝马iX系列、岚图FREE等新能源汽车的天窗、天幕、侧窗,2025年在产量达到设计生产能力标准后,年产值预计超6亿元。

国际企业在PDLC领域具有先发优势:美国Polytronix公司(全球最老牌PDLC膜制造商)采用PVB中间膜夹层技术,产品在透光率、抗冲击强度和安全性方面表现优异。以色列Gauzy公司以创新技术拓展汽车和建筑市场,其调光产品支持高曲率应用。日本企业则聚焦技术升级:凸版印刷的“LC MAGIC”膜实现断电透明特性(更适合汽车安全需求),厚度仅0.1mm,支持灰阶显示。

4.2 电致变色领先企业

电致变色领域呈现高技术壁垒和专利集中的特点,中国企业正加速突破国际垄断。创欣科技公司作为国内EC技术领军企业,拥有全球核心专利近100项,是国内唯一打破Gentex公司专利垄断的公司。其创新点包括:自研凝胶态电解液解决传统液态电解液泄漏问题;双模型融合算法增强产品一致性;实现内外EC镜分别驱动量产。公司年产能达500万片镜片和600万套总成,累计出货1000万件,供货比亚迪、理想、小米等国内主流品牌,进入奔驰、路虎、丰田供应链。

国际巨头Gentex公司长期主导EC防眩目后视镜市场,其技术积累超过20年。而Sage公司则专注于建筑幕墙领域,推动大尺寸EC玻璃商业化。光羿科技公司作为有机EC领域的全球领导者,通过柔性薄膜基底突破、全固态电解质体系、黑色有机EC材料体系开发3项革命性创新解决了行业痛点:以PET柔性基底替代传统玻璃基底,采用卷对卷涂布工艺实现大面积、大曲率产品量产,单线年产能超500万m²;开发新型高分子凝胶电解质,工作电压降至1.5V(仅为无机EC的50%),能耗降低90%以上,断电后仍

能维持调光状态;通过纳米黑体材料复合技术,实现透光率 0.8%~22% 的动态范围,解决传统 EC 偏蓝色问题。光羿科技公司的产品已覆盖蔚来 ET5T、比亚迪海狮 07EV 等车型的天幕系统,并在 2025 年消费类电子产品展(CES)推出建筑用自调节 EC 幕墙,可根据环境光强自动调节透光率。

4.3 SPD与染料液晶创新企业

SPD 市场由 Gauzy 公司(以色列)、Research Frontiers 公司(美国)和 Smart Glass Group 公司主导,中国企业(精一公司、迪飞公司)在全球份额占比较低。SPD 玻璃目前主要应用于高端市场,如奔驰 S 级、宝马 7 系等豪华车型的天窗系统,近年也在极氪 001 汽车天幕中得到了应用,但整体占市场份额较少。

染料液晶作为新兴技术,主要由亚洲企业推动创新。京东方公司(BOE)与福耀玻璃公司、中车青岛四方车辆研究所合作开发的智慧视窗,已应用于中国首创的时速 600 km 高速磁悬浮列车。该方案支持整面或分区调光,乘客可通过透明显示按键自主调节,同时具备隔音、隔热和防紫外功能。同时,在极氪以及红旗部分车型侧窗也以整面调光产品得到应用。除此之外,染料液晶产品凭借其快速响应的优势,在北京城市副中心图书馆等地标性建筑也展现出了独有的艺术效果,在建筑领域得到推广。群创光电公司聚焦可持续发展,与工业技术研究院材料与化工研究所合作开发“废液晶材料循环再制”技术,从废弃液晶中提取可用材料,添加二色性染料制成调光玻璃,实现资源循环利用。这一创新不仅解决了面板行业的废料处理问题,还降低了调光玻璃的制造成本,为建筑节能提供了新方案。

