

文章编号:1007-2780(2026)09-1255-12

量子点电润湿显示器件的驱动响应与 双阶段波形调控

石羽倩¹, 吕珊红¹, 林珊玲¹, 林坚普¹, 孙海玲², 林志贤^{1,3*}, 郭太良³

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362251;

2. 华南师范大学 华南先进光电子研究院, 广东 广州 510631;

3. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福建 福州 350116)

摘要:针对量子点复配油墨后传统电润湿驱动参数难以直接沿用,以及在持续驱动过程中量子点电润湿器件开口保持稳定有待改善的问题,本文比较不同电压加载方式,考察双极性方波频率和正极性占空比对器件开口响应的影响,并与普通电润湿器件对照分析亮度响应,进而构建启动-维持双阶段波形。结果表明,频率和正极性占空比均会影响量子点器件的开口建立过程,且其亮度-占空比关系与普通器件明显不同;在所测试方案中,采用 0.5 s、 ± 22 V 启动,随后 ± 18 V 维持时,30 s 平均开口率达到 73.92%,残留面积比例由基准方波的 7.84% 降至 3.48%。在 50% 正极性占空比下,环境光及环境光叠加 395 nm 紫外光条件下的亮度分别较基准提高 8.20% 和 20.95%。针对量子点复配后的驱动响应特性匹配启动与维持阶段幅值,可在保持有效开口的同时降低油墨残留并改善光学输出,这为量子点电润湿显示器件的针对性驱动波形设计及优化提供实验依据。

关键词:量子点电润湿显示器件;双极性驱动;正极性占空比;油膜分裂;双阶段驱动

中图分类号:TN27 文献标识码:A doi:10.3724/CJLCD.2026-0185 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0185

Driving response and two-stage waveform control of quantum-dot electrowetting display devices

SHI Yuqian¹, LÜ Shanhong¹, LIN Shanling¹, LIN Jianpu¹, SUN Hailing²,
LIN Zhixian^{1,3*}, GUO Tailiang³

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China;

2. South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University,
Guangzhou 510631, China;

3. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information,
Fuzhou 350116, China)

Abstract: Driving parameters established for conventional electrowetting displays cannot readily be applied directly to devices incorporating quantum-dot-containing oil, and aperture retention during sustained driving requires improvement. This study compares different voltage-loading protocols, investigates the effects of

收稿日期:2026-08-10;修订日期:2026-08-20.

基金项目:国家重点研发计划(No.2024YFB3612700)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2024YFB3612700)

*通信联系人, E-mail: lzx2005000@163.com

bipolar square-wave frequency and positive-polarity duty cycle on aperture response, and analyzes luminance responses in comparison with those of conventional electrowetting devices. A startup-maintenance two-stage driving waveform is then developed. The results show that both frequency and positive-polarity duty cycle affect aperture formation in the quantum-dot devices, whose luminance-duty-cycle relationship differs markedly from that of conventional devices. Among the tested schemes, applying ± 22 V for the first 0.5 s followed by ± 18 V during the maintenance stage yields an average aperture ratio of 73.92% at 30 s and reduces the residual area ratio from 7.84% under the reference square wave to 3.48%. At a positive-polarity duty cycle of 50%, luminance increases by 8.20% under ambient light and by 20.95% under ambient light with additional 395 nm ultraviolet illumination, relative to the reference waveform. Matching the startup and maintenance voltage amplitudes to the driving-response characteristics of devices incorporating quantum dots can maintain an effective aperture while reducing residual oil and improving optical output. These findings provide an experimental basis for the targeted design and optimization of driving waveforms for quantum-dot electrowetting display devices.

