液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-13

液晶器件性能参数一体化测试平台及其在聚合物分散液晶器件优化中的应用

盖　烁[1],李一彤[2],任雨婷[1],邢红玉[1],叶文江[1*]

(1.河北工业大学 理学院,天津 300401;
2.香港科技大学(广州)未来技术学院,广东 广州 511453)

摘要:液晶器件的电光特性、响应时间和视角特性通常需要使用不同装置分别测量,测试过程中还需反复调整光路和样品位置,流程较为繁琐,也增加了保持各项测试条件一致的难度。针对上述问题,本文设计并搭建了一套液晶器件性能参数一体化测试平台。该平台集驱动信号发生、透射光强采集和样品角度自动调节于一体,可在同一光路下完成上述参数的测量。在此基础上,进一步将该平台应用于聚合物分散液晶(PDLC)器件的性能测试与优化,系统研究聚合物单体组合、三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸酯(TMPTMA)与丙烯酸-2-乙基己酯(2-EHA)的质量比、液晶盒厚度和紫外固化时间对器件性能的影响。经过多轮筛选,单体组合初筛阶段样品A6的对比度为2.33;在TMPTMA与2-EHA质量比为1∶1、液晶盒厚度为10 μm、紫外固化时间为15 min的条件下,最终获得的D4对比度为14.5,上升时间和下降时间分别为2.9 ms和47.6 ms。最后,对优化器件进行视角特性表征,结果显示其在不同观察方向下的对比度总体分布较为均匀。综上,该平台实现了液晶器件多参数性能的集成化测试,避免了不同参数测量间的样品转移和光路调整,可用于液晶器件的性能比较与工艺优化,为液晶器件综合性能测试提供了一种集成度较高且成本较低的实验方案。

关　键　词:液晶器件;一体化测试;聚合物分散液晶;电光特性;响应时间;视角特性
中图分类号:O753^{+}.2　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0164　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0164

An integrated test platform for performance characterization of liquid crystal devices and its application to the optimization of polymer-dispersed liquid crystal devices

GE Shuo[1], LI Yitong[2], REN Yuting[1], XING Hongyu[1], YE Wenjiang[1*]

(1. *School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;
2. *College of Future Technology, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou* 511453, *China*)

Abstract: The electro-optical characteristics, response time, and viewing-angle characteristics of liquid crystal devices are typically measured using separate instruments. Repeated adjustments of the optical path

收稿日期:2026-08-25;**修订日期**:2026-11-03.
基金项目:河北省自然科学基金(No. A2023202014);河北工业大学本科教育与教学改革研究项目(No. 202401028)
Supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. A2023202014); the Undergraduate Education and Teaching Reform Research Project of Hebei University of Technology (No. 202401028)
*通信联系人,E-mail:wenjiang_ye@hebut.edu.cn

and sample position are also required during measurement, making the process relatively complicated and increasing the difficulty of maintaining consistent test conditions across different measurements. To address these issues, an integrated test platform was designed and constructed for the performance characterization of liquid crystal devices. The platform integrates driving signal generation, transmitted light intensity acquisition, and automatic adjustment of sample orientation, allowing the above parameters to be measured using the same optical path. The platform was further applied to the performance testing and optimization of polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) devices. The effects of polymer monomer combinations, the mass ratio of trimethylolpropane trimethacrylate (TMPTMA) to 2-ethylhexyl acrylate (2-EHA), cell gap, and ultraviolet curing time on device performance were systematically investigated. After multiple rounds of screening, sample A6 had a contrast ratio of 2.33 in the initial monomer-combination screening stage. At a TMPTMA-to-2-EHA mass ratio of 1∶1, a cell gap of 10 μm, and an ultraviolet curing time of 15 min, the final sample D4 had a contrast ratio of 14.5, with a rise time of 2.9 ms and a fall time of 47.6 ms. Finally, viewing-angle characterization of the optimized device showed that its contrast-ratio distribution was relatively uniform across different viewing directions. In conclusion, the platform enables integrated measurement of multiple performance parameters of liquid crystal devices, avoids sample transfer and optical-path adjustment between different measurements, and can be used for the performance comparison and process optimization of liquid crystal devices. It provides a highly integrated and low-cost experimental solution for comprehensive performance testing of liquid crystal devices.

Key words: liquid crystal device; integrated testing; polymer-dispersed liquid crystal; electro-optical characteristics; response time; viewing-angle characteristics

1 引　　言

电光特性、响应时间和视角特性是评价液晶器件性能的重要参数，也是液晶显示与光学调控器件研究中常用的表征内容[1-3]。近年来，液晶光学研究已涉及可拉伸手性液晶弹性体的光学加密[4]、矢量全息[5]和液晶透镜[6]等方向。更广泛的光学调控研究还包括碳化硅衍射波导增强现实显示[7]、硅藻仿生结构的太赫兹Talbot效应[8]及面向空间光通信的电光材料光束偏转[9]。当同一器件需要完成多项测试时，通常需要在不同测量环节之间转移样品，并重新调整光路和样品位置；在多组器件的比较实验中，上述操作还需反复进行，不仅增加了实验工作量，也不利于保持各项测试条件一致。因此，将多项测量功能集成于同一平台，减少测试过程中的样品转移和光路调整，对于液晶器件的性能比较与工艺优化具有实际意义。

聚合物分散液晶(polymer-dispersed liquid crystal，PDLC)由液晶微滴分散于聚合物基体中形成，是一类典型的电控光散射材料[10-12]。在未施加电场时，液晶分子取向较为杂乱，液晶微滴与聚合物基体之间的折射率不匹配，入射光发生散射；施加足够强的电场后，液晶分子沿电场方向排列，散射减弱，器件的透过率提高[10,12]。PDLC具有结构简单、响应较快和易于大面积制备等特点，可用于智能窗、调光器件和投影显示等领域[11,13-17]。

PDLC器件的性能与材料组成和制备条件密切相关。单体的分子结构、官能度及组分比例会影响聚合反应和相分离过程[18-20]，并改变聚合物网络形貌及液晶微滴的尺寸和分布，进而影响器件的关态透过率、驱动电压、对比度和响应时间[21-26]。液晶盒厚度会改变光在器件中的传播过程及内部电场强度，其对透射性能、驱动电压和响应时间的影响已在相关研究中得到讨论[27-28]。紫外光强、固化时间和固化温度等条件会影响聚合速率与相分离过程，从而改变PDLC器件的微观结构和电光性能[29-33]。

基于此，本文设计并搭建了一套液晶器件性能参数一体化测试平台，集驱动信号发生、透射光强采集和样品角度自动调节于一体，可在同一光路下完成液晶器件电光特性、响应时间和视角特性的测量。在此基础上，以PDLC器件为研究

