

基于聚合物分散液晶的图案化柔性智能窗户

严静, 范相文, 屈科, 于映, 李若舟

引用本文:

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 Jing, FAN Xiang-wen, QU Ke, et al. Patterned flexible polymer dispersed liquid crystal smart windows[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 7–13.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0283>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫外光强对聚合物分散液晶电光特性的影响

Effect of UV intensities on electro-optic properties of polymer dispersed liquid crystal

液晶与显示. 2018, 33(8): 631–637 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183308.0631>

改变直流电场方向调控聚合物稳定胆甾相液晶的反射带隙

Modulation of reflection band in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals by changing DC electric field direction

液晶与显示. 2021, 36(8): 1075–1083 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0061>

空间调制光传播方向及偏振态的多层图案化液晶聚合物薄膜研究

Multi-layer patterned liquid crystal polymer thin films for spatially modulating light propagation directions and polarizations

液晶与显示. 2017, 32(2): 84–90 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173202.0084>

反应温度对亲核试剂引发点击化学制备聚合物分散液晶电光性能的影响

Effects of reaction temperature on electro-optical properties of polymer-dispersed liquid crystal films fabricated by nucleophile-initiated thiol-ene click reaction

液晶与显示. 2017, 32(12): 968–972 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173212.0968>

基于单步曝光的光配向液晶器件研究及应用

Research and application: liquid crystal devices fabricated by single-exposure photoalignment

液晶与显示. 2021, 36(6): 761–771 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0032>

文章编号:1007-2780(2022)01-0007-07

基于聚合物分散液晶的图案化柔性智能窗户

严 静^{1*}, 范相文¹, 屈 科¹, 于 映^{1,2}, 李若舟^{1,2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 聚合物分散液晶(PDLC)在投影显示和智能窗户等领域具有广泛的应用,将器件实现图案化和柔性化能够进一步拓展其应用场景。本文提出了一种采用单步紫外曝光的方式制备图案化的 PDLC 柔性智能窗户。采用 PET-ITO 作为柔性基板制备液晶盒,并于器件上表面放置一层有特定紫外衰减率的图案化掩模板进行紫外固化,线宽为 120 μm 的图案能够清晰分辨。本文对图案化器件的不同区域的电光特性进行了研究,实验结果表明:采用高紫外光固化区域的 PDLC 具有较高的阈值电压和饱和电压。高紫外固化区域和低紫外固化区域上升时间分别为 4.1 ms 和 15.4 ms,下降时间分别为 14.1 ms 和 33.7 ms,满足智能窗户应用需求。通过施加不同的外加电场,该图案化智能窗户能够呈现全散射态、全透明态和图案化透明展示态 3 种模式。最后本文展示了器件处于平面状态和弯曲状态下施加不同驱动电压时该柔性智能窗户的展示效果。本研究采用上述单步紫外曝光方式制备的图案化 PDLC 柔性器件具有工艺简单、成本低、精度高等优势,有利于其在定制化图案的柔性智能窗户领域的广泛应用。

关键词: 聚合物分散液晶;智能窗户;图案化;柔性

中图分类号: O753⁺.2; TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2021-0283

Patterned flexible polymer dispersed liquid crystal smart windows

YAN Jing^{1*}, FAN Xiang-wen¹, QU Ke¹, YU Ying^{1,2}, LI Ruo-zhou^{1,2*}(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. National and Local Joint Engineering Laboratory of

RF Integration and Micro-Assembly Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Polymer dispersed liquid crystal (PDLC) is widely used in projection displays, smart windows and other fields. Patterned flexible smart window based on PDLC would further expand its application. In this paper, a patterned flexible PDLC smart window is demonstrated using one-step UV exposure. The PDLC precursor is sandwiched between two flexible PET-ITO substrates, and a layer of patterned mask with specific UV attenuation is attached on the cell for UV curing. The linewidth resolution of 120 μm is obtained for the proposed patterned flexible smart window. In this paper, the

收稿日期: 2021-11-08; **修订日期:** 2021-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11904177, No. 61704090); 南京邮电大学校级科研基金资助(No. NY218017)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11904177, No. 61704090); Scientific Research Fund of Nanjing University of Posts and Telecommunication(No. NY218017)