5 应用场景与市场分析

聚合物分散液晶(PDLC)、电致变色(EC)、悬浮粒子(SPD)及染料液晶(DLC)技术正深度重塑交通、建筑与消费电子领域的智能化进程。在汽车领域,PDLC 侧窗以低成本实现隐私保护(如宝马 iX 系列),EC 天幕凭借低雾度(透光率 0.8%~22%)和 99.9% 紫外线阻隔率成为高端电动车标配(创欣科技公司产品覆盖比亚迪、小米等汽车),SPD 天窗(奔驰 S 级)虽遮光率 $<0.1\%$ 但存在高压安全隐患,染料液晶则赋能磁悬浮列

车智慧视窗(京东方公司方技术支持分区调光与透明交互)。在建筑与航空领域,PDLC 隔断占据国内 90% 市场(上海隆昇公司案例),无机 EC 幕墙通过 AI 动态调光与光伏联动迈向零碳建筑(无锡项目示范),染料液晶结合废液晶循环技术降低 30% 材料成本(群创公司方案),航空 EC 舷窗(波音 787)以 5 层膜系实现 $\pm 3\text{ V}$ 低电压深色阻光。在消费电子领域,EC 变色眼镜(伯宇公司)与 WiFi 调光膜(Sonet Film 公司)推动智能交互。市场增长由新能源汽车渗透(2023 年全球超 30%)、建筑节能政策(能耗占比 25%)及柔性显示需求驱动,预计 2025 年全球调光玻璃市场规模将突破 60 亿美元,技术融合(如物联网、AI 算法)将加速场景渗透。

5.1 汽车交通领域

汽车行业已成为调光技术最重要的应用场景(图 11),主要覆盖天幕玻璃、侧窗和防眩后视镜 3 大部件。随着新能源汽车渗透率提升(2023 年全球超 30%),单车玻璃面积扩大(较传统车增加 15%~20%),调光玻璃市场需求激增。不同技术路线在汽车领域形成差异化竞争:

PDLC 技术成本较低,在侧窗隐私保护场景具有优势。宝马 iX 系列侧窗采用 PDLC 方案,断电雾化状态可遮挡 10 cm 外物体,满足乘客隐私需求。但其隔热性能不足,需配合 Low-E 玻璃使用,限制了全天候应用。

EC 技术因低雾度、连续调光特性,成为中高端电动车天幕首选。EC 光感天幕宽可达 1.6 m,调光过程柔和自然,紫外线阻隔率 99.9%,有效降低了车内热负荷。创欣科技公司的 EC 防眩后视镜已覆盖比亚迪、理想、小米等品牌,并开发了集成流媒体和驾驶员监测系统(DMS)的智能后视镜,提升了驾驶安全性。

SPD 技术凭借极致遮光能力(透光率 $<0.1\%$),主要应用于奔驰 S 级等豪华车型的天窗系统。不



图 11 调光产品在交通领域的应用案例

Fig. 11 Application case of dimming products in the field of transportation

过 110 V 高压系统存在安全隐患,且偏蓝色问题影响用户体验。

染料液晶作为新兴技术,在高速磁悬浮列车首秀成功,目前已扩展至高端乘用车。京东方公司的智慧视窗支持分区调光和透明显示交互,2024 年中国首创时速 600 km 的磁悬浮列车应用该技术,乘客可通过车窗按键自主调节亮度,实现了科技与舒适的融合。新红旗 H9 和红旗 HQ9 均搭载了“无极 LC 调光玻璃”,该调光玻璃采用了染料液晶调光技术,能够在 $-20\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温环境下实现毫秒级的智能调光,并可隔绝 99.9% 紫外线和 99.5% 可见光(图 11)。

汽车调光玻璃市场呈现爆发式增长,这一增长由 3 大因素驱动:新能源汽车电气化架构成熟(提供稳定电源);消费者对舒适性需求提升;玻璃轻量化(较传统遮阳帘减重 30%)降低整车能耗。

