

文章编号:1007-2780(2024)03-0322-08

银纳米线对光驱动液晶显示器擦写时间的影响

肖明, 陈蒙, 尚建华*, 桑景新, 孙嘉瞳
(东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要:光驱动液晶显示器(Optically Driving Liquid Crystal Display, ODLCD)是通过利用目标光轴排列以线偏振信息的形式写入光取向层,进而引导液晶微区取向技术的一种新型液晶显示器。ODLCD不仅具有功耗低的显著性优点,而且可以利用偏振光对信息进行擦除和改写。但由于目前ODLCD存在擦写时间较长这一缺点,限制了其在实际中的应用。为了降低ODLCD的擦写时间,本文通过在液晶中掺入液晶单体RM257和银纳米线(AgNWs)并在电场下发生光交联,探究了不同浓度(质量分数)RM257和AgNWs对ODLCD擦写时间的影响。实验结果表明, RM257和AgNWs都对ODLCD的擦写时间有着较显著的影响,在RM257浓度为12%和AgNWs浓度为1%时,ODLCD的擦写时间较短。该研究改善了ODLCD的擦写时间性能,对其在实际中的应用具有一定的研究价值。

关键词:光驱动液晶显示器;擦写时间;RM257;银纳米线

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0022

Impact of silver nanowires on the writing time of optically driven liquid crystal displays

XIAO Ming, CHEN Meng, SHANG Jianhua*, SANG Jingxin, SUN Jiatong

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The Optically Driving Liquid Crystal Display (ODLCD) is a novel type of liquid crystal display that utilizes the arrangement of target optical axes to inscribe linear polarization information into the optical orientation layer, which in turn, guides the technology of liquid crystal micro-area orientation. ODLCDs not only boast the significant advantage of low power consumption but also enable information erasure and rewriting through the use of polarized light. However, the current drawback of ODLCDs lies in their prolonged writing time, restricting their practical applications. To address this issue and reduce the writing time of ODLCDs, we conducted experiments by incorporating liquid crystal monomer RM257 and silver nanowires into the liquid crystal matrix, followed by photo-crosslinking under an applied electric field. The impact of different concentrations (mass fraction) of RM257 and silver nanowires on the writing time of ODLCDs was investigated. The experimental results reveal

收稿日期: 2024-01-16; **修订日期:** 2024-02-04.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52173219, No. 61805035); 东华大学励志计划(No. 20D210401); 上海市松江区科委研究项目(No. 19Q10404)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 52173219, No. 61805035); Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 20D210401); Songjiang District Science and Technology Research Project(No. 19Q10404)

*通信联系人, E-mail: jhshang@dhu.edu.cn

that both RM257 and silver nanowires (AgNWs) exert a significant influence on the writing time of ODLCDs. Specifically, at an RM257 concentration of 12% and AgNWs concentration of 1%, ODLCDs exhibit a lower writing time. This study contributes to the enhancement of the writing time performance of ODLCDs, providing valuable insights for its practical applications.

Key words: ODLCD; erasing time; RM257; AgNWs

1 引言

液晶(Liquid Crystal)是一种介于液体与固体中间相的物质,具有液体流动性和晶体结晶性的特性^[1]。液晶材料的这种独特结构使其在电场或温度变化的作用下可以发生相变^[2],从而调节其光学性质。由于其独特的光电特性,液晶已被广泛应用于显示技术^[3],并占据着显示产业的主要市场。此外,随着近几十年的发展,液晶曲面和柔性显示屏技术被提出,使液晶显示器不再局限于平面显示,提供了更具吸引力和多样性的设计选择^[4-5]。液晶分子的取向将影响显示技术的发展,起初摩擦取向技术因其简单的制作工艺被广泛应用,但由于其会使基板表面形成微小不均匀区域、残余电荷和一些机械划痕等缺点,在一定程度上限制了其在工业上的应用。随着消费者对显示器性能和视角控制需求的增加,研究人员开始寻找更灵活的取向方法,如无取向层取向技术^[6]和光照取向技术^[7]等,这些技术满足了现代生产的需求。