* 通信联系人, E-mail: jing.yan@njupt.edu.cn; lirez@njupt.edu.cn

different electro-optic characteristics of the different regions of patterned device are studied. The experimental results show that the PDLC with high UV curing region has high threshold voltage and saturation voltage. The rising times of high UV curing region and low UV curing region are 4.1 ms and 15.4 ms, and the decay times are 14.1 ms and 33.7 ms, meeting the application requirements of smart windows. By applying different voltages, the patterned smart window can present three modes: total scattering state, total transparent state and patterned transparent display state. Finally, the patterned smart window working in plane state and bending state are exhibited in the paper. This study shows that the patterned PDLC flexible device prepared by the above one-step UV exposure has the advantages of simple fabrication, low cost and high precision, which is conducive to its potential applications in the field of customized flexible smart windows.

Key words: polymer dispersed liquid crystal; smart window; patterning; flexible

1 引言

聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)是液晶以微米或纳米的尺寸分散在聚合物基质中的材料^[1]。在外场作用下 PDLC 可以对入射光进行调控,同时还具有偏振无关、制备工艺简单、易于大型化的优点^[2-3],因此 PDLC 在显示^[4-6]、智能窗户^[7-11]和光学可调元件^[12-14]等诸多领域都有广泛应用。目前,基于 PDLC 制作的智能窗户已经实现大规模生产,并大量应用于投影显示、办公室隔断,窗户玻璃等场景中^[15]。

随着科技的发展,人们对下一代光子及电子产品提出新的需求,电光器件的便携性、可穿戴性和可植入性成为人们竞相追逐的目标^[16-18]。随着使用场景的增加,对能够应用于曲面玻璃或者其他特殊形状表面上的柔性智能窗户的需求也被提出^[19]。国内外研究人员对基于 PDLC 的柔性智能电光器件展开了广泛的研究。中国科学院大学宋伟杰团队设计了一种能够适用于 PDLC 的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}(\text{Cu})/\text{TiO}_2$ 的柔性电极,实现了可见光透射和近红外可调,表现出良好的热屏蔽性能^[20]。Kim 等使用卷对卷工艺生产出基于银纳米线电极的大面积基于 PDLC 的智能窗户,该智能窗户能够通过外加电压控制入射光的透射率,同时具有良好的柔韧性^[7]。Takahiro 等在聚合物网络液晶智能窗户中使用一种柱状间隔结构替代传统的间隔子,在样品弯曲过程中能够抑制基板变形,解决了液晶柔性器件厚度不均匀导致电光性能发生变化的问题^[21]。北京大学杨槐教授课题组提出了一种基于聚合物分散液晶和聚合物

稳定液晶共存体系的复合薄膜,实现了采用热场和电场在 500~2 500 nm 宽波段内对复合薄膜的双重调控^[22]。上海理工大学郑继红教授团队使用全息光路制作了基于 PDLC 的柔性曲面光栅,该光栅可以通过改变 PET 衬底的曲率半径来改变其光学衍射特性^[14]。

本文提出了一种采用单步紫外曝光的方式制备图案化的 PDLC 柔性智能窗户。采用 PET-ITO 作为柔性基板,将 PDLC 预聚物呈三明治状夹在上下柔性基板之间,在 PDLC 紫外曝光聚合过程中在上基板表面增加一层对紫外光具有特定衰减率的图案化掩模板,通过优化的材料配比和制备工艺,制备了基于 PDLC 的柔性图案化智能窗户,并对其电光特性进行了研究。

2 实验

实验制备流程如图 1(a)所示,首先将向列相液晶 E7(江苏和成显示科技有限公司)和聚合物单体 NOA65(Norland Products, INC)按质量分数比 60%:40%混合,在热台上加热至各向同性态并搅拌均匀。然后将混合均匀的 PDLC 预聚物利用毛细作用力灌入制作好的柔性液晶盒。该柔性液晶盒采用柔性 PET-ITO 作为上下基板,基板尺寸为 50 mm×50 mm,盒厚由 10 μm 的间隔子控制。采用彩色标签打印机在 PET 透明衬底上打印特定的图案作为掩膜版,如图 1(b)所示。将图案化的掩膜版置于液晶盒上表面,紫外光透过红色区域(I区)衰减 88%,透过无色透明区域(II区)衰减 29%。使用紫外点光源(JZ40,苏州京圳永达光电科技有限公司)对柔性液晶盒