5.2 建筑与航空领域

建筑调光玻璃市场以节能降耗和空间智能化为核心诉求。根据监测数据,建筑能源损耗约占总能耗的 25% 以上,其中门窗能耗占建筑能耗的 50%,而玻璃传导损失占 70%。调光玻璃可通过动态调节透光率,有效降低空调负荷——当室外温度过高时,调至雾态或深色状态可反射太阳辐射(图 12)。



图 12 调光产品在建筑领域的应用案例

Fig. 12 Application case of dimming products in the construction field

PDLC 玻璃在建筑隔断领域占据主导,国内 90% 以上调光玻璃厂商采用该方案。其断电雾化特性适用于会议室、酒店浴室等隐私场景,且支持投影功能,白天作电子窗帘,夜间可变为广告幕墙。上海隆昇公司的 PDLC 隔断墙已应用于多个高端写字楼。

无机 EC 技术凭借超低能耗、光谱精准调控及长寿命,已成为高端绿色建筑的核心选项。无

机 EC 技术的发展需突破成本与工艺瓶颈,未来将深度融合数字网(AI 动态调光)、能源网(光伏联动)与生态网(碳汇抵消),从单体建筑扩展至智慧园区集群。随着“八网融合”战略推进,以无锡项目为范本的“零碳建筑细胞群”将加速无机 EC 技术从示范走向规模化落地。

染料液晶的快速响应为建筑赋能独特的艺术效果,利用窗格拼接,结合透过率的差异,可以在玻璃幕墙显示不同的图案。基于染料液晶的快速响应,可实现图案的快速切换。另外,群创光电公司利用废液晶制作的调光窗,其暗态透光率 $< 40\%$,亮态 $> 70\%$,符合节能建筑标准。这种“废液晶材料高值化”模式既减少电子垃圾,又降低材料成本,实现了双碳目标。

在航空领域,电致变色舷窗已成为主流配置。波音 787 梦想客机、空客 A350XWB 均采用 EC 技术替代传统遮光板。其优势包括:无物理遮光板,扩大视野;统一机组控制(起飞和降落时强制调亮);深色模式可阻挡 99.999% 太阳光。EC 舷窗结构复杂,由 5 层功能膜组成(电致变色层、离子导体层、离子存储层夹在两层导电层之间),通过 H^+ 或 Li^+ 迁移实现变色,工作电压仅需 $\pm 3\text{ V}$ 。

5.3 消费电子与新兴应用

消费电子成为调光技术新增长点,产品形态从防眩眼镜扩展到智能显示领域,EC 变色眼镜是当前最成熟的应用。伯宇公司已推出电致变色滑雪镜和智能眼镜,利用 EC 材料在强光下自动变深来保护用户视力(图 13)。与传统变色镜依赖紫外线不同,EC 眼镜可通过按钮主动控制,适用场景更广。Xreal 公司旗下产品 VITURE One 可调至最高约 80% 的遮光,显示最高可到 120 Hz、亮度规格因机型而不同,广泛应用于日常出行、户外运动等情况,通过按键式快速匹配外部环境光强。Gauzy 公司采用 SPD 方案可阻



图 13 调光产品在消费电子领域的应用案例

Fig. 13 Application case of dimming products in the field of consumer electronics

挡高达约99%的入射光,支持连续调光,与显示/传感/AR算法联动,有望在智能可穿戴技术领域迎来突破。

智能调光膜结合物联网技术,拓展家居应用。Sonet Film公司推出0.4 mm厚WiFi调光膜,用户通过手机APP实现1 s切换透明/雾化状态,适用于住宅、办公室玻璃隔断。群创公司的循环液晶调光窗进一步与智能家居系统整合,根据环境光线自动调节透光度,提升生活舒适度。索尼公司发布了机内液晶电驱动可调成像模组,放置在感光元件前可自动维持曝光,实现连续调节,消除换镜/拧滤镜成本,视频曝光过渡平滑。

透明显示融合调光技术创造新体验。京东方公司的智慧视窗在调光侧窗上集成透明显示功能,实现人车交互。汽车天幕结合PDLC和投影技术,可在玻璃上呈现广告或导航信息。未来调光玻璃将从“被动调节”转向“主动交互”,成为智能生态系统接口。