光驱动液晶显示(Optically Driving Liquid Crystal Display, ODLCD)在一定程度上结合了光控取向和摩擦取向的特点^[8-11]。相比于摩擦取向层只能是一种固定方向的取向,光取向层通过偏振光可实现液晶分子任意方向的多畴取向。因此ODLCD通过上下两个基板不同方式的取向方法可实现不同图案的擦除和写入。ODLCD技术在进行显示时不需要任何电子方案、电源或导电层,不仅可以多次擦除和写入图像还可以在零功耗的情况下实现显示功能,且能以非常高的对比度保存较长一段时间^[12-13]。但由于ODLCD技术的擦写时间长和响应速度慢等缺点导致其在市场上的应用受限。为了改善这两个指标,许多学者进行了大量研究,如改善旋涂工艺、施加电场、改变温度和掺杂氧化物到取向层等方法有效降低了ODLCD的擦写时间^[14-18]。

聚合物稳定液晶(Polymer Stabilized Liquid Crystal, PSLC)的概念最早由荷兰飞利浦Broer研究团队在1989年提出。PSLC体系与PDLC体系的区别是PSLC体系中聚合物的掺杂浓度(质量分数)一般小于10%^[19]。此外,PSLC器件具有更低的阈值电压、更短的响应时间、更高的对比度和宽视角^[20],使它们也被广泛用在空间光调制器^[21-23]、全息形成的光调制器、温度传感器、柔性显示器^[24-26]等设备。此外,研究学者还通过掺杂较低浓度的聚合物用于改善ODLCD的擦写时间^[27-29],并且效果显著。尽管PSLC器件已经得到了广泛的应用,但是器件的电光性能仍然需要优化,包括阈值电压、响应时间和其他光学参数。已经发现,纳米材料^[30-31]可以改变LC的电学、光学和磁学性质^[32],如碳纳米管^[33]、纳米颗粒(NP)^[34-35]和石墨烯^[36-37]已经被掺杂到LC材料中,进而实现了基于LC器件的对比度提高、驱动电压降低、捕获离子和响应时间缩短等作用。Choi等人发现,PDLC中的液滴尺寸随着Ag纳米颗粒浓度的增加而减小,从而缩短了响应时间^[38]。

本文探究了不同电压对ODLCD擦写时间的影响,研究了在液晶中掺杂不同浓度(质量分数)的RM257和银纳米线(AgNWs)对ODLCD擦写时间的影响。经大量实验发现,当RM257和AgNWs掺杂一定比例时,ODLCD的擦写时间比未掺杂AgNWs的样品降低了约1~2倍,改善了ODLCD的光电性能。该研究结果将对ODLCD的实际应用起到一定的促进作用,并具有一定的学术价值。

2 实验

2.1 实验材料

本实验所使用的材料为液晶E7(石家庄晔晟化工科技有限公司)、azo-dye (SD1, Dainippon

Ink and Chemicals, Japan)、polyimide(PI,北京波米科技有限公司)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF, Tai Cang Hu Shi Reagent Co. Ltd. ,)、 AgNO_3 和聚乙烯吡咯烷酮(PVP, $M_w=40\ 000$, Adamas, USA)、甘油、氯化钠、乙醇。

2.2 银纳米线的制备

首先将1.76 g的PVP加入到54 mL甘油中,并在90 °C下搅拌60 min。接着,加入0.47 g AgNO_3 ,在温度降至室温后,将混合物搅拌20 min。为了辅助氧化蚀刻,加入17.7 mg NaCl、3 mL甘油和0.15 mL去离子水。然后,在搅拌下将温度从室温升高至210 °C。接着,关闭加热器,将混合物冷却至室温。为了沉淀Ag纳米颗粒,加入60 mL乙醇,静置超过5天。之后,倒出上清液并以2 000 r/min离心30 min,循环10次。最后,具有一定长径比的AgNWs被成功制备。

由于实验需要使用较短长度的AgNWs,所以需要将上述制成的AgNWs放在超声波细胞破碎仪中打碎。将细胞破碎仪设置为70%的功率比,间断超声10 min后得到目标长径比的AgNWs。使用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S-4800)观察AgNWs制备后和破碎后的长度(约为2 μm),如图1(a)、(b)所示。图1(c)、(d)为使用透射电子显微镜(TEM, JEM 2100-F)观察的银纳米线的直径(约为49 nm)。