对象,首先比较3种聚合物单体构成的7种组合,筛选出TMPTMA与2-EHA单体组合;随后依次分析二者质量比、液晶盒厚度和紫外固化时间对器件性能的影响,并对优化器件进行视角特性表征,完成液晶器件多项性能参数的一体化测量和PDLC器件的逐步优化。

2　实验装置与方法

2.1　一体化测试平台

液晶器件性能参数一体化测试平台的整体结构及功能模块如图1(a)所示,主要包括光路模块、视角转动模块、驱动信号发生模块和光强采集模块。驱动信号发生模块用于向待测器件施加设定频率和幅值的交流方波,光强采集模块用于记录器件透射光强随驱动电压或时间的变化。各模块主要由易于获取的部件构成。与分别搭建电光特性、响应时间和视角特性测试装置相比,共用光源、光强探测器及器件夹持器减少了重复部件配置,整体搭建成本较低。

视角转动模块的结构如图1(b)所示,由水平电动转台、轴向电动转台和器件夹持器组成,通过两个转台调节器件相对于光路的方向。安装器件时,调整夹持器的位置,使激光束通过器件有效测试区域的中心。两个转台与器件夹持器相互配合,可在保持入射端和接收端位置不变的情况下调节器件方向,实现不同观察方向下的测量。

光路模块的具体结构如图1(c)所示,主要包括半导体激光器、可调光阑、两片偏振片、器件夹持器、硅光探头及光学支撑件。搭建光路时,通过调节各光学元件的位置,使其中心保持同轴等高。激光束依次经过可调光阑和第一片偏振片后入射待测器件,透射光经过第二片偏振片后由硅光探头接收。测试PDLC器件时,两片偏振片的透振轴保持平行,电光特性、响应时间和视角特性测量均采用该配置。通过上述模块的配合,

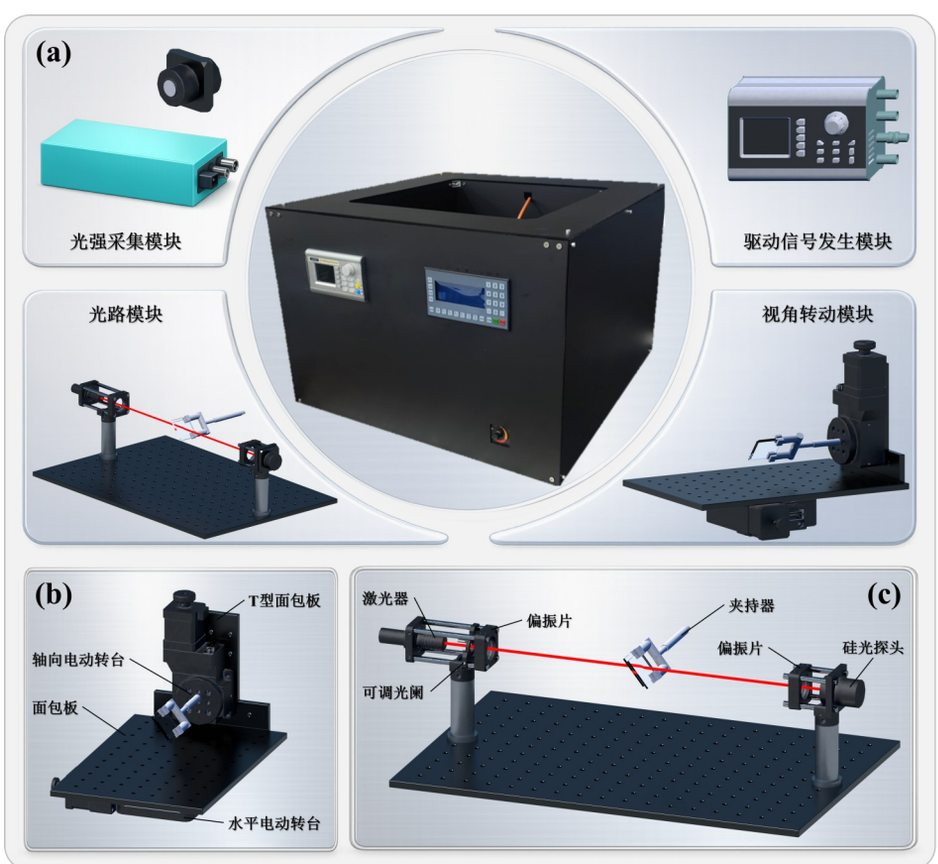


图1　液晶器件性能参数一体化测试平台。(a)整体结构与功能模块;(b)视角转动模块;(c)光路模块。

Fig. 1　Integrated test platform for performance characterization of liquid crystal devices. (a) overall structure and functional modules; (b) viewing-angle rotation module; (c) optical path module.

平台可在同一光路中完成电光特性、响应时间和视角特性的测量。三项测量依次进行：电光特性测量时调节驱动电压并逐点记录光强，响应时间测量时切换至周期驱动并连续采样，视角特性测量时启用电动转台并逐角度记录光强。同时，为减小环境光的影响，测试均在遮光箱内进行。

2.2 测量方法与参数定义

进行电光特性测量时，采用波长为630 nm的半导体激光器作为测试光源。将待测器件固定在光路中，施加频率为1 kHz的交流方波，并从0 V开始逐步提高驱动电压。驱动电压采用万用表交流挡测得的有效值。在测量每个样品前，于相同光路条件下记录空气基线光强，并以器件透射光强与空气基线光强的比值作为归一化透过率。阈值电压和饱和电压分别定义为归一化透过率达到总变化量10%和90%时对应的驱动电压，对比度定义为饱和电压下透过率与0 V下透过率之比[20,27]。

进行响应时间测量时，驱动信号的周期为2 s，其中0 V持续1 s，随后施加频率为128 Hz的交流方波1 s，驱动电压设为略高于待测器件的饱和电压。上位机每次连续采集5 s内的透射光强变化，实际采样率为2.4 kS/s，对应的采样间隔约为0.417 ms。上升时间定义为透过率由总变化量的10%升至90%所需的时间，下降时间定义为透过率由90%降至10%所需的时间[34]。

视角特性测量原理如图2所示。图2(a)给出了扫描过程中器件处于不同方向时的平台状态，图2(b)展示了相应的器件与入射光束的相对位置关系。测量过程中，入射端和接收端保持固定，通过两个电动转台改变器件相对于光路的方向。本文对观察角0°~50°范围内的视角特性进行测量，两个转台的角度间隔均设为2°。在各角度组合下，分别记录器件在0 V和固定驱动电压61.5 V下的透射光强，并按照前述定义计算对比度，得到器件在不同观察方向下的对比度分布。