6 技术挑战与发展趋势

6.1 当前技术瓶颈

尽管调光技术发展迅速,但仍面临多方面挑战^[62-65],主要技术瓶颈如下:

(1)寿命与可靠性问题。EC玻璃的电解质层长期使用后可能出现性能衰减,影响变色均匀性;SPD的高电压工作环境加速材料老化;PDLC类产品长期辐照可能会发黄老化;DLC类产品染料受阳光辐照及温度影响大,长期高温环境会加速染料分解;汽车EC天幕需确保8~10年使用寿命,对材料稳定性要求严苛;大尺寸、高曲率产品存在制造瓶颈,EC技术随面积增大响应时间延长($\sim 5 \text{ min/m}^2$),且曲面玻璃涂覆电致变色层厚度均匀性难以控制;SPD虽可大尺寸应用,但110 V高压存在安全隐患;染料液晶在磁悬浮列车侧窗的成功应用提供了新思路,但受限于刚性基底,尚未在乘用车等大曲率场景大面积推广。

(2)成本与市场化障碍。SPD玻璃成本高达数千元/ m^2 ,主要用于豪华车;EC后视镜成本虽降至百元级,但仍高于传统镜片;建筑领域EC幕墙的高造价(普通玻璃5倍以上)制约其普及应用。

(3)技术标准缺失。调光玻璃缺乏统一评价体系,隔热率、响应速度、寿命等参数测试方法各

异,影响产品的横向比较。行业亟需建立类似汽车玻璃“3C认证”的标准体系。

6.2 未来发展方向

调光技术正向高性能、智能化、可持续3个维度演进:

(1)材料创新突破。开发低黏度、高相转移温度的液晶材料(如偶氮/蒽醌混合染料),提升响应速度和环境适应性;研究固态电解质替代液态体系,解决EC玻璃漏液问题。

(2)多功能集成。调光玻璃与透明显示、光伏发电技术融合,如京东方公司的智慧视窗集成透明按键,实现人车交互;EC天幕结合太阳能电池,在遮阳的同时收集能量;群创公司的循环液晶技术推动“废弃物全循环化”,将废液晶转化为高附加值产品。

(3)智能化控制升级。基于物联网的AI算法优化光线调节,如Sonet Film公司的WiFi调光膜支持手机远程控制;结合光强传感器和建筑管理系统(BMS),动态平衡自然采光与节能需求。

(4)成本下降与普及加速。随着EC后视镜国产化(创欣公司的产能达500万片/年),成本降至百元级,渗透率从高端车向中端车下沉;染料液晶利用回收材料降低成本,群创公司的项目使废液晶利用率达95%。

7 结论与展望

调光技术已形成多元化技术路线并行的产业格局,各类技术在性能、成本和应用场景上呈现互补关系。PDLC凭借成熟工艺和快速响应,在建筑隔断和汽车隐私窗领域保持优势;电致变色(EC)以低功耗、连续调光特性,主导防眩后视镜市场并拓展至大尺寸天幕;SPD虽在高端汽车遮光领域表现优异,但高成本和高电压限制其普及;染料液晶作为新兴技术,凭借高通透性和快速响应,在高速列车和绿色建筑中崭露头角。

从市场前景看,汽车领域将成为最大增长点,特别是新能源汽车渗透率提升和天幕玻璃普及,推动智能调光玻璃需求激增。建筑领域在“双碳”目标下,节能调光窗市场空间广阔。消费电子领域,电致变色眼镜和智能调光膜等产品将走入大众生活。未来竞争格局将呈现技术融合与应用分化并存:一方面,PDLC与投影显示、EC

与透明显示、染料液晶与循环经济深度结合;另一方面,各类技术针对细分场景优化,如EC专注连续调光需求,PDLC满足快速隐私保护,SPD服务高端遮光市场。中国企业如创欣科技(EC)、京东方(DLC)、隆昇光电(PDLC)正加速