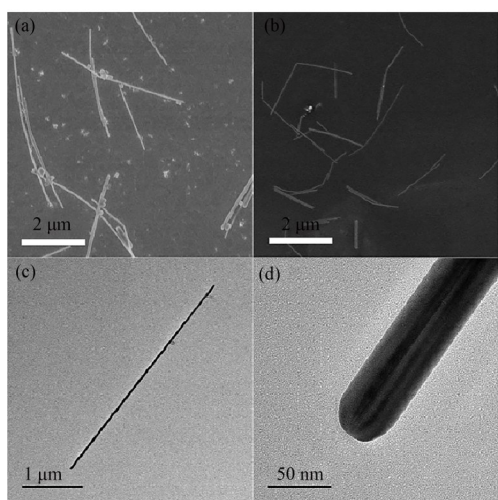


图1 (a)制备后的银纳米线的SEM图;(b)破碎后银纳米线的SEM图;(c),(d)银纳米线的微观TEM图。

Fig. 1 (a) SEM image of the prepared silver nanowire; (b) SEM image of shattered silver nanowires; (c), (d) Microscopic TEM images of silver nanowires.

2.3 AgNW/RM257/E7混合体系的制备

探究不同AgNWs浓度和不同RM257浓度对擦写时间的影响,需要配制两组混合体系液晶混合物。AgNWs组配置了在14%RM257浓度的混合体系下的不同AgNWs浓度梯度的混合溶液,8组不同浓度分别为0、0.5%、0.75%、1%、1.25%、1.5%、2%、2.5%(以80 μL 银纳米线溶液/200 μL E7液晶的浓度约为0.096%作为实验中AgNWs浓度1%)。RM257组分别按照配比配制,其中AgNWs浓度固定为1%,RM257浓度分别为6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%、26%。由于液晶混合体系里加入了AgNWs样品,其中混有乙醇,所以将所有配置好的混合体系放入烘箱中60 °C烘60 min,用于蒸干其中混入的乙醇。

2.4 ODLCD液晶盒的制备

液晶盒制备流程如图2所示。首先将ITO玻璃用玻璃切割机切成长2.5 cm、宽2 cm的玻璃片。然后分别依次使用丙酮、异丙醇、乙醇、去离子水超声清洗10 min,再将洗干净的玻璃样品放入鼓风恒温干燥箱中烘干。将烘干后的玻璃放入臭氧机内处理30 min,以便使光取向剂可以更好地涂抹、吸附在样品上。臭氧结束后将处理过的一面向上放在旋涂仪上,其中一片玻璃样品滴上配置好的浓度为0.5%的SD1溶液,以转速为3 000 r/min的速度旋涂1 min。旋涂结束后将玻璃样品放到热台上,设置温度为100 °C,烘干1 h去除DMF并使SD1发生热聚合。另一片玻璃样品滴上解冻后的PI溶液,以转速为2 500 r/min的速度旋涂100 s,旋涂结束后放在热台上100 °C烘

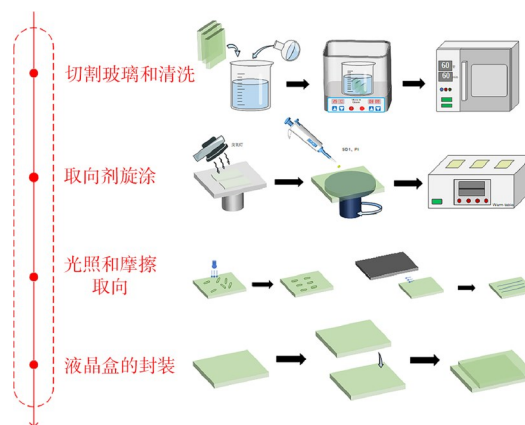


图2 ODLCD样品的制作流程

Fig. 2 Production process of ODLCD samples

1 h,再升温至260 °C再烘1 h。将烘干后涂有SD1的玻璃样品使用波长为450 nm、强度为3 mW/cm²的偏振蓝光照射1 min进行取向。将涂有PI的玻璃样品用天鹅绒布按同一方向摩擦10~15次进行取向。将取向后的SD1玻璃样品取出,在其表面均匀喷洒10 μm间隔物(Spacer)。取出摩擦取向的样品与喷洒过间隔物的样品反平行对齐做成液晶盒,利用毛细作用灌上所需测试液晶后用AB胶将液晶盒四边封上,防止后期实验出现漏液情况。