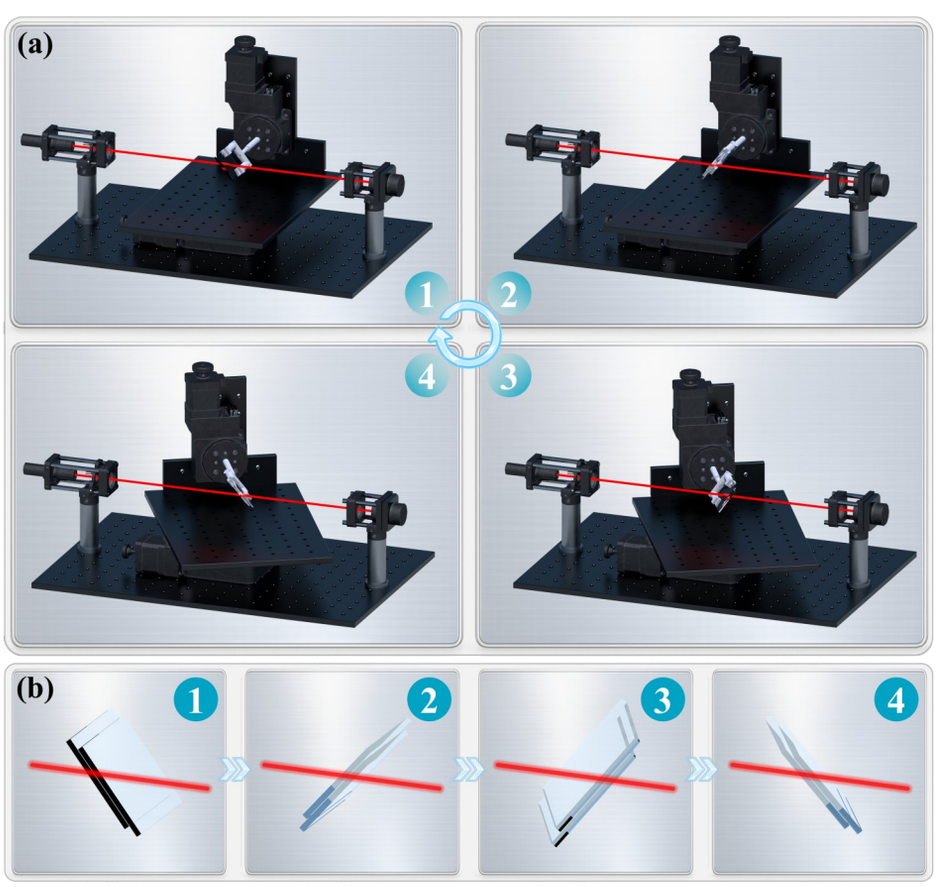


图2 液晶器件视角特性测量原理。(a)器件转动过程；(b)器件与入射光束的相对位置。

Fig. 2 Principle of viewing-angle characterization for liquid crystal devices. (a) sample rotation during scanning; (b) relative positions of the sample and incident beam.

2.3　实验材料与PDLC器件制备

实验采用向列相液晶E7、可聚合单体三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸酯(TMPTMA)、甲基丙烯酸异冰片酯(IBOMA)、丙烯酸-2-乙基己酯(2-EHA,CAS号:103-11-7)和光引发剂2,4,6-三甲基苯甲酰基二苯基氧化膦(TPO)。

PDLC器件的制备流程如图3(a)所示。按照设定配方称取E7、聚合物单体和TPO,三者组成前驱体系。其中,各样品的聚合物单体总质量与E7质量之比均为3:7,TPO质量占前驱体系总质量的1%。各组分经加热和超声处理20~30 min,混合均匀后用于器件制备。前驱液在每次使用前再次振荡并短时加热,以保持混合均匀。

将ITO玻璃置于盛有无水乙醇的烧杯中,超声清洗约20 min,取出并擦干备用。采用间隔子和紫外胶组装无取向液晶盒,再将前驱液灌入液晶盒。灌注完成后,将器件置于同一紫外光源下,照射距离保持为15 cm,并按照设定时间进行固化。所有器件均在室温下制备和测试。

PDLC器件的工作原理如图3(b)所示。未施加电压时,液晶微滴内的液晶分子取向不一致,入射光发生散射,器件处于关态;施加电压后,液晶分子沿电场方向排列,光散射减弱,透射光强增大,器件转变为开态。实验所用TMPTMA、IBOMA和2-EHA的分子结构以及示意图中各组成部分的图例如图3(c)所示。

为比较不同材料组成和制备条件对器件性能的影响,实验按照单体组合、单体质量比、液晶盒厚度和紫外固化时间的顺序进行。单体组合初筛采用3 μm液晶盒,紫外固化时间为1 min,分别制备以单一单体、两种单体等质量组合和三种单体等质量组合为聚合物组分的7组器件。在此基础上,对筛选出的TMPTMA与2-EHA体系进行比例实验,设置1:4、1:3、1:2、1:1、2:1、3:1