技术突破和国际化布局,推动全球调光产业格局重构。随着材料创新、智能化升级和成本下降,调光技术将从高端应用向大众市场普及,最终成为“智能生活基础设施”的重要组成部分,重新定义人与光线的关系。

参 考 文 献:

- [1] 姜利海,刘培荣,王志浩,等. 电驱动智能窗[J]. 自然杂志,2025,47(4):281-288.
JIANG L H, LIU P R, WANG Z H, *et al.* Electric-driven smart window [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2025, 47(4): 281-288. (in Chinese)
- [2] 陈怡,徐征,孙金礼,等. 大面积智能电致变色玻璃的产业化现状及未来[J]. 功能材料,2013(17):2441-2446.
CHEN Y, XU Z, SUN J L, *et al.* Commercialization of large area electrochromic smart glasses: present and future [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013(17): 2441-2446. (in Chinese)
- [3] 张文霞,贾岩,程海峰,等. 全固态电致变色器件研究进展[J]. 材料导报,2025,39(1):40-50.
ZHANG W X, JIA Y, CHENG H F, *et al.* Research progress on all solid state electrochromic devices [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(1): 40-50. (in Chinese)
- [4] LIU T N. Multi-color smart PDLC film and in-vehicle smart film structure: US, 10948788B2 [P]. 2021-03-16.
- [5] LIANG X, CHEN M, GUO S M, *et al.* Programmable electro-optical performances in a dual-frequency liquid crystals/polymer composite system [J]. *Polymer*, 2018, 149: 164-168.
- [6] WANG L, LUO S L, LIU S H, *et al.* Mechanism of the effect of gel doping on the electro-optical properties of PDLC [J]. *Liquid Crystals*, 2024, 51(12): 1980-1994.
- [7] HEMAIDA A, GHOSH A, SUNDARAM S, *et al.* Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing [J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 185-193.
- [8] YANG H, MISHIMA K, MATSUYAMA K, *et al.* Thermally bandwidth-controllable reflective polarizers from (polymer network/liquid crystal/chiral dopant) composites [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(15): 2407-2409.
- [9] ZHANG L P, HE W L, YUAN X T, *et al.* Broadband reflection characteristic of polymer-stabilised cholesteric liquid crystal with pitch gradient induced by a hydrogen bond [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(10): 1275-1280.
- [10] BIAN Z Y, LI K X, HUANG W, *et al.* Characteristics of selective reflection of chiral nematic liquid crystalline gels with a nonuniform pitch distribution [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(20): 201908.
- [11] WU Y L, ZHAO Y Z, WANG D. Preparation of progressive driving bilayer polymer-dispersed liquid crystals possessing a PDLC-PVA-PDLC structure [J]. *Molecules*, 2024, 29(2): 508.
- [12] CHEN X W, WANG L, CHEN Y J, *et al.* Broadband reflection of polymer-stabilized chiral nematic liquid crystals induced by a chiral azobenzene compound [J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(6): 691-694.
- [13] WU Y L, ZHAO Y Z, LI X, *et al.* Preparation and characterization of bilayer polymer-dispersed liquid crystals doped with Gd₂O₃ nanoparticles and Rhodamine B base fluorescent dye [J]. *Molecules*, 2024, 29(5): 1126.
- [14] LU Y F, YANG D L, GAO H, *et al.* Enhanced electro-optical properties of polymer-dispersed liquid crystals co-doped with fluorescent molecules and nanoparticles for multifunctional applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149654.
- [15] ZHONG Z L, ZHAO Y Z, LI X, *et al.* Preparation of polymer dispersed liquid crystal doped with bilayer nanofiber membranes and phase-change microcapsule coating for enhanced infrared modulation [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(45): e56202.
- [16] GRANQVIST C G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 564: 1-38.
- [17] 张翔,李文杰,李焱,等. 无机全固态电致变色器件研究进展[J]. 材料科学与工艺,2020,28(3):140-149.
ZHANG X, LI W J, LI Y, *et al.* Research progress of inorganic all-solid-state electrochromic devices [J].