3 结果与分析

3.1 AgNWs对ODLCD擦写时间的影响

通过对边界条件的推导,ODLCD的擦写时间公式可表示为:

$$\tau = \frac{\gamma_1}{\kappa_E E_{\text{exp}} - 2W/h}, \quad (1)$$

其中: γ_1 为旋转粘度、 κ_E 为吸收系数、 E_{exp} 为曝光强度、 W 为方位锚定能。由公式(1)可以看出,擦写时间和旋转粘度 γ_1 成线性正相关。所以可以通过降低旋转粘度系数 γ_1 减小擦写时间,或可通过增大曝光强度 E_{exp} 或者减小所需的方位锚定能 W 降低擦写时间。

根据分析结果,旋转粘度在改善ODLCD的擦除时间方面具有重要作用。由于本实验在E7液晶中掺杂了RM257和银纳米线,在制备样品的过程中,给液晶盒中RM257紫外固化的同时还加上一定电压,这样AgNWs和液晶分子都会立起来,在形成RM257聚合物网络的同时,会带动一部分AgNWs立起来。AgNWs不仅能够改造ODLCD样品的光电特性,还由于锚定作用,立起来的AgNWs会带动部分液晶分子形成一定的旋转角度,从而进一步减少ODLCD样品的擦写时间。有研究表明,适当施加电压于液晶盒的两端可以使液晶分子垂直排列,从而显著降低旋转粘度,如图3所示。

在本实验中,液晶中掺杂了AgNWs,由于AgNWs的导电性能会大幅降低液晶盒两端可施加的电压,因此,需要事先研究并确定适宜的电压范围,以避免液晶盒烧坏。

如图4所示,在依次施加4 V、6 V、8 V、10 V、

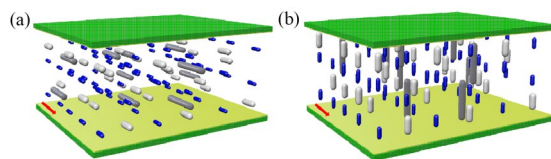


图3 (a)液晶盒两端未加电压的情况,其中蓝色棒状代表E7液晶分子,白色棒状代表RM257,灰色棒状代表AgNWs,液晶分子和银纳米线AgNWs均按照取向方向排列;(b)液晶盒加电压的情况。加压后会使液晶粒子和AgNWs垂直于电场方向立起来。红色箭头为光取向和摩擦取向的取向方向。

Fig. 3 (a) Liquid crystal cell with no voltage applied to both ends. The blue rod shape represents E7 liquid crystal molecules, the white rod shape represents RM257, and the gray rod shape represents AgNWs. The liquid crystal molecules and AgNWs are arranged in the orientation direction; (b) Liquid crystal cell with applied voltage, which causes the liquid crystal particles and AgNWs to stand up with the direction of the electric field due to the pressurization effect. The red arrows indicate the orientation directions of light orientation and friction orientation.

12 V电压时,液晶盒会显示出不同程度的变化。其中,4 V和6 V的电压对液晶盒没有比较明显的影响,而8 V以上的电压将导致液晶盒烧毁,并呈现不同程度的黑边现象。图4(f)显示了在偏振片下观察到的烧焦情况。

实验结果表明,银纳米线明显降低了液晶盒

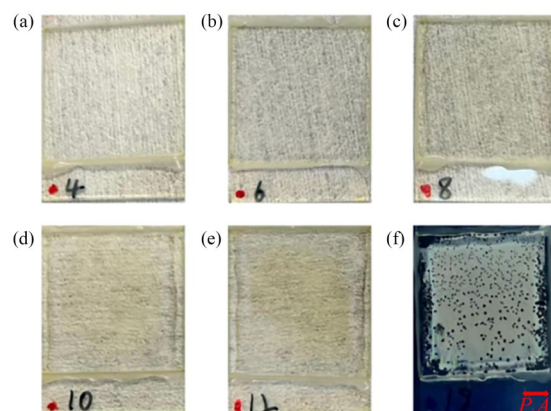


图4 (a)~(e)给液晶盒分别施加4,6,8,10,12 V电压;(f)加高电压而被烧毁的液晶盒。

Fig. 4 (a)~(e) Liquid crystal cells applied 4, 6, 8, 10, 12 V voltage, respectively; (f) Liquid crystal cell burned under high voltage.