进行紫外固化 30 min,透过红色区域和无色透明区域的紫外光强分别为 0.68 mW/cm^2 和 3.98 mW/cm^2 。最后移除掩膜版,得到柔性的图案化 PDLC 样品。

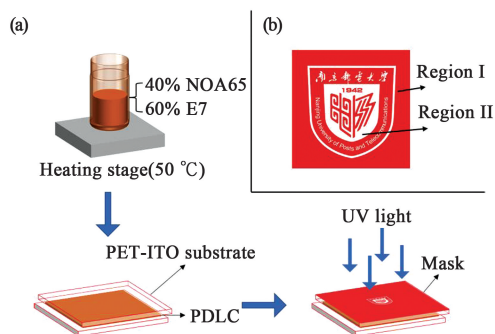


图 1 (a)实验制备流程图;(b)掩膜版示意图。

Fig.1 (a) Fabrication process of the patterned flexible PDLC smart window; (b) Schematic of the UV mask.

3 结果和分析

紫外光强对 PDLC 的电光特性具有显著影响,不同的紫外固化光强制备得到的 PDLC,具有不同的电光响应特性^[23]。较强的紫外光强能够加快紫外聚合速率,得到更致密的聚合物网络结构,因而制备得到的 PDLC 具有更高的阈值电压(V_{th})和饱和电压(V_{sat})。因此,采用上述方法所制备的样品,在紫外固化过程中由于掩膜版的存在,照射到柔性 PDLC 液晶盒上的紫外光呈对应的图案化光强分布,对应区域的 PDLC 紫外聚合速率不同,具有不同的电光响应特性。

制备得到的样品实物如图 2 所示,校徽图案尺寸大小为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 。从实物结果可知,采用以上方式能够制备图案化的 PDLC 器件。采用偏光显微镜(Olympus BX-53)观察样品形貌,如图 2 右下角插图所示,图中可以清楚地看到字母“N”,强紫外光照射区域 II 区的字母“N”和周围弱紫外光照射区域 I 区有着显著的透过率区别。测量字母“N”的线宽为 $120 \mu\text{m}$,表明采用上述方式单步制备图案化的 PDLC 器件具有良好的分辨率,采用彩色标签打印机打印标签掩膜版,对于一些相对复杂的图案也能够实现 PDLC 智能窗户的图案化精细定制。

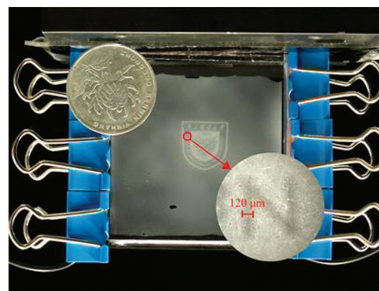


图 2 样品实物图与样品中字母“N”处的显微镜下的微观形貌图

Fig.2 Photo of the sample and the microscope image of the letter ‘N’

我们搭建电光测试系统对制备得到的柔性图案化 PDLC 智能窗户的电光特性进行测试。采用 He-Ne 激光器(632.8 nm)作为入射光源,入射光经过光阑后照射到样品上,经过样品后的出射光由光电探测器(Newport 2031)接收。控制信号发生器(Tektronix AFG1022)产生频率为 1 kHz 的方波信号,经由电压放大器放大后施加到样品上,采用示波器(Tektronix TBS1102X)所记录不同外加电压作用下得到的出射光信号。