- Materials Science and Technology*, 2020, 28(3): 140-149. (in Chinese)
- [18] 王美涵,高源,魏丽颖,等. 纳米结构非晶/晶态双相 WO₃薄膜研究进展[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2022, 34(5):339-345.
WANG M H, GAO Y, WEI L Y, *et al.* Research progress of nanostructured WO₃ Thin films with amorphous/crystalline dual phase [J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2022, 34(5): 339-345. (in Chinese)
- [19] 李古月,郑天翔,蒋达,等. 网络状 WO₃/聚噻吩纳米线杂化结构薄膜的电致变色性能[J]. 机械工程材料,2021, 45(2):49-54,95.
LI G Y, ZHENG T X, JIANG D, *et al.* Electrochromic properties of reticular tungsten trioxide/polythiophene nanowire hybrid structure film [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(2): 49-54, 95. (in Chinese)
- [20] ZHANG S L, PENG Y T, ZHAO J, *et al.* Amorphous and porous tungsten oxide films for fast-switching dual-band electrochromic smart windows [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(1): 2202115.
- [21] PAN J B, WANG Y, ZHENG R Z, *et al.* Directly grown high-performance WO₃ films by a novel one-step hydrothermal method with significantly improved stability for electrochromic applications [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(23): 13956-13967.
- [22] CAI G F, WANG X L, ZHOU D, *et al.* Hierarchical structure Ti-doped WO₃ film with improved electrochromism in visible-infrared region [J]. *RSC Advances*, 2013, 3(19): 6896-6905.
- [23] ZHAO Y M, ZHANG X, CHEN X, *et al.* Preparation of WO₃ films with controllable crystallinity for improved near-infrared electrochromic performances [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(31): 11658-11666.
- [24] SHAO Z W, HUANG A B, CAO C C, *et al.* Tri-band electrochromic smart window for energy savings in buildings [J]. *Nature Sustainability*, 2024, 7(6): 796-803.
- [25] SHAO Z W, HUANG A B, MING C, *et al.* All-solid-state proton-based tandem structures for fast-switching electrochromic devices [J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(1): 45-52.
- [26] 孙孟莹,吕景春,徐红,等. 磷腈-紫精聚合物的合成与电致变色性能[J]. 高等学校化学学报,2020,41(6):1399-1406.
SUN M Y, LV J C, XU H, *et al.* Synthesis and electrochromic performance of phosphazene-viologen polymer [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2020, 41(6): 1399-1406. (in Chinese)
- [27] 金珊珊,陈宏书,王结良,等. 聚噻吩类电致变色材料的研究进展[J]. 高分子通报,2014(3):65-74.
JIN S S, CHEN H S, WANG J L, *et al.* Development of electrochromic materials based on polythiophene [J]. *Polymer Bulletin*, 2014(3): 65-74. (in Chinese)
- [28] ZHAO Q, WANG J K, AI X H, *et al.* Three-dimensional knotting of W₁₇O₄₇@PEDOT:PSS nanowires enables high-performance flexible cathode for dual-functional electrochromic and electrochemical device [J]. *InfoMat*, 2022, 4(4): e12298.
- [29] KALAGI S S, PATIL P S. Secondary electrochemical doping level effects on polaron and bipolaron bands evolution and interband transition energy from absorbance spectra of PEDOT:PSS thin films [J]. *Synthetic Metals*, 2016, 220: 661-666.
- [30] LU C H, HON M H, KUAN C Y, *et al.* A complementary electrochromic device based on W₁₈O₄₉ nanowire arrays and Prussian blue thin films [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(3): 1913-1918.
- [31] ZHANG L Y, XIONG S X, MA J, *et al.* A complementary electrochromic device based on polyaniline-tethered polyhedral oligomeric silsesquioxane and tungsten oxide [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(5): 625-629.
- [32] CAMURLU P, TOPPARE L. Dual type complementary colored polymer electrochromic devices based on conducting polymers of poly(hexanedioic acid bis-(2-thiophen-3-yl-ethyl ester) [J]. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2006, 43(3): 449-458.
- [33] LIN S Y, CHEN Y C, WANG C M, *et al.* Study of MoO₃-NiO complementary electrochromic devices using a gel polymer electrolyte [J]. *Solid State Ionics*, 2012, 212: 81-87.
- [34] KAO S Y, LIN Y S, HU C W, *et al.* Application of triphenylamine dendritic polymer in a complementary electrochromic device with panchromatic absorption [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 143: 174-182.
- [35] KANG J H, OH Y J, PAK S M, *et al.* Electrochromic device of PEDOT-PANI hybrid system for fast response