两端可施加的电压范围。鉴于后续可能会改变银纳米线的浓度,不宜过高施加电压。因此后续实验将统一使用 4 V 的施加电压。

在确定合适的电压范围后,给液晶盒加 4 V 电压的同时给液晶盒紫外光固化。这种方式能使固化的 RM257 网络和 AgNWs 带动其周围的部分液晶分子旋转形成一定的扭转角,这种不同的扭转角会导致液晶具有不同的透过率。这种方式能有效降低 ODLCD 样品的旋转粘度,随着旋转粘度的降低,ODLCD 样品的擦写速度就会变得更快。

实验使用 Instec 公司生产的 ALCT 测试仪测试 ODLCD 的擦写时间。本实验采用的擦写时间定义为在标准光照模式下,光束透过液晶盒光强由 90% 衰减到 10% 所用时间。实验测试光路如图 5 所示,当蓝色激光的偏振轴平行于 SD1 分子长轴照射 SD1 取向层时,会使 SD1 分子发生 90° 旋转变换,同时 PI 取向层不会发生任何变化,这样经蓝光照射区域部分将会从 PA 模式变为 TN 模式,绿色激光透过液晶盒的光强会由此而发生变化,进而被光测试仪记录下来。

本实验旨在研究在 E7 液晶中掺杂 RM257 和 AgNWs 对 ODLCD 擦写时间的影响。为了探究它们分别对擦写时间的影响关系,采用了控制变量法,确保其他因素的恒定,避免了其他因素的干扰。

在 RM257 浓度保持为 14% 的条件下进行了 8 组实验,以研究不同 AgNWs 掺杂浓度对

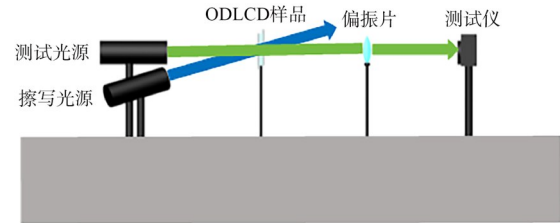


图 5 测试实验原理示意图。其中波长为 450 nm、强度为 30 mW/cm² 的偏振蓝光作为擦写光源;波长为 532 nm、强度为 1 mW/cm² 的绿光作为测试光源,用于接收器感受光强变化。

Fig. 5 Schematic diagram of the testing experiment principle. A polarized blue light with a wavelength of 450 nm and an intensity of 30 mW/cm² is used as the erasing light source; Polarized green light with a wavelength of 532 nm and intensity of 1 mW/cm² is used as the test light source for the receiver to sense changes in light intensity.

ODLCD 擦写时间的影响,实验结果如图 6 所示。从图中可观察到 AgNWs 对擦写时间产生显著影响。在 RM257 浓度为 14% 时,较低浓度的 AgNWs 对擦写时间的降低效果不太显著。然而,与未掺杂 AgNWs 的样品相比,降低效果仍然显著。由于低浓度 AgNWs 存在数量较少和分散性不佳等问题,导致受影响的液晶分子数量有限,因此擦写时间的优化效果并不显著。随着 AgNWs 掺杂浓度的增加,样品的擦写时间进一步降低,当 AgNWs 浓度为 1% 时,平均擦写时间最短,为 48.805 s。