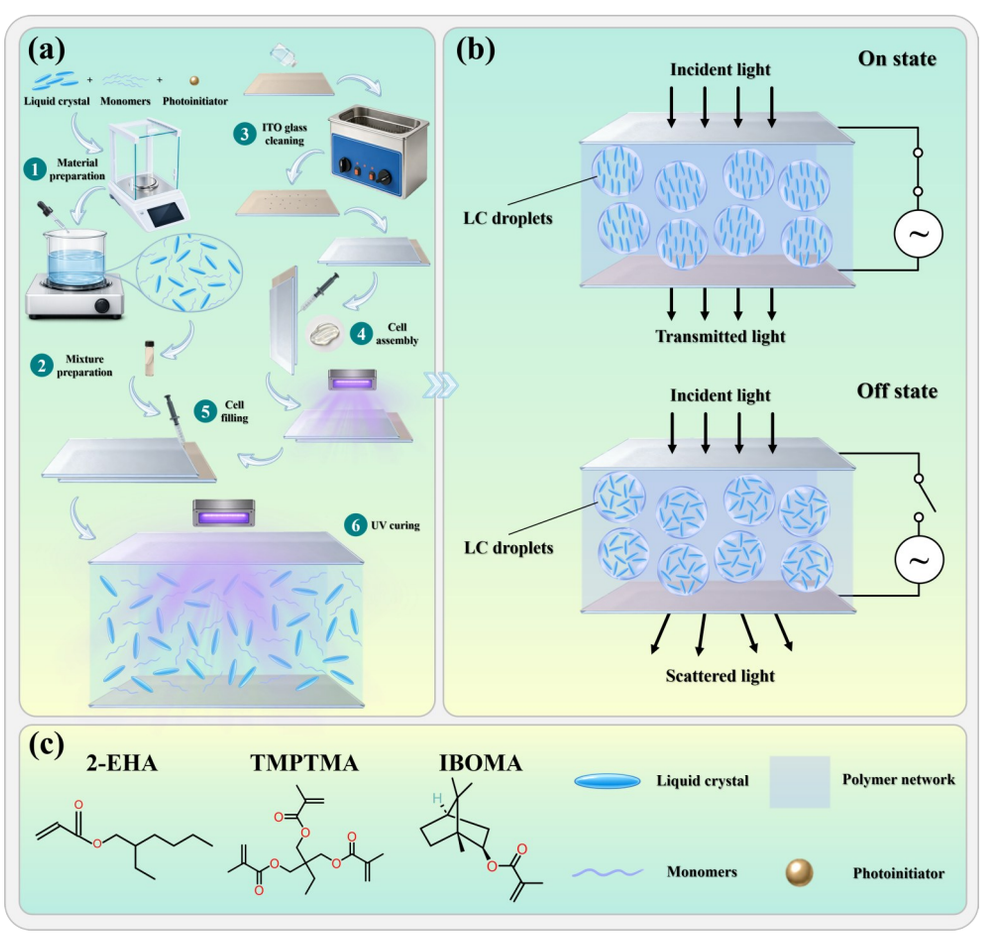


图3　PDLC器件制备与工作原理。(a)器件制备流程;(b)开态和关态的光传输;(c)聚合物单体结构及符号说明。

Fig. 3　Fabrication and operating principle of PDLC devices. (a) device fabrication process; (b) light propagation in the on and off states; (c) chemical structures of polymer monomers and symbols used in the schematics.

和4∶1共7组质量比。

确定TMPTMA与2-EHA质量比后，分别制备液晶盒厚度为3、5、7、10和15 μm的器件。盒厚实验完成后，在选定的单体质量比和液晶盒厚度条件下，将紫外固化时间分别设为1、5、10、15、20和25 min。各阶段仅改变所考察的变量，其余制备和测试条件保持一致。每一阶段根据该组样品的性能比较结果，确定下一阶段采用的单体组合、单体质量比或液晶盒厚度。为减小样品放置时间差异对测试结果的影响，所有器件均在制备后30 h内完成性能测试。

3 结果与讨论

3.1 单体组合的筛选

在液晶盒厚度为3 μm、紫外固化时间为1 min、聚合物单体总质量与E7质量比为3∶7的条件下，对IBOMA、TMPTMA和2-EHA构成的7种单体组合进行比较，对应样品A1～A7。各样品的偏光显微镜图像、电光特性、阈值电压与饱和电压、对比度和响应时间如图4所示。透过率、对比度等光学结果均对应630 nm单波长测试。图4～图7中的电压数据均为有效值。

聚合物单体的分子结构、官能度和空间构型会影响聚合物网络结构及PDLC器件的电光性能[18-22,35]。不同样品的偏光显微镜图像存在明显差异，其中A3和A5可见边界较为清晰的大尺度区域，如图4(a)～(g)所示。各图放大倍数均为300×。各样品的电光特性曲线见图4(h)。A1、A3和A5虽然在较低电压下即出现透过率变化，但0 V下的透过率较高；A2、A4和A7在测试电压范围内的透过率变化幅度较小。A6的归一化透过率由0 V下的约0.41增至饱和状态下的约0.96，具有七组样品中最大的透过率变化幅度。

各样品的驱动电压、对比度和响应时间列于图4(i)～(k)。A1～A5及A7的对比度为0.96～1.46，A6的对比度达到2.33，为7组样品中的最高值。A6的阈值电压和饱和电压分别为10.2 V

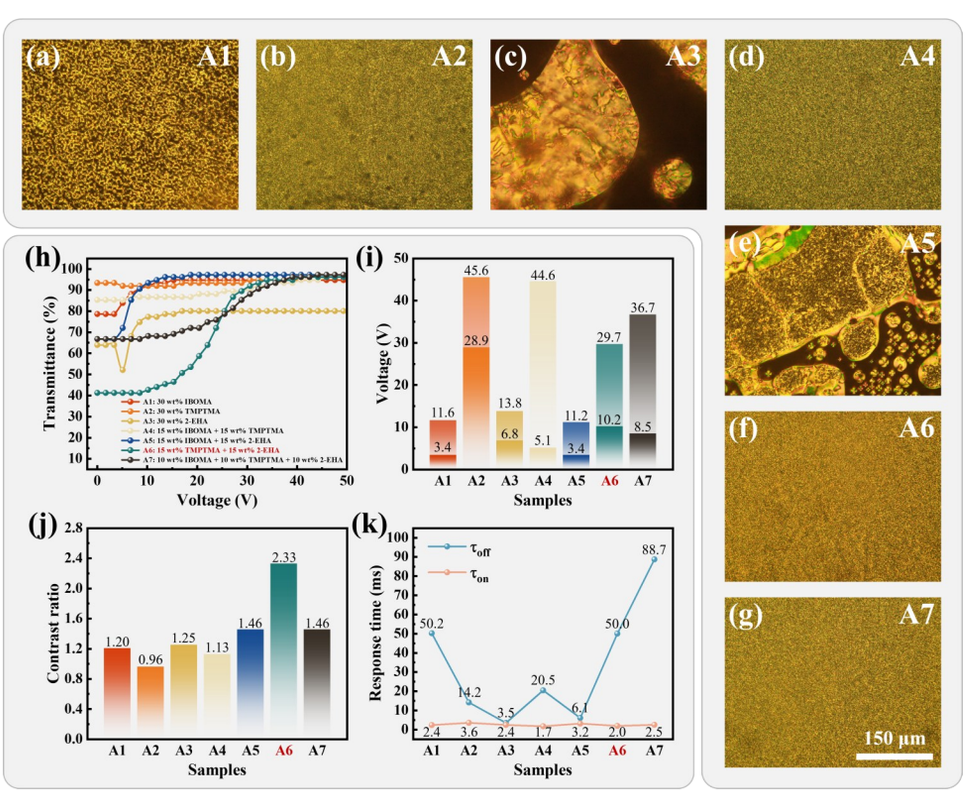


图4 不同聚合物单体组合制备的PDLC器件偏光显微镜图像及性能比较。(a)～(g)偏光显微镜图像，放大倍数均为300×，比例尺均为150 μm；(h)电光特性曲线；(i)阈值电压和饱和电压；(j)对比度；(k)响应时间。

Fig. 4 Polarized optical microscopy images and performance comparison of PDLC devices prepared using different polymer monomer combinations. (a)～(g) polarized optical microscopy images, all at 300× magnification; scale bar, 150 μm; (h) electro-optical characteristic curves; (i) threshold and saturation voltages; (j) contrast ratio; (k) response time.