- and high optical contrast [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(12): 2040-2044.
- [36] SHEN K Y, HU C W, CHANG L C, *et al.* A complementary electrochromic device based on carbon nanotubes/conducting polymers [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98: 294-299.
- [37] HAN J, FREYMAN M C, FEIGENBAUM E, *et al.* Electro-optical device with tunable transparency using colloidal core/shell nanoparticles [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1343-1350.
- [38] FU H C, TANG Y X, ZHAN F, *et al.* Dual polymer electrochromic sunglasses with black to anti-blue-ray conversion based on new anti-blue-ray transparent polymer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 461: 141848.
- [39] WANG L B, ZHANG X, CHEN X, *et al.* A large-area, flexible, high contrast and long-life stable solid-state electrochromic device driven by an anion-assisted method [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(5): 1641-1648.
- [40] WU Z X, ZHAO Q, LUO X Y, *et al.* Low-cost fabrication of high-performance fluorinated polythiophene-based Vis-NIR electrochromic devices toward deformable display and camouflage [J]. *Chemistry of Materials*, 2022, 34(22): 9923-9933.
- [41] HUANG S Y, ZHANG Q Z, LI P D, *et al.* High-performance suspended particle devices based on copper-reduced graphene oxide core-shell nanowire electrodes [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(18): 1703658.
- [42] GHOSH A, NORTON B, DUFFY A. First outdoor characterisation of a PV powered suspended particle device switchable glazing [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 157: 1-9.
- [43] REN F Q, HUANG S Y, YANG F, *et al.* Diameter dependent transparency changes of nanorod-based large-area flexible smart window devices [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(47): 24157-24165.
- [44] HUANG S Y, ZHANG Q Z, YANG F, *et al.* A facile way for scalable fabrication of silver nanowire network electrodes for high-performance and foldable smart windows [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(17): 8620-8628.
- [45] 王志浩, 曾西平. 一种长径比可控的调光颗粒及其制备方法、应用: 中国, 116478456A [P]. 2023-07-25.
WANG Z H, ZENG X P. Dimming particle with controllable length-diameter ratio as well as preparation method and application of dimming particle: CN, 116478456A [P]. 2023-07-25. (in Chinese)
- [46] KIM S H, PARK G, KIM K B, *et al.* Optoelectrical properties of transparent conductive films fabricated with Ag nanoparticle-suspended emulsion under various formulations and coating conditions [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(7): 1191.
- [47] 王猛, 郑逸飞, 杨洪. 基于胆甾相液晶的结构色变色材料 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(1): 306-316.
WANG M, ZHENG Y F, YANG H. Cholesteric liquid crystal-based structural color-changing materials [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2025, 55(1): 306-316. (in Chinese)
- [48] LI Z, JU X Q, WANG C L, *et al.* Factors affecting the energy saving rate of dye-doped liquid crystal smart window in office buildings [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023, 54(S1): 908-911.
- [49] 卢浩典, 冯勇, 宋以俊. 基于透明薄膜电致发光及染料液晶技术的高铁车辆触摸调光车窗设计 [J]. 智慧轨道交通, 2021, 58(6): 11-15.
LU H D, FENG Y, SONG Y J. A touch-enabled dimmable window design for high-speed trains based on thin-film electroluminescent and dye liquid crystal technology [J]. *Smart Rail Transit*, 2021, 58(6): 11-15. (in Chinese)
- [50] LI Z, JU X Q, CHE C C, *et al.* Factors affecting the thermal performance of dye-doped liquid crystal smart window [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(1): 764-767.
- [51] KIM M, PARK K J, SEOK S, *et al.* Fabrication of microcapsules for dye-doped polymer-dispersed liquid crystal-based smart windows [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(32): 17904-17909.
- [52] SUN H T, XIE Z P, JU C, *et al.* Dye-doped electrically smart windows based on polymer-stabilized liquid crystal [J]. *Polymers*, 2019, 11(4): 694.
- [53] ZHU M M, CAO Y, LIANG Y G, *et al.* Polymer-stabilized fast-relaxation dye-doped cholesteric liquid crystals with a wide temperature range by thiol-Michael addition polymerization [J]. *Dyes and Pigments*, 2023, 219: 111628.
- [54] KIM S H, OH S W, YOON T H. Enhancement of absorption and haze with hybrid anchoring of dye-doped cholesteric liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14259-14266.
- [55] LI C C, TSENG H Y, CHEN C W, *et al.* Versatile energy-saving smart glass based on tristable cholesteric liquid