Key words: quantum-dot electrowetting display; bipolar driving; positive-polarity duty cycle; oil film splitting; two-stage driving

1 引 言

电润湿显示 (electrowetting display, EWD) 通过外加电场改变极性液体在疏水介电层表面的润湿状态,驱动与其不相溶的油墨在像素内铺展或收缩,从而调制反射光或透射光。Hayes 和 Feenstra 于 2003 年报道了视频速率电润湿电子纸,奠定了 EWD 的器件基础^[1]。此后,EWD 凭借低功耗、响应速度快及户外可读等特点,在电子纸及柔性显示领域得到持续研究^[2]。然而,油墨回流、油膜分裂、迟滞及电荷捕获等非理想效应仍会导致开口率和亮度稳定性下降。Zhang 等建立了 EWD 像素电荷捕获模型,定量分析表明捕获电荷电势随直流驱动时间和驱动电压的增加而升高,并进一步削弱有效电润湿力、诱发油墨回流^[3];Xie 等则证实迟滞效应使器件在电压上升与下降过程中,同一驱动电压对应不同的开口率和亮度响应^[4]。针对上述问题,交流与双极性驱动、极性相关调制、过驱动及多阶段波形等方法已被用于抑制电荷积累、油墨回流和油膜分裂,并改善响应速度及亮度稳定性^[5-10]。这些研究表明,EWD 的稳定运行不仅取决于驱动电压幅值,还与波形极性、作用时间及不同运动阶段的电压配置密切相关。

在改善油墨运动稳定性和驱动性能的同时,如何进一步拓展电润湿器件的光学响应能力,也

成为该类器件研究的另一方向。量子点 (quantum dot, QD) 具有较高的荧光亮度、窄带且尺寸可调的发射光谱以及良好的光稳定性,将其与电润湿的液体电控特性相结合,可在油墨形貌调制的基础上引入额外的荧光响应,为电润湿器件提供新的光学调控方式。然而,量子点由常规光学材料转变为可参与电润湿驱动的液相分散体系后,其稳定分散和可逆电驱动并非天然满足。早期研究中,Roques-Carmes 等将 CdSe/CdS 和 CdTe/CdS 量子点分散体系用于电润湿,发现施加电压能够改变含量子点液滴的润湿状态,但其响应具有明显的极性依赖性。特定极性下量子点向氟聚合物表面迁移和吸附会增加接触角迟滞,表明纳米颗粒的加入会直接参与界面演化过程^[11]。针对量子点在重复电驱动条件下可能出现的聚集、沉降及界面吸附问题,Tohgha 等采用聚合物封装量子点构建荧光纳米流体,在交流电润湿条件下获得较大的可逆接触角变化,并保持量子点的光学特性^[12]。后续研究进一步表明,量子点的表面配体、粒径、浓度及分散介质均可通过改变界面张力和润湿行为调节电润湿响应^[13-15]。

上述研究说明,量子点电润湿显示器件 (quantum dot electrowetting display, QD-EWD) 并非将量子点作为不参与流体过程的简单光学添加剂。至少在已报道的量子点纳米流体体系中,量子点的粒径、浓度、表面配体及分散介质均

可能改变液-液或固-液界面张力、润湿状态及接触线运动,从而使其电压响应与普通电润湿流体产生差异^[11-15]。因此,将量子点复配至EWD油墨后,传统染料油墨条件下获得的驱动参数未必能够直接移植。需要指出的是,现有量子点电润湿研究主要针对开放式液滴或数字微流控体系,所采用的量子点分散相、溶剂体系和电极边界条件与封装式EWD像素存在明显差异,其研究指标也主要集中于接触角和液滴运动。对于封装像素中量子点复配油墨的油膜破裂、收缩、残留以及持续驱动下的光学输出,目前仍缺乏系统的驱动参数研究。

针对上述驱动适配问题,传统EWD中的分阶段驱动和频率调控研究可提供一定参考。Long等采用包含油膜收缩阶段和稳态驱动阶段的组合波形抑制油墨回流,表明根据不同运动阶段配置驱动电压有利于兼顾快速开口和稳态保持^[16];阻抗谱研究进一步表明,交流频率能够改变介电层电压分配及电润湿接触角响应,使液体驱动表现出明显的频率依赖性^[17]。除波形优化外,Li等还通过开放诱导结构调控像素内局部电场分布,实现油墨定向运动^[18]。然而,结构优化需要改变器件本身,而对于已封装的量子点复配油墨器件,更直接的调控手段仍是驱动波形。尤其是量子点加入后流体界面特性可能发生变化,传统器件中获得的驱动参数及响应关系未必能够直接沿用。因此,本文并非简单移植已有分阶段驱动形式,而是针对QD-EWD重新考察电压加载方式、频率和正极性作用时间,并根据其启动与持续维持阶段的不同驱动需求匹配两阶段幅值。