和29.7 V,上升时间和下降时间分别为2.0 ms和50.0 ms。与其余样品相比,A6的关态透过率较低,透过率变化幅度和对比度均为最高,说明TMPTMA与2-EHA组合能够在较低关态透过率的基础上获得较大的透过率变化。因此,完成单体组合筛选后保留TMPTMA与2-EHA体系。为进一步确定两种单体的合适配比,下一阶段保持其他制备条件不变,比较TMPTMA与2-EHA质量比对器件性能的影响。

3.2　TMPTMA与2-EHA质量比的影响

在A6对应的TMPTMA与2-EHA体系中,保持液晶盒厚度为3 μm、紫外固化时间为1 min,改变两种单体的质量比,得到样品B1~B7。B4与单体组合初筛中的A6为同一样品,采用同一组测试数据。不同样品的电光特性、阈值电压与饱和电压、对比度和响应时间如图5所示。

各样品的电光特性曲线见图5(a)。TMPTMA与2-EHA质量比改变后,样品在0 V下的归一化透过率、透过率变化幅度和驱动电压均发生变化,但未随两种单体含量呈现简单的单调变化。2-EHA含量较高的B1~B3在0 V下的归一化透过率较高,且达到饱和状态所需的电压较高;TMPTMA含量较高的B5~B7具有相对较低的驱动电压,但其透过率变化幅度同样存在明显差异。

图5(b)和(c)给出了各样品驱动电压和对比度的比较结果。B1~B3的饱和电压为60.7~78.0 V,对比度为1.33~1.51;B5~B7的饱和电压为8.1~45.1 V,对比度为1.27~1.92。TMPTMA与2-EHA质量比为1∶1时,B4的阈值电压和饱和电压分别为10.2 V和29.7 V,对比度达到2.33,为7组样品中的最高值。B7的饱和电压最低,为8.1 V,但其对比度仅为1.33。

各样品的响应时间见图5(d)。B1~B7的上升时间为1.2~3.2 ms,差异较小;下降时间为15.7~115.1 ms,随单体质量比变化的波动较为明显。B7虽具有最低的饱和电压,但仅以驱动电压筛选样品不能兼顾对比度等指标。综合上述结果,将TMPTMA与2-EHA质量比固定为1∶1,并在下一阶段研究液晶盒厚度对器件性能的影响。

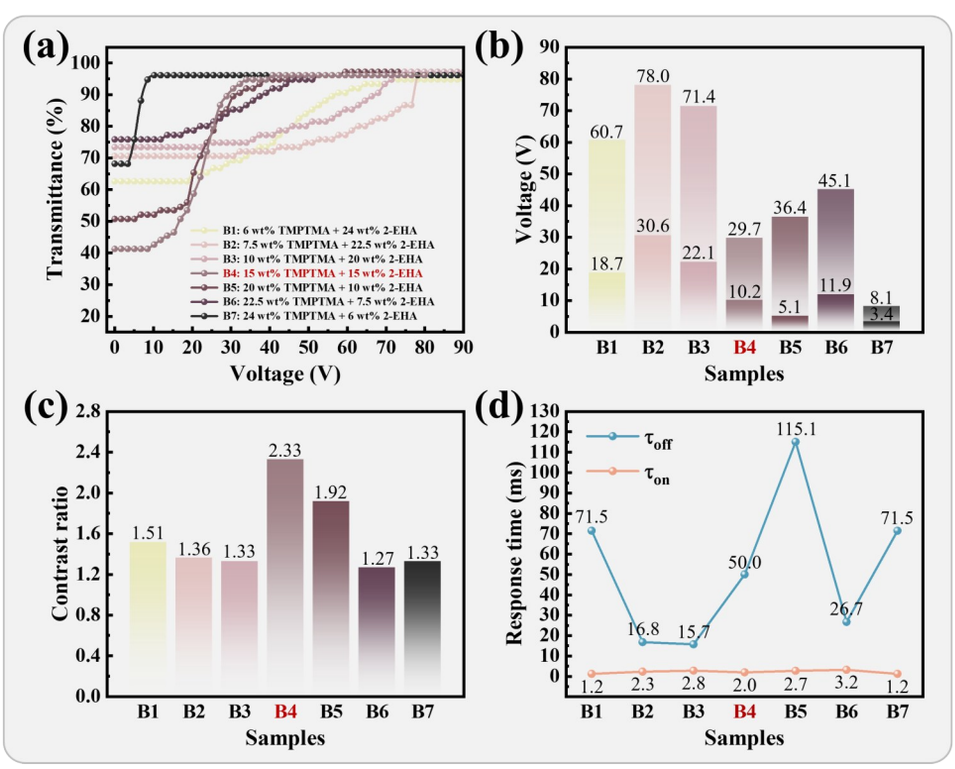


图5　TMPTMA与2-EHA质量比对PDLC器件性能的影响。(a)电光特性曲线;(b)阈值电压和饱和电压;(c)对比度;(d)响应时间。

Fig. 5　Effect of the TMPTMA-to-2-EHA mass ratio on the performance of PDLC devices. (a) electro-optical characteristic curves; (b) threshold and saturation voltages; (c) contrast ratio; (d) response time.

3.3 液晶盒厚度的影响

在TMPTMA与2-EHA质量比为1∶1、紫外固化时间为1 min的条件下，将液晶盒厚度分别设为3、5、7、10和15 μm，对应样品C1～C5，以研究液晶盒厚度对器件性能的影响。其中，C1与比例实验中的B4为同一样品，采用同一组测试数据。测试结果如图6所示。

不同厚度样品的电光特性曲线如图6(a)所示。随着液晶盒厚度增加，器件的关态透过率总体降低。液晶盒厚度由3 μm增加至15 μm时，阈值电压由10.2 V依次升至13.6、15.3、17.0和34.0 V，饱和电压由29.7 V依次升至37.0、47.2、47.6和82.4 V，如图6(b)所示。在本组样品中，增加液晶盒厚度能够降低关态透过率，但阈值电压和饱和电压也随之升高，这与相关研究报道的变化趋势一致[27-28]。

图6(c)给出了各样品的对比度。3、5和7 μm样品的对比度分别为2.3、1.8和2.5；液晶盒厚度增加至10 μm时，对比度提高至5.6；进一步增加至15 μm后，对比度为5.3。对比度随液晶盒厚度的变化并不单调，其中10 μm和15 μm样品的对比度明显高于其余样品，10 μm样品的对比度最高。