图 3 为测试得到的样品两个区域的电压-透过率曲线的归一化结果,数据归一化至入射激光透过 PET-ITO 空盒时探测器测试到的光强值,样品至探测器距离为 15 cm 。由测试结果可知, I 区的阈值电压和饱和电压分别为 5.28 V_{rms} 和 15.13 V_{rms} , II 区的阈值电压和饱和电压分别为 11.14 V_{rms} 和 20.45 V_{rms} 。这是因为在固化过程中 II 区的紫外光强比 I 区大, II 区形成的聚合物网络更加致密,PDLC 微滴尺寸更小。致密的聚合物网络结构对液晶分子具有更大的锚定能,需要更大的电场作用才能使得液晶分子沿电场方向排列。因此强紫外光固化区域 II 区具有更高的阈值电压和饱和电压。当外加电压大于 I 区液晶的阈值电压, I 区的液晶分子会率先倾向于沿电场方向排布,液晶等效折射率逐渐与聚合物折射率匹配,相应的,器件透过率逐渐增加。当电压增大到 8.5 V_{rms} , I 区透过率显著增加并达到 28% ,而 II 区的 PDLC 由于具有较高的阈值电压,仍处于散射状态且透过率只有 1% 。当电压超过 11.14 V_{rms} 时, II 区透过率才开始明显增加。当电压超过 16.8 V_{rms} 时, II 区透过率开始大于 I 区。当电

压增大至 20 V_{rms} 时, I 区和 II 区透过率分别为 72% 和 85%, 且 I 区透过率达到最大。继续增加外加电压, II 区透过率缓慢增加直至最大为 97%。这是由于 I 区 PDLC 液晶微滴更大, 对可见光的散射更强, 从而导致在较强外加电压下 I 区 PDLC 的最大透过率比 II 区低。由图 3 不同区域对应的不同电压-透过率曲线可知, 通过施加不同的外加电压, 制备的图案化柔性 PDLC 智能窗户样品可以实现全散射态、全透明态和图案化透明展示态。

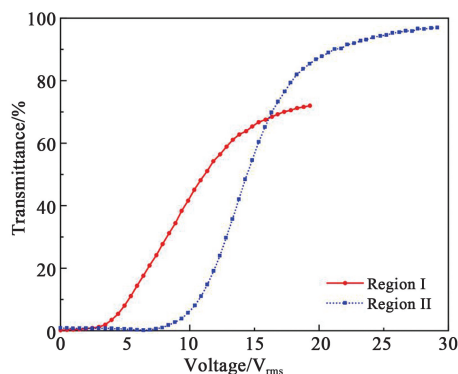


图 3 样品 I 区和 II 区的电压-透过率曲线

Fig.3 Measured V-T curves of region I and region II of the device

PDLC 智能窗户对入射光的散射程度也是评价器件性能的重要指标。因此本文对 PDLC 柔性智能窗户两个区域的可见光的光谱进行了测试, 结果如图 4 所示。在 0 V_{rms} 时, 两个区域在可见光波段透过率均比较低, 在整个可见光波段有着很好的散射能力。此时智能窗户能够很好地保护隐私。当电压增加至 12 V_{rms} 时, II 区透过率要小于 I 区, 此时 I 区处于透明状态而 II 区依旧处于强散射状态, 整个器件处于透明且同时能够展示定制化图案的图案化透明展示态。当电压增加至 30 V_{rms} 以上时, I 区和 II 区在可见光波段的透过率均较大, 整个器件均处于近似全透明状态。由于 I 区和 II 区的液晶微滴尺寸不同, I 区的液晶微滴粒径大于 II 区的粒径, 由 Rayleigh-Gans-Debye 散射模型可知, 散射特性波长与液晶微滴粒径正相关, 即 I 区的散射峰值在长波长的红外区域, 而 II 区的散射主要在长波长区域较弱, 因此对应的透射光谱, I 区长波长区域的透过率受散射影响更大, 呈现与 II 区不同的规律^[1,24]。