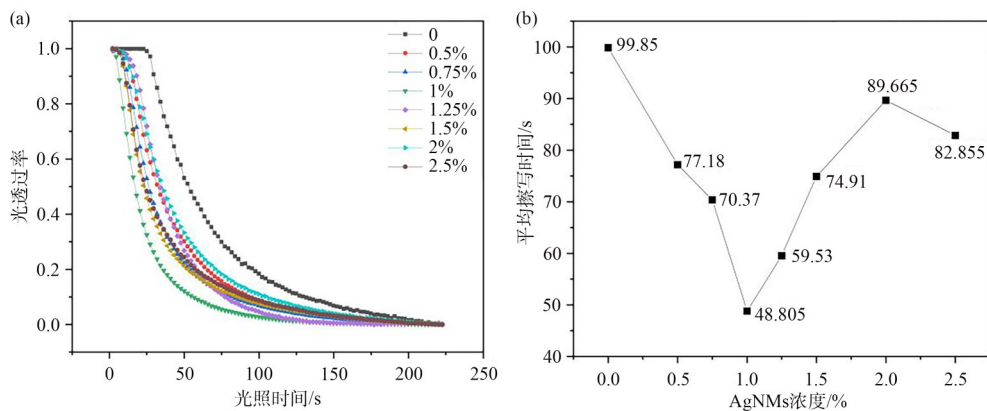


图 6 (a) 8 组不同 AgNWs 浓度样品的光照时间与光透过率的关系; (b) 8 组不同 AgNWs 浓度样品的平均擦写时间折线图。

Fig. 6 (a) Relationship between light exposure time and light transmittance of 8 groups of samples with different AgNWs concentrations; (b) Line graph of the average erasing time for 8 groups of samples with different AgNWs concentrations.

3.2 RM257对ODLCD擦写时间的影响

在聚合物体系中,AgNWs的掺杂显著降低了擦写时间,然而聚合物在其中的确切作用仍需要进一步深入研究。为了探究在AgNWs的掺杂条件下,RM257对ODLCD擦写时间的影响关系,我们进行了详细的实验研究。实验结果见图7,其中RM257浓度作为变量,而AgNWs的掺杂浓度为1%。从图7可清晰地观察到RM257的浓度对ODLCD擦写时间影响显著,其最大擦写时间跨度高达40多秒。在RM257浓度为6%~12%的范围内,随着浓度的增加,擦写时间逐渐减少。然而,在12%~26%浓度范围内,随着浓度的增加,擦写时间总体呈上升趋势。这一结果

表明,在聚合物浓度约为12%时,样品的光透过率从90%降至10%所需的时间最短,平均时间约为43.13 s。

通过深入的数据分析发现,聚合物不仅对擦写时间有正面效果,而且这种效果并非简单的线性关系。事实上,随着聚合物浓度的增加,擦写时间也可能受到负面影响。这是因为随着聚合物浓度的增加,液晶分子的比例减小,导致在偏振光照射时,液晶分子的取向发生偏转的数量也减少,从而导致擦写时间延长。因此,尽管聚合物能够促使液晶分子形成一定角度以降低旋转粘度,但在这两个因素的共同作用下,实验结果可能会呈现复杂的变化。

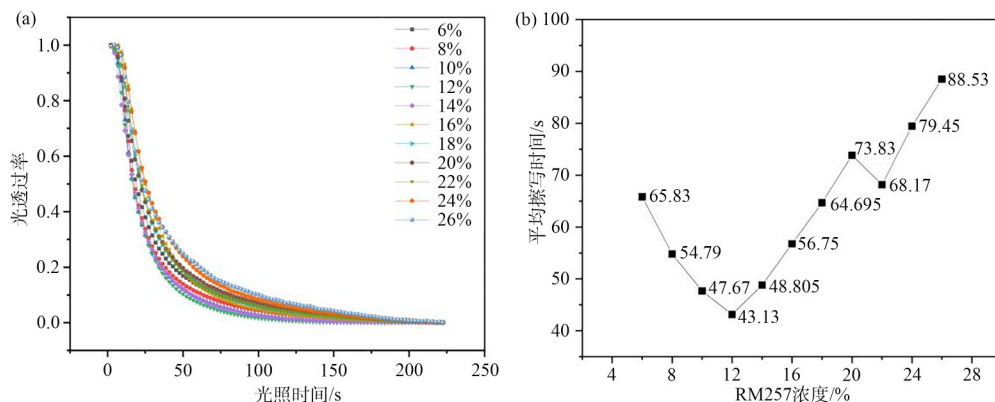


图7 (a)11组不同RM257浓度样品的光照时间与光透过率的关系;(b)11组不同RM257浓度样品的平均擦写时间折线图。

Fig. 7 (a) Relationship between illumination time and light transmittance of 11 groups of samples with different RM257 concentrations; (b) Line graph of the average erasing time for 11 groups of samples with different RM257 concentrations.