各样品的响应时间如图6(d)所示。C1～C5的上升时间分别为2.0、1.8、2.7、15.8和26.7 ms，下降时间分别为50.0、56.6、17.8、11.6和10.9 ms。随着液晶盒厚度增加，器件的上升时间总体延长，下降时间则有所缩短。与10 μm样品相比，15 μm样品的对比度由5.6降至5.3，阈值电压由17.0 V升至34.0 V，饱和电压由47.6 V升至82.4 V，上升时间由15.8 ms延长至26.7 ms，而下降时间仅由11.6 ms缩短至10.9 ms。液晶盒厚度由7 μm增加至10 μm时，对比度由2.5提高至5.6；继续增加至15 μm后，对比度不再提高，驱动电压和上升时间却明显增加。相比之下，10 μm样品具有更高的对比度、更低的驱动电压和更短的上升时间，仅下降时间比15 μm样品长0.7 ms。因此，将10 μm确定为后续紫外固化时间实验采用的液晶盒厚度。

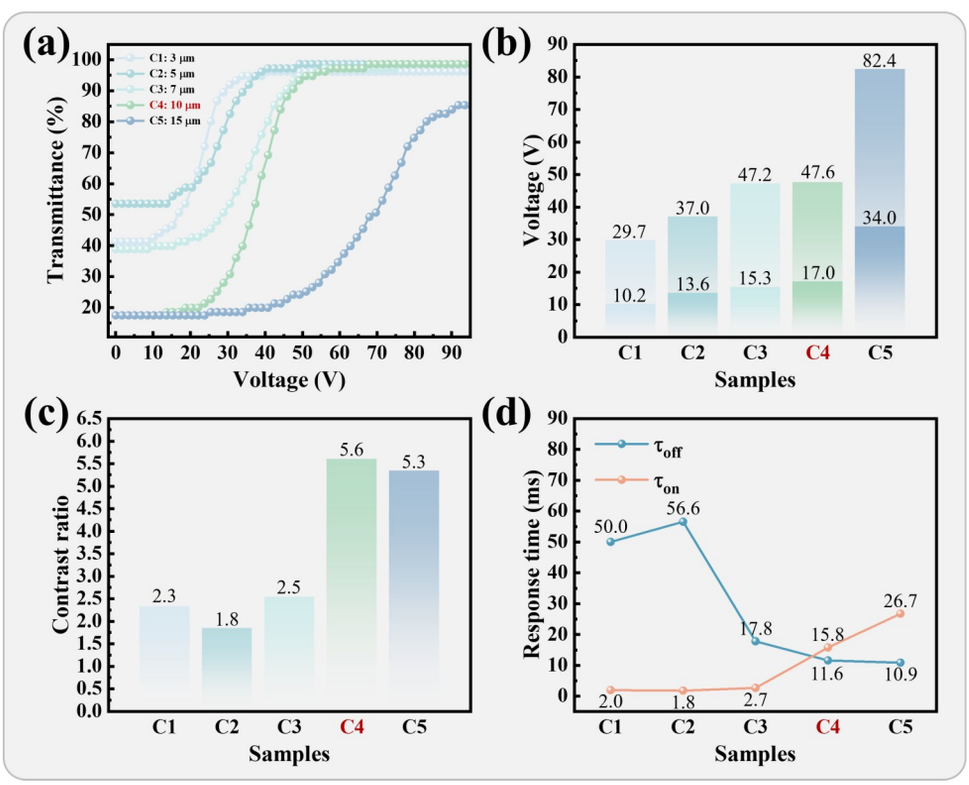


图6 液晶盒厚度对PDLC器件性能的影响。(a)电光特性曲线；(b)阈值电压和饱和电压；(c)对比度；(d)响应时间。

Fig. 6 Effect of cell gap on the performance of PDLC devices. (a) electro-optical characteristic curves; (b) threshold and saturation voltages; (c) contrast ratio; (d) response time.

3.4　紫外固化时间的影响

在确定液晶盒厚度后,保持TMPTMA与2-EHA质量比为1∶1、液晶盒厚度为10 μm,并将紫外固化时间分别设为1、5、10、15、20和25 min,对应样品D1~D6,以进一步研究紫外固化时间对器件性能的影响。其中,D1与盒厚实验中的C4为同一样品,采用同一组测试数据。测试结果如图7所示。

不同紫外固化时间下器件的电光特性曲线如图7(a)所示。随着紫外固化时间由1 min延长至15 min,器件的关态透过率逐渐降低,各样品饱和状态下的透过率差异较小;当紫外固化时间继续延长至20和25 min时,关态透过率再次升高。各样品的阈值电压和饱和电压如图7(b)所示,二者随紫外固化时间的变化均不呈单调规律。其中,D4的阈值电压和饱和电压分别为25.5 V和61.5 V。

由于各样品饱和状态下的透过率差异较小,对比度的变化主要来自关态透过率的差异。D1~D6的对比度分别为5.6、6.6、10.3、14.5、10.2和5.2,如图7(c)所示。紫外固化时间由1 min延长至15 min时,对比度由5.6提高至14.5;继续延长紫外固化时间后,对比度分别降至10.2和5.2。因此,对比度随紫外固化时间的延长呈先升高后降低的变化,其中D4的关态透过率最低,对比度最高。

图7(d)给出了各样品的响应时间。不同固化时间下器件的上升时间和下降时间同样未呈现单调变化。D4的上升时间和下降时间分别为2.9 ms和47.6 ms,其中上升时间处于较低水平,但下降时间相对较长。已有研究表明,紫外曝光强度和照射时间的变化会影响PDLC器件的关态透过率、驱动电压和响应时间[29-33]。本组实验中,随着紫外固化时间延长,器件的对比度先升高后降低,而驱动电压和响应时间未呈现同步变化。虽然D4的饱和电压相对较高,下降时间也较长,但其关态透过率最低、对比度最高,且上升时间仅为2.9 ms。考虑到后续视角测量主要考察高对比度器件在不同观察方向下的表现,在上述配方和工艺范围内选择D4作为较优样品,并进一步测量其视角特性。