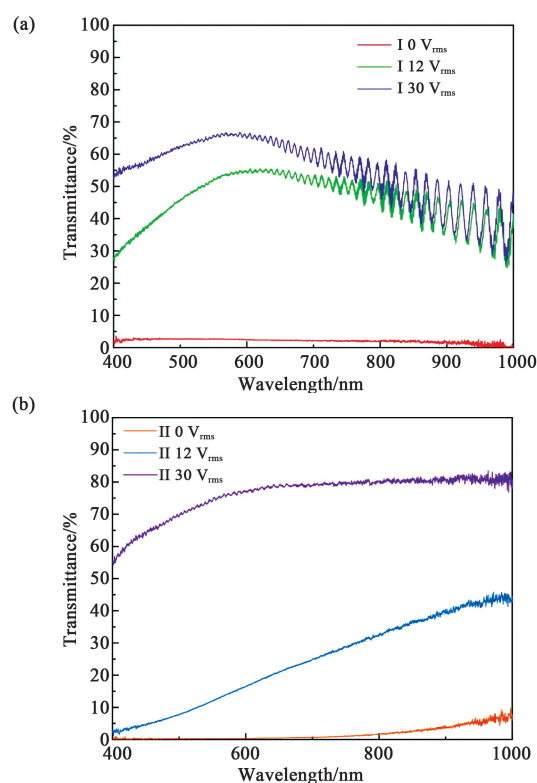


图 4 样品 (a) I 区和 (b) II 区分别在 $0, 12, 30\text{ V}_{\text{rms}}$ 电压驱动时的光谱图。

Fig.4 Spectra of (a) region I and (b) region II of the device with the applied voltages of 0, 12, and 30 V_{rms} .

图 5 展示了制备的柔性 PDLC 智能窗户在不同电压驱动下处于平面状态(图 5(a))和弯曲状态(图 5(b))下的实际效果。由实验结果可知, 未施加电压时处于平面状态和弯曲状态的器件均处于全散射状态, 定制化的校徽图案可见, 并且整个器件背后的背景无法被观察到, 整个器件呈现全散射状态。当给器件施加电压 $15.4\text{ V}_{\text{rms}}$ 时, I 区处在外加电场作用下已经处于近全透明状态, 样品背后的黑色背景能够被观察到。而在此时的外加电压作用下, II 区透过率仍旧低于 I 区, 因此, 器件在全局透射的同时定制的校徽图案仍旧清晰可见, 呈现图案化透明展示态。当电压继续增加至 30 V_{rms} 时, 校徽图案隐约可见, 并会随着电压的持续增加而渐渐消失, 器件呈全透明状态。基于上述过程, 通过给器件施加不同的驱动电压, 能够实现 3 种不同的展示状态即全散射态、全透明态和图案化透明展示态。相应的, 图 5(b)为样品在弯曲曲率半

径为 54 mm 时对应不同外加电压下的实物显示效果。由实验结果清晰可知,在弯曲状态下,器件依旧具有较好的效果。通过施加不同的外加电压,在弯曲模式下,依旧能够实现智能窗户 3 种展示态。以上实验结果表明,通过该法制备的图案化柔性智能窗户不仅可以在传统平面玻璃上应用,也还能应用于曲面的场景。

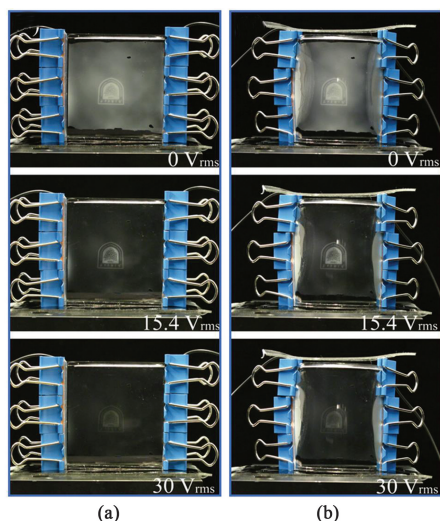


图 5 样品全散射-图案展示模式、全透射-图案展示模式以及全透射模式的实物图。(a)普通状态;(b)弯曲状态(曲率半径 54 mm)。

Fig. 5 Photos of the device working in total scattering state, total transparent state and patterned transparent display state. (a) Plane state; (b) Bending state (Radius of curvature of 50 mm).