- crystals [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(8): 7601-7609.
- [56] GUO Q F, DU C H, DENG X K, *et al.* High performance polythiophene derivative with good electrochromic and energy storage properties electrochemically synthesized in boron trifluoride diethyl etherate [J]. *Dyes and Pigments*, 2023, 220: 111709.
- [57] LIN S, BAI X P, WANG H Y, *et al.* Roll-to-roll production of transparent silver-nanofiber-network electrodes for flexible electrochromic smart windows [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(41): 1703238.
- [58] NASTAŁ E, ŻURANŃSKA E, MUCHA M. Effect of curing progress on the electrooptical and switching properties of PDLC system [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 71(3): 455-463.
- [59] GUO J Q, LIANG Y, ZHANG S L, *et al.* Recent progress in improving strategies of metal oxide-based electrochromic smart window [J]. *Green Energy and Resources*, 2023, 1(1): 100007.
- [60] SHEN W, ZHANG H, MIAO Z, *et al.* Recent progress in functional dye-doped liquid crystal devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(6): 2210664.
- [61] WANG H K, CHOU C W, WANG C H, *et al.* Sustainable scheduling of TFT-LCD cell production: A hybrid dispatching rule and two-phase genetic algorithm [J]. *International Journal of Production Economics*, 2024, 278: 109412.
- [62] LUO Z Y, LI Y N Q, SEMMEN J, *et al.* Achromatic diffractive liquid-crystal optics for virtual reality displays [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 230.
- [63] WANG D, LI Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [64] WANG D, LI N N, LI Y L, *et al.* Large viewing angle holographic 3D display system based on maximum diffraction modulation [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(3): 18.
- [65] CAI W F, KONG D L, MA Z J, *et al.* Optically anisotropic, electrically tunable microlens arrays formed via single-step photopolymerization-induced phase separation in polymer/liquid-crystal composite materials [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(4): 28.

作者简介:



赵海燕,女,硕士,助理研究员,2007年于北京科技大学获得硕士学位,主要研究方向为智能调光玻璃材料的设计、制备与应用探索。E-mail: zhy@bpi.edu.cn



杨 槐,男,博士,教授,2002年于日本九州大学获得博士学位,主要从事功能性液晶材料、液晶复合材料的分子设计、微结构和性能调控及其在规模化加工过程中的关键技术等方面的研究。E-mail: yanghuai@pku.edu.cn



王 玲,男,博士,教授,2013年于北京科技大学获得博士学位,主要从事软物质智能材料、仿生智能材料和功能纳米材料的设计与制备及其在软体机器人、智能隐身、4D打印、能源和安全等领域的应用研究。E-mail: lwang17@tju.edu.cn