4 结 论

为解决ODLCD擦写时间过长的问题,本研究通过在ODLCD样品中掺杂液晶单体RM257和AgNWs的方法显著改善了其擦写时间。实验结果表明,在给予ODLCD样品4 V电压的条件下,不同浓度的RM257和AgNWs对ODLCD擦写时间都能产生显著影响。特别在RM257掺杂浓度为12%、AgNWs掺杂浓度为1%的条件下,

ODLCD样品呈现出低至43.13 s的擦写时间,实现了对ODLCD擦写时间的显著降低。通过优化液晶单体和AgNWs的掺杂比例,成功实现了在实际操作中更为高效的ODLCD擦写过程。这不仅提高了ODLCD在实际应用中的可操作性和性能表现,并且为广泛的电子设备和显示技术领域提供了一种改进擦写时间的可行方案。由于添加了银纳米线增强了其机械特性,所以也为柔性液晶显示技术的发展提供了一种有效的优化途径。

参 考 文 献:

- [1] KATO T, UCHIDA J, ICHIKAWA T, *et al.* Functional liquid crystals towards the next generation of materials [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(16): 4355-4371.

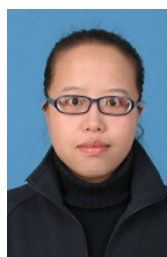
- [2] INOUE Y, ATSUMI Y, KAWAMURA A, *et al.* Thermoresponsive liquid crystalline polymer membranes that undergo phase transition at body temperature [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 588: 117213.
- [3] KOBAYASHI S, MIYAMA T, AKIYAMA H, *et al.* Development of liquid crystal displays and related improvements to their performances [J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2022, 98(9): 493-516.
- [4] LEE S L, CHENG C C, LIU C J, *et al.* 9.4-Inch 228-ppi flexible micro-LED display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(5): 360-369.
- [5] YANAGISAWA Y, IKEDA H, HIRAKATA Y, *et al.* Curved OLED display to effectively enhance natural3D [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(1): 26-34.
- [6] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [7] BOBROVSKY A, RYABCHUN A, SHIBAEV V. Liquid crystals photoalignment by films of side-chain azobenzene-containing polymers with different molecular structure [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2011, 218(1): 137-142.
- [8] LI X H, AU P T, XU P Z, *et al.* Flexible photoaligned optically rewritable LC display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 783-785.
- [9] MURAVSKY A, MURAVSKI A, LI X H, *et al.* Optical rewritable liquid-crystal-alignment technology [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(4): 267-273.
- [10] MURAVSKY A, MURAVSKI A, CHIGRINOV V, *et al.* New properties and applications of rewritable azo-dye photoalignment [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(9): 927-931.
- [11] MURAVSKY A, MURAVSKI A, CHIGRINOV V, *et al.* Optical rewritable electronic paper with fluorescent dye doped liquid crystal [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2008, 39(1): 915-918.
- [12] CHIGRINOV V, PIKIN S, VERVOCHNIKOV A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 061713.
- [13] SUN J T, CHIGRINOV V. Effect of azo dye layer on rewriting speed of optical rewritable E-paper [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, 561(1): 1-7.
- [14] WANG L, SUN J, LIU H, *et al.* Increasing the rewriting speed of ORW e-paper by electric field [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(4): 553-560.
- [15] YU Q, MURAVSKI A, DU T, *et al.* Light printer for optical rewritable electronic paper [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 1184-1186.
- [16] ZHANG W, SUN J, SRIVASTAVA A K, *et al.* 3-D grayscale images generation on optically rewritable electronic paper [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(S1): 40.
- [17] CHIGRINOV V, SUN J T, KUZNETSOV M M, *et al.* The effect of operating temperature on the response time of optically driven liquid crystal displays [J]. *Crystals*, 2020, 10(7): 626.
- [18] 桑景新, 梁立兵, 张永芳, 等. 氧化镍纳米颗粒对光驱动液晶显示的影响[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 40-48.
SANG J X, LIANG L B, ZHANG Y F, *et al.* Effect of nickel oxide doping on the optically driving liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 40-48. (in Chinese)
- [19] DIERKING I. Recent developments in polymer stabilised liquid crystals [J]. *Polymer Chemistry*, 2010, 1(8): 1153-1159.
- [20] PANDE M, TRIPATHI P K, MISRA A K, *et al.* Dielectric and electro-optical properties of polymer-stabilized liquid crystal system [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 217.
- [21] WANG Z Y, ZHANG H, LIU X H, *et al.* Cascaded liquid crystal holography for optical encryption [J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(12): 120003.
- [22] XU C T, LIU B H, PENG C, *et al.* Heliconical cholesterics endows spatial phase modulator with an electrically customizable working band [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(19): 2201088.
- [23] WU J B, WU S B, CAO H M, *et al.* Electrically tunable microlens array enabled by polymer-stabilized smectic hierarchical architectures [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(20): 2201015.
- [24] SUN J, WU S T. Recent advances in polymer network liquid crystal spatial light modulators [J]. *Journal of Poly-*