基于此,本文以量子点电润湿显示器件为研究对象,首先比较不同电压加载方式下的油墨响应,确定适用于该器件的基础驱动形式及幅值范围;随后研究双极性方波频率与正极性作用时间对像素开口建立和保持的影响,并通过普通电润湿器件对照分析两类器件的亮度-占空比响应差异。在此基础上,针对油膜启动与持续维持阶段的不同驱动需求,构建启动-维持双阶段波形,通过开口率和残留面积比例比较不同幅值组合的持续驱动性能,并进一步通过亮度测试评价所选方案的光学输出,为量子点电润湿显示器件的驱

动参数选择与稳定光学输出提供实验依据。

2 实验与分析方法

2.1 器件与测试平台

本文采用透射式量子点电润湿显示器件开展驱动与光学特性测试,器件分层结构如图1所示,主要由氧化铟锡(indium tin oxide,ITO)透明电极、去离子水极性液体、量子点复配油墨层、像素墙、含氟聚合物疏水绝缘层和SiN介电层组成。所用量子点为红色镉系核壳结构CdSe/CdS/ZnS量子点,表面配体以油酸(oleic acid, OA)为主,原分散于正癸烷中。经旋转蒸发去除原分散溶剂后,将量子点加入电润湿油墨中,配制得到量子点浓度为25 mg/mL的复配油墨。

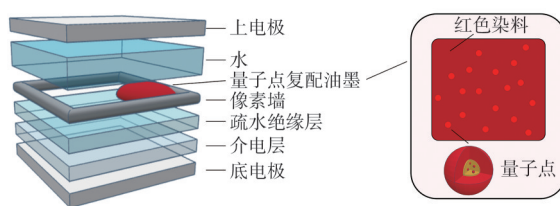


图1 量子点电润湿显示器件结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the QD-EWD

驱动与光学测试在暗室条件下进行,测试平台主要包括Murzider MSD4200显微镜及高清相机、Konica Minolta CS-200色彩亮度计、RIGOL DG4102函数信号发生器、功率放大器、恒定光源及待测器件。函数信号发生器输出的驱动信号经功率放大后施加至器件,每次加载前均采用示波器核验器件端实际电压幅值、频率及周期,以减小信号源设定值与器件端实际驱动波形之间的偏差。

考虑到环境光条件会影响电润湿显示器件的光学表现^[19],本文所有可见光照明均采用色温为6 500 K的恒定白光光源。测试前将白纸置于器件测试位置,调节光源输出,使CS-200测得的白纸亮度保持为1 500 cd/m²,以此作为各组实验统一的白光照明基准,下文简称环境光。亮度测试时,将器件固定于同一白纸底板上,白光光源与CS-200位于器件同侧,并保持光源、器件、底板及亮度计之间的相对位置不变。由于本文器件为透射式结构且背面设置白色反射底板,因此测得的

亮度表征了该固定测量几何条件下器件的综合亮度输出,而非器件的单程透射亮度或本征反射率。白纸亮度基准用于统一各组实验的照明和反射背景条件,不作为器件绝对反射率或透射率的标定。紫外(Ultraviolet, UV)光源采用得力 DL551100 紫光检测灯,标称发射波长为 395 nm,光源与器件距离固定为 15 cm,测试过程中其位置及工作状态保持不变。