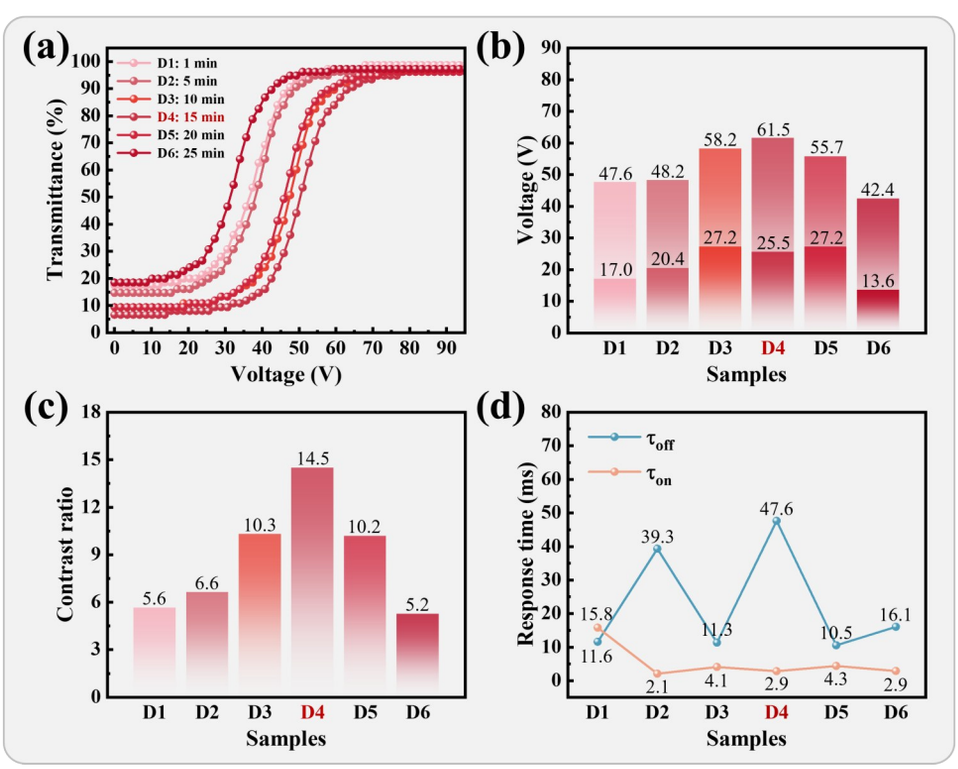


图7　紫外固化时间对PDLC器件性能的影响。(a)电光特性曲线;(b)阈值电压和饱和电压;(c)对比度;(d)响应时间。

Fig. 7　Effect of UV curing time on the performance of PDLC devices. (a) electro-optical characteristic curves; (b) threshold and saturation voltages; (c) contrast ratio; (d) response time.

3.5 优化器件的视角特性

在完成单体组合、单体比例、液晶盒厚度和紫外固化时间的逐步筛选后，选取D4进行视角特性测量。采用图2所示的视角转动模块，在观察角0°~50°范围内测量器件在不同观察方向下的对比度，所得分布如图8所示。

PDLC器件在倾斜观察时的透射与散射状态可能发生变化，其视角性能通常通过不同观察方向下的透过率、雾度或对比度进行评价[16,36-38]。

中心观察方向附近的对比度约为14.5，与正入射条件下的测量结果一致。在所测角度范围内，虽有局部较高和较低值，但这些区域较为分散，大部分区域的对比度处于相近范围，因此总体分布较为均匀。

上述结果同时表明，所搭建平台不仅能够完成液晶器件电光特性和响应时间的测量，还能够通过自动调节样品角度获得不同观察方向下的对比度分布，从而完成器件的视角特性表征。

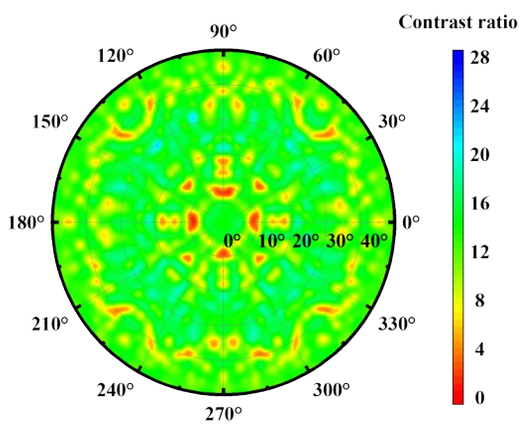


图8 优化PDLC器件在不同观察方向下的对比度分布

Fig. 8 Angular distribution of the contrast ratio of the optimized PDLC device

4 结 论

本文设计并搭建了一套液晶器件性能参数一体化测试平台，集驱动信号发生、透射光强采集和样品角度自动调节于一体，可在同一光路下完成液晶器件电光特性、响应时间和视角特性的测量。利用该平台，依次研究了聚合物单体组合、TMPTMA与2-EHA质量比、液晶盒厚度和紫外固化时间对PDLC器件性能的影响。

在所考察的7种单体组合中，采用TMPTMA与2-EHA制备的样品A6对比度最高，为2.33。在此基础上，通过调整两种单体的质量比、液晶盒厚度和紫外固化时间对器件进行逐步优化。当TMPTMA与2-EHA质量比为1∶1、液晶盒厚度为10 μm、紫外固化时间为15 min时，最终筛选得到的D4对比度为14.5，阈值电压和饱和电压分别为25.5 V和61.5 V，上升时间和下降时间分别为2.9 ms和47.6 ms。视角测量结果显示，优化器件在不同观察方向下的对比度总体分布较为均匀。

所搭建平台实现了液晶器件多项性能参数的一体化测量，避免了不同参数测量间的样品转移和光路调整，可用于液晶器件的性能比较与工艺条件筛选，为液晶器件综合性能测试提供了一种集成度较高且成本较低的实验方案。

参 考 文 献：

[1] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al*. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2018, 7: 17168.

[2] YIN K, HSIANG E L, ZOU J Y, *et al*. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2022, 11: 161.

[3] 李晓波, 王靖阁, 吴亮, 等. 超快响应液晶技术研究进展与展望[J]. 液晶与显示, 2025, 40(1): 187-200.
LI X B, WANG J G, WU L, *et al*. Progress and prospect of ultrafast response liquid crystal technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(1): 187-200. (in Chinese)

[4] NAM S, WOO S, PARK J Y, *et al*. Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2025, 14: 136.

[5] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al*. Vectorial liquid-crystal holography[J]. *eLight*, 2024, 4: 5.

[6] CHEN C P, XU M. Geometric-phase versus gradient-index: a showdown for ultimate liquid crystal lenses[J].

Light: *Advanced Manufacturing*, 2025, 6(4): 616-618.

[7] CHEN B Q, LI C, LI X X, *et al*. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction[J]. *eLight*, 2025, 5: 21.

[8] RESHETOVA M V, CVJETINOVIC J, KATYBA G M, *et al*. Talbot effect in diatom-inspired structures in the THz range[J]. *Light*: *Advanced Manufacturing*, 2026, 7(3): 638-647.

[9] 李富豪, 赵继广, 张建伟, 等. 面向空间光通信的电光材料光束偏转研究现状及应用前景[J]. 中国光学(中英文), 2026, 19(3): 455-468.
LI F H, ZHAO J G, ZHANG J W, *et al*. Research status and application prospects of beam deflection using electro-optic materials towards space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(3): 455-468. (in Chinese)

[10] ZHANG R C, ZHANG Z B, HAN J C, *et al*. Advanced liquid crystal-based switchable optical devices for light protection applications: principles and strategies[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2023, 12: 11.