- mer Science Part B: Polymer Physics*, 2014, 52(3): 183-192.
- [25] YAN J, RAO L H, JIAO M Z, *et al.* Polymer-stabilized optically isotropic liquid crystals for next-generation display and photonics applications [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(22): 7870-7877.
- [26] ZOU J H, FANG J Y. Adhesive polymer-dispersed liquid crystal films [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(25): 9149-9153.
- [27] 林超. 基于光学驱动液晶显示器擦写时间改进的研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
LIN C. Research on the optimizati of rewriting time based on optically driving liquid crystal display [D]. Shanghai: Donghua University, 2022. (in Chinese)
- [28] 何云飞. 基于聚合物掺杂的柔性光学驱动液晶显示器的研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
HE Y F. Research on flexible optical-driven liquid crystal display based on polymer doped [D]. Shanghai: Donghua University, 2023. (in Chinese)
- [29] LIN C, SUN J T. Increasing the rewriting speed of optically driving liquid crystal display by RM257 doping [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(S1): 971-973.
- [30] LI X, PAN S L. Open-circuit photopotential characterization of photoelectrochemical activities of Au-modified TiO₂ nanorods [J]. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 2023, 2(2): 100057.
- [31] TONG F X, ZHANG X X, WANG Z Y, *et al.* In situ observation of photo-induced shortening of single Au nanorod for Plasmon-enhanced formic acid dehydrogenation [J]. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 2022, 1(2): 100014.
- [32] SINGH U B, DHAR R, DABROWSKI R, *et al.* Influence of low concentration silver nanoparticles on the electrical and electro-optical parameters of nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2013, 40(6): 774-782.
- [33] DURAN H, GAZDECKI B, YAMASHITA A, *et al.* Effect of carbon nanotubes on phase transitions of nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2005, 32(7): 815-821.
- [34] STUDENYAK I P, IZAI V Y, STUDENYAK V I, *et al.* Influence of Cu₆PS₅I superionic nanoparticles on the dielectric properties of 6CB liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(5): 897-903.
- [35] CHUNG H K, PARK H G, HA Y S, *et al.* Superior electro-optic properties of liquid crystal system using cobalt oxide nanoparticle dispersion [J]. *Liquid Crystals*, 2013, 40(5): 632-638.
- [36] SENYUK B, BEHABTU N, PACHECO B G, *et al.* Nonlinear photoluminescence imaging of isotropic and liquid crystalline dispersions of graphene oxide [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 8060-8066.
- [37] WANG L, BISOYI H K, ZHENG Z G, *et al.* Stimuli-directed self-organized chiral superstructures for adaptive windows enabled by mesogen-functionalized graphene [J]. *Materials Today*, 2017, 20(5): 230-237.
- [38] CHOI S H, KIM J A, HEO G S, *et al.* Electro-optical characteristics of polymer-dispersed liquid crystal containing copper (II) phthalocyanine as a function of UV irradiation time [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 363: 119821.

作者简介:



肖明,男,硕士研究生,2021年于安徽建筑大学获得学士学位,主要从事液晶显示与纳米材料方面的研究。E-mail: 573698242@qq.com



尚建华,女,博士,副教授,2010年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光电子技术等方面的研究。E-mail: jhshang@dhu.edu.cn