为保证不同驱动条件下结果的可比性,除实验所设自变量外,器件位置、测试区域、显微镜倍率、相机曝光参数及相应照明条件均保持一致。除连续阶梯直流实验采用连续升压外,其余独立驱动条件测试前均先断开驱动电压,使油墨重新完全铺展,并在完全铺展状态下继续保持 2 min 后再进行下一次测试。开口率及残留面积比例的分析固定选取同一器件中预先确定的 2 像素 $\times$ 2 像素区域,每个驱动条件测试 1 次,分别计算 4 个像素的相应指标并取平均值。本文图像分析主要用于比较同一器件固定区域在不同驱动参数下的相对响应,尚未对器件间离散性进行系统统计。亮度测试则均在波形连续驱动 30 s 后记录,每组测试条件重复测量 3 次,每次测试前均按照上述方式恢复器件初始状态,并取 3 次测量结果的平均值。最后作为光学响应对照,本文同时测试未添加量子点的普通电润湿器件,除油墨中是否复配量子点外,两类器件的像素结构、极性液体、基础油墨体系、介电层及疏水层等条件保持一致。

2.2 量子点引入对开放式电润湿响应的影响

为定性验证量子点是否会改变油墨体系的界面电润湿响应,并为后续封装器件驱动研究提供前置依据,本文在器件驱动实验前开展开放式液滴实验。采用表面覆盖含氟聚合物疏水层的 ITO 基板,分别测试未添加量子点的基础油墨以及量子点浓度为 5 mg/mL 和 20 mg/mL 的复配油墨,分别进行 0 $\sim$ -30 V 和 0 $\sim$ +30 V 的负、正极性直流电压扫描。以无电场时的初始接触角与各极性电压作用过程中最小接触角之差定义接触角调制范围 $\Delta\theta$,用于表征外加电场对体系润湿状态的调控幅度。

如图 2 所示,在负、正极性直流扫描下,电润湿油墨的接触角调制范围分别为 12.569°和 10.811°;

加入 5 mg/mL 量子点后分别降至 6.513°和 6.162°,较电润湿油墨降低 48.2% 和 43.0%;加入 20 mg/mL 量子点后分别为 6.503°和 7.128°,分别降低 48.3% 和 34.1%。由此可见,在两种极性作用下,量子点复配油墨的接触角调制范围均明显低于基础油墨,说明量子点的引入降低了该体系在准静态直流条件下的接触角调制幅度;同时,5 mg/mL 与 20 mg/mL 两组样品之间未表现出明确的浓度单调效应。

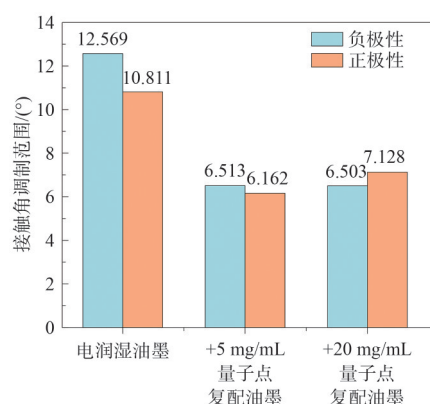


图 2 不同油墨体系在负、正极性直流扫描下的接触角调制范围。

Fig. 2 Contact-angle modulation ranges of different oil systems under negative- and positive-polarity DC scans

本文采用的 CdSe/CdS/ZnS 量子点以油酸(OA)为主要表面配体。量子点及其表面配体进入油墨后,可能通过改变油-极性液体界面的界面张力、润湿状态及三相接触线运动,进而改变外加电场作用下的接触角调制行为^[11-14]。由于开放式液滴与封装 EWD 像素的边界条件及油墨运动形式不同,该实验主要用于说明量子点复配已改变基础油墨的界面电润湿响应,因此后续有必要进一步在封装器件条件下研究其电压加载方式、频率及极性作用时间响应。需要说明的是,开放式液滴实验采用 5 mg/mL 和 20 mg/mL 作为代表性量子点浓度,其目的在于验证量子点复配是否会改变基础油墨的界面电润湿响应,并不用于与后续器件中 25 mg/mL 复配油墨的驱动行为进行定量对应。

2.3 驱动原理与响应评价方法

电润湿器件的油墨收缩状态受外加电场调

控。理想条件下,驱动电压与液体表观接触角之间可由 Young-Lippmann 关系描述;实际 EWD 器件还可能受到介电层及界面电荷捕获等非理想因素影响,使有效驱动电压发生变化。考虑俘获电荷对应的等效电势 V_T 后^[3],该关系可表示为:

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2d\gamma_{ow}}(V - V_T)^2, \quad (1)$$

式中: θ_0 和 θ 分别为未施加和施加电压时的表观接触角; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 和 d 分别为介电-疏水复合层的等效相对介电常数和等效厚度,因此 $\epsilon_0 \epsilon_r / d$ 为其等效单位面积电容; γ_{ow} 为油相与极性液体之间的界面张力; V 为外加电压; V_T 为俘获电荷对应的等效电势。该关系表明,器件实际开口状态不仅受驱动幅值影响,还可能与界面电荷等非理想过程有关,因此本文进一步通过像素形貌和光学输出对不同驱动条件下的器件响应进行评价。

本文结合显微图像分析和亮度测量,以开口率、残留面积比例和亮度为主要评价指标,并比较驱动 5 s 与 30 s 时的开口率,以评价不同驱动条件下的开口建立与保持情况。开口率采用自编图像处理程序计算。首先将彩色显微图像转换为灰度图像,并采用 3×3 高斯滤波抑制局部噪声;随后,根据像素墙位置将图像划分为 2×2 个像素区域。为排除像素墙和边缘线条的干扰,各像素区域四周向内收缩 8 个像素,收缩后的区域作为有效感兴趣区域(region of interest, ROI)。

各像素 ROI 采用 Otsu 法获得基础分割阈值 t^* ,并在此基础上设置固定阈值偏移量 $\Delta t = 8$ 个灰度级,最终阈值表示为 $t_i = t^* + \Delta t$ 。灰度值不低于 t_i 的像素判定为开口区域。二值化后采用 2×2 方形结构元素进行形态学开运算,以减小孤立噪声点对计算结果的影响。全部实验图像采用相同的边缘排除距离、阈值偏移量和形态学处理参数。第 i 个像素的开口率定义为:

$$AR_i = \frac{N_{open,i}}{N_{total,i}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: AR_i 为第 i 个子区域的开口率, $N_{open,i}$ 和 $N_{total,i}$ 分别为该 ROI 内判定为开放区域的像素数和参与计算的总像素数。单张图像的平均开口率为 4 个子区域开口率的平均值:

$$AR = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 AR_i. \quad (3)$$

为了进一步描述驱动 30 s 后像素内部的局部油墨残留,在 30 s 图像中,分别对 4 个像素的 ROI 二值图进行连通域分析,以面积最大的连续油墨区域作为主收缩油墨区,其余分布于有效像素区域内的离散油墨连通区域定义为残留油墨,其面积总和记为 A_{res} 。故残留面积比例定义为:

$$R_{res} = \frac{A_{res}}{A_{pixel}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中, A_{pixel} 为排除像素边框后的有效像素面积。 R_{res} 越大,说明像素内部的局部油墨残留越明显。表 1 中的残留面积比例取 4 个像素的平均值。

表 1 基准方波和 3 种双阶段波形的开口率、残留面积比例及残留面积比例的空间标准差

Tab. 1 Aperture ratio, residual area ratio, and spatial standard deviation of the residual area ratio for the reference square wave and three two-stage waveforms

方案	启动阶段	维持阶段	5 s 平均开口率/%	30 s 平均开口率/%	30 s 残留面积比例/%	空间 SD/%
基准	全程 ± 20 V	全程 ± 20 V	65.07	69.72	7.84	0.66
方案 A	0.5 s, ± 20 V	± 15 V	66.33	66.15	9.85	1.16
方案 B	0.5 s, ± 25 V	± 20 V	68.45	68.95	10.75	0.65
方案 C	0.5 s, ± 22 V	± 18 V	72.19	73.92	3.48	0.56

而后,为进一步表征同一区域内 4 个像素残留油墨分布的一致性,采用残留面积比例的空间标准差(standard deviation, SD)进行评价:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{res,i} - \bar{R}_{res})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