最后我们对 PDLC 样品两个不同区域的响应时间进行了测试,结果如图 6 所示。给器件的 I 区和 II 区分别施加各自的饱和电压 20 V_{rms} 和 30 V_{rms} 测试响应时间。开态响应上升时间 t_{on} 和关态响应下降时间 t_{off} 分别定义为透过率从 10% 上升到 90% 和透过率从 90% 下降至 10% 所对应的时间。测量得到 I 区的 t_{on} 和 t_{off} 分别为 15.4 ms 和 33.7 ms, II 区的 t_{on} 和 t_{off} 分别为 4.1 ms 和 14.1 ms。固化过程增加紫外光强, PDLC 的开态响应上升时间和关态响应下降时间减小。该器件响应时间满足其在智能窗户领域的应用。

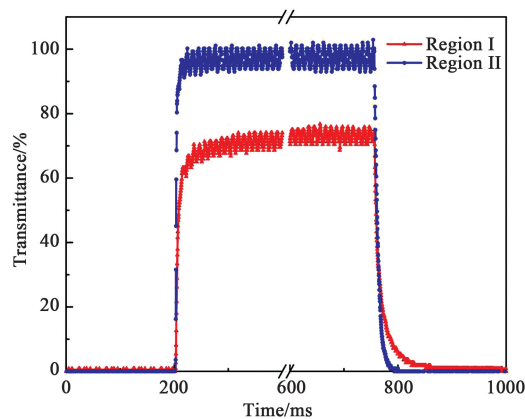


图 6 样品 I 区和 II 区分别在 20 V_{rms} 和 30 V_{rms} 电压驱动下的响应时间

Fig. 6 Response time of regions I and II of the device for the operating voltage of 20 V_{rms} and 30 V_{rms}, respectively.