[11] ZHANG H M, MIAO Z C, SHEN W B. Development of polymer-dispersed liquid crystals: from mode innovation to applications[J]. *Composites Part A*: *Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107234.

[12] DOANE J W, VAZ N A, WU B G, *et al*. Field controlled light scattering from nematic microdroplets[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(4): 269-271.

[13] QIN J, YUAN B H, YANG Y H, *et al*. A spectrum-tailored polymer dispersed liquid crystal film for energy-saving smart windows[J]. *Small*, 2025, 21(5): 2409347.

[14] KAMAL W, LI M M, LIN J D, *et al*. Spatially patterned polymer dispersed liquid crystals for image-integrated smart windows[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(3): 2101748.

[15] ZHANG Z W, ZHANG L N, XU J J, *et al*. A novel dual-functional flexible dimming film for smart window applications: energy saving and self-cleaning performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 150601.

[16] YU M N, XU J J, ZHANG L N, *et al*. Balanced electro-optical properties and off-axis haze performance of a polymer-dispersed liquid crystal film via refractive index matching[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(35): 23770-23782.

[17] 严静, 范相文, 屈科, 等. 基于聚合物分散液晶的图案化柔性智能窗户[J]. 液晶与显示, 2022, 37(1): 7-13.
YAN J, FAN X W, QU K, *et al*. Patterned flexible polymer dispersed liquid crystal smart windows[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 7-13. (in Chinese)

[18] 褚雅琴, 苗宗成, 朱文庆, 等. 预聚物对聚合物分散液晶薄膜形貌及电光性能的影响[J]. 液晶与显示, 2022, 37(9): 1122-1131.
CHU Y Q, MIAO Z C, ZHU W Q, *et al*. Influence of prepolymer on the morphology and electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal films[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(9): 1122-1131. (in Chinese)

[19] WHITE T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al*. Polymerization kinetics and monomer functionality effects in thiol-ene polymer dispersed liquid crystals[J]. *Macromolecules*, 2007, 40(4): 1112-1120.

[20] HE X, ZHANG Z W, ZHOU F X, *et al*. Study on the effect of α-substituted acrylate monomers on the electro-optical properties of polymer-dispersed liquid crystal films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(50): 58861-58872.

[21] 王雨蒙, 莫顺聘, 王晗, 等. 聚氨酯丙烯酸酯的分子结构对聚合物分散液晶形貌和性能的影响[J]. 液晶与显示, 2024, 39(10): 1285-1294.
WANG Y M, MO S P, WANG H, *et al*. Influence of the molecular structure of polyurethane acrylates on the morphology and properties of polymer dispersed liquid crystals[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(10): 1285-1294. (in Chinese)

[22] 曾腾, 何韬钰, 汪映寒. 单体烷基链长度对聚合物分散液晶膜电光性能的影响[J]. 液晶与显示, 2021, 36(10): 1362-1368.

ZENG T, HE T Y, WANG Y H. Effects of monomer alkyl chain length on electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal film[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1362-1368. (in Chinese)

[23] FENG Y, XU J J, YUAN B H, *et al*. The electrically controlled dimming film of thiol-vinyl ether system with low-voltage and high contrast ratio for smart windows[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 187: 108427.

[24] CHEN M, HU W, LIANG X, *et al*. The regulation of polymer structures and electro-optical properties of epoxy-mercaptan-based phase separated liquid crystals/polymer composites[J]. *Polymer*, 2017, 127: 1-7.

[25] CHEN C, ZHANG L N, ZHOU F X, *et al*. Heteroatom-terminated acrylate-based polymer-dispersed liquid crystal composite films with high contrast ratio and low driving voltage[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(45): 62627-62638.

[26] QIN J, CHEN C, YUAN B H, *et al*. Phenyl group-based fluorinated polymer dispersed liquid crystal composite films with high contrast ratio and low driving voltage[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 189: 108591.

[27] CHENG S X, BAI R K, ZOU Y F, *et al*. Electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(4): 1991-1995.

[28] YAMAGUCHI R, SATO S. Relationship between film thickness and electro-optical properties in polymer dispersed liquid crystal films[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, 33(7R): 4007-4011.

[29] YAN J, FAN X W, LIU Y F, *et al*. UV-patterned polymer dispersed liquid crystals: impact of UV curing on electro-optical properties of image-embedded smart windows[J]. *Applied Materials Today*, 2023, 32: 101840.

[30] LEGRANGE J D, CARTER S A, FUENTES M, *et al*. Dependence of the electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystals on the photopolymerization process[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(9): 5984-5991.

[31] CARTER S A, LEGRANGE J D, WHITE W, *et al*. Dependence of the morphology of polymer dispersed liquid crystals on the UV polymerization process[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(9): 5992-5999.

[32] 陈菲, 徐荣青, 李若舟, 等. 紫外光强对聚合物分散液晶电光特性的影响[J]. 液晶与显示, 2018, 33(8): 631-637.
CHEN F, XU R Q, LI R Z, *et al*. Effect of UV intensities on electro-optic properties of polymer dispersed liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(8): 631-637. (in Chinese)

[33] 董守梅, 万欣瑞, 张春梅, 等. 大分子光引发剂及固化时间对PDLC膜光电性能的影响[J]. 液晶与显示, 2009, 24(1): 48-51.
DONG S M, WAN X R, ZHANG C M, *et al*. Effect of macro-initiator and curing time on electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1): 48-51. (in Chinese)

[34] WU B G, ERDMANN J H, DOANE J W. Response times and voltages for PDLC light shutters[J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(5): 1453-1465.

[35] YU M N, HE X, QIN J, *et al*. Impact of crosslinking agents with steric cyclic groups on the properties of polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 26(9): 7388-7397.

[36] 赵宵向, 刘露露, 王一平, 等. 聚合单体对聚合物分散液晶薄膜视角电光特性的影响[J]. 液晶与显示, 2025, 40(3): 424-430.
ZHAO X X, LIU L L, WANG Y P, *et al*. Influence of polymeric monomers on the electro-optic properties of polymer dispersed liquid crystal films[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(3): 424-430. (in Chinese)

[37] GAI W Y, HAN Y, ZHANG M J, *et al*. Study on polymer dispersed liquid crystal films with wide viewing angle

[J]. *Liquid Crystals*, 2024, 51(5): 841-851.

[38] XU J J, ZHANG Z W, HE L X, *et al*. Liquid crystal/polymer composites for energy-efficient smart windows with a wide working temperature range and low off-axis haze [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 178: 107976.

作者简介:



叶文江,男,博士,教授,2011年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn



盖　烁,男,本科生,主要从事液晶器件性能测试、聚合物分散液晶器件制备及电光特性方面的研究。E-mail: 235596@stu.hebut.edu.cn