5 结 论

本文提出了一种采用单步紫外曝光的方式制备图案化的 PDLC 柔性智能窗户。采用彩色标签打印机打印特定图案的 PET 彩色标签作为掩模版,不同区域对紫外光具有不同的衰减率。PDLC 预聚物夹在 PET-ITO 柔性基板之间,紫外光经过掩模版后进行紫外固化,制备得到了图案化的柔性器件。采用上述方法制备的器件具有良好的图案分辨率,线宽为 120 μm 的线条能够清晰可见。不同紫外光强固化区域对应的电光特性不同,高紫外光固化区域的 PDLC 阈值电压和饱和电压分别为 11.14 V_{rms} 和 20.45 V_{rms},低紫外光固化区域对应的为 5.28 V_{rms} 和 15.13 V_{rms}。高、低紫外固化区域的上升响应时间分别为 4.1 ms 和 15.4 ms,下降响应时间分别为 14.1 ms 和 33.7 ms,满足智能窗户应用需求。通过施加不同的外加电场,该图案化智能窗户能够呈现全散射态、全透明态和图案化透明展示态 3 种模式,并且在器件处于平面状态和弯曲状态下均具有较好的展示效果。以上制备方法与 Roll-to-Roll 工艺相兼容,采用上述单步紫外曝光方式制备的图案化 PDLC 柔性器件具有工艺简单、成本低、精度高等优势,在定制化图案的柔性智能窗户领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [2] AHMAD F, JAMIL M, LEE J W, *et al.* The effect of UV intensities and curing time on polymer dispersed liquid crystal (PDLC) display: a detailed analysis study [J]. *Electronic Materials Letters*, 2016, 12(5): 685-692.
- [3] KIZHAKIDATHAZHATH R, NISHIKAWA H, OKUMURA Y, *et al.* High-performance polymer dispersed liquid crystal enabled by uniquely designed acrylate monomer [J]. *Polymers*, 2020, 12(8): 1625.
- [4] ZHANG H L, DENG H, LI J J, *et al.* Integral imaging-based 2D/3D convertible display system by using holographic optical element and polymer dispersed liquid crystal [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 387-390.
- [5] SU C W, LIAO C C, CHEN M Y. Color transparent display using polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(1): 31-34.
- [6] HE Z Q, YIN K, WU S T. Passive polymer-dispersed liquid crystal enabled multi-focal plane displays [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15294-15299.
- [7] KIM D J, HWANG D Y, PARK J Y, *et al.* Liquid crystal-Based flexible smart windows on roll-to-roll slot die-Coated Ag nanowire network films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 765: 1090-1098.
- [8] POZHIDAEV E P, KAZNACHEEV A V, TORGOVA S I, *et al.* Polymer dispersed liquid crystals with electrically controlled light scattering in the visible and near-infrared ranges [J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(12): 3030-3040.
- [9] ANGELOVA I, CHIOU C C, MARINOVA V, *et al.* Polymer dispersed liquid crystals devices on rigid and flexible substrates using graphene electrodes [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2075(1): 020022.
- [10] CHOI Y, KIM C S, JO S. Spray deposition of Ag nanowire-graphene oxide hybrid electrodes for flexible polymer-dispersed liquid crystal displays [J]. *Materials*, 2018, 11(11): 2231.
- [11] 邹呈, 高延子, 于美娜, 等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展 [J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1213-1225.
ZOU C, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)
- [12] 王丹, 彭海炎, 周兴平, 等. 全息高分子/液晶复合材料的研究进展 [J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1268-1298.
WANG D, PENG H Y, ZHOU X P, *et al.* Research progress of holographic polymer/liquid crystal composites [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1268-1298. (in Chinese)
- [13] HE Z Q, YIN K, FAN-CHIANG K H, *et al.* Enlarging the eyebox of maxwellian displays with a customized liquid crystal dammann grating [J]. *Crystals*, 2021, 11(2): 195.
- [14] 李鹏飞, 张伟伟, 申桐, 等. 聚合物分散液晶柔性全息曲面光栅的研究 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(2): 237-245.
LI P F, ZHANG W W, SHEN T, *et al.* Polymer dispersed liquid crystal flexible holographic curved grating [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 237-245. (in Chinese)
- [15] SHAIK S, GORANTLA K, RAMANA M V, *et al.* Thermal and cost assessment of various polymer-dispersed liquid crystal film smart windows for energy efficient buildings [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120155.
- [16] GAO W, OTA H, KIRIYA D, *et al.* Flexible electronics toward wearable sensing [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52(3): 523-533.
- [17] STOPPA M, CHIOLERIO A. Wearable electronics and smart textiles: a critical review [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 11957-11992.
- [18] NATHAN A, AHNOOD A, COLE M T, *et al.* Flexible electronics: the next ubiquitous platform [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1486-1517.
- [19] MANDA R, YOON J H, PAGIDI S, *et al.* Paper-like flexible optically isotropic liquid crystal film for tunable diffractive devices [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34876-34887.

- [20] HUANG J H, LI J, XU J J, *et al.* Simultaneous achievement of high visible transmission and near-infrared heat shielding in flexible liquid crystal-based smart windows via electrode design [J]. *Solar Energy*, 2019, 188: 857-864.
- [21] ISHINABE T, ISA H, SHIBATA Y, *et al.* Flexible polymer network liquid crystals using imprinted spacers bonded by UV-curable reactive mesogen for smart window applications [J]. *Journal of Information Display*, 2021: 1-7, doi: 10.1080/15980316.2021.1960648.
- [22] LIANG X, CHEN M, CHEN G, *et al.* Effects of polymer micro-structures on the thermo-optical properties of a flexible soft-mater film based on liquid crystals/polymer composite [J]. *Polymer*, 2018, 146: 161-168.
- [23] 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)
- [24] KELLY J, WU W, PALFFY-MUHORAY P. Wavelength dependence of scattering in PDLC films: droplet size effects [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1992, 223(1): 251-261.

作者简介:



严 静(1987—),女,江苏苏州人,博士,讲师,2016年于东南大学获得博士学位,主要从事液晶显示及液晶电光器件方面的研究。E-mail: jing.yan@njupt.edu.cn



李若舟(1988—),男,湖北孝感人,博士,讲师,2016年于东南大学获得博士学位,主要从事柔性电子、微纳光子器件,表面等离子激元和新型射频微波器件方面的研究。E-mail: lirz@njupt.edu.cn