式中: $R_{res,i}$ 为第 i 个像素的残留面积比例, $\bar{R}_{res}$ 为

4 个像素的平均残留面积比例, $n=4$ 。SD 越小表示像素间残留面积比例的离散程度越低。

为评价 395 nm 紫外辅助光照引起的亮度变化,分别记录环境光条件和环境光叠加紫外光条件下的亮度。对于量子点器件和普通电润湿器件,UV 诱导亮度增量统一表示为:

$$\Delta L_k = L_{k,UV} - L_{k,amb}, \quad k \in \{QD, EWD\}, \quad (6)$$

式中, $L_{k,UV}$ 和 $L_{k,amb}$ 分别表示器件 k 在环境光叠加紫外光和环境光条件下的亮度, $k=QD$ 、EWD 分别表示量子点电润湿显示器件和普通电润湿器件。

为减小紫外光源可见光泄漏及器件共同光学响应对比较结果的影响,以普通电润湿器件为对照定义对照校正亮度增量:

$$\Delta L_{net} = \Delta L_{QD} - \Delta L_{EWD} \quad (7)$$

当 $\Delta L_{net} > 0$ 时,表示在所设测试条件下,量子点电润湿显示器件相对于普通电润湿器件获得了更大的 UV 诱导亮度增量。

3 结果与讨论

3.1 驱动方式对比与基准幅值确定

为确定适用于量子点电润湿显示器件的基础驱动形式及电压范围,首先比较连续阶梯直

流、瞬态激励和带直流偏置方波下的器件响应。各加载方式的电压时序见图 3,代表性像素状态见图 4,其中图 4(a) 为未加电时的初始状态。连续阶梯直流测试中,电压由 0 V 逐级升高至 50 V,步长为 1 V,各电压等级保持 2 s,整个过程中均未观察到明显开口,如图 4(b) 所示。瞬态激励测试中,目标电压由 10 V 开始以 5 V 为步长增加,每个目标电压持续 5 s,各条件均由 0 V 独立突加。当目标电压达到 30 V 时,部分像素出现局部油膜收缩,但形成的开口约 1 s 后即发生明显回流,如图 4(c) 所示。而后在 60 Hz、50% 正极性占空比条件下,进一步测试 -2~30 V 和 -5~35 V 两组带直流偏置方波。-2~30 V 驱动 30 s 过程中未形成明显开口;-5~35 V 条件下虽出现开口,但形貌不规则,稳定性及像素间一致性均较差,如图 4(d)、(e) 所示。

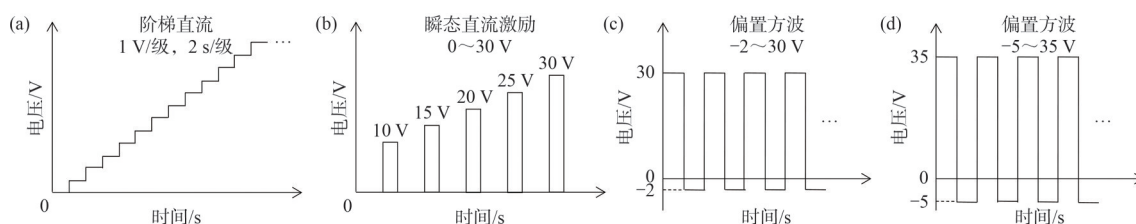


图 3 不同电压加载方式的波形示意图。(a) 0~50 V 阶梯直流;(b) 0~30 V 瞬态激励;(c) -2~30 V 偏置方波;(d) -5~35 V 偏置方波。

Fig. 3 Schematics of the voltage-loading protocols. (a) 0~50 V stepped DC; (b) 0~30 V transient DC excitation; (c) -2~30 V biased square wave; (d) -5~35 V biased square wave.

上述结果表明,当前器件能否建立稳定开口不仅取决于峰值电压,还与电压加载方式及正、负极性作用的平衡状态有关。连续阶梯直流使器件长期处于单极性电场作用下,介电层或界面附近可能逐渐发生电荷捕获和极化,俘获电荷形成的等效反向电势会削弱油-水界面的有效电润湿驱动力^[3];同时,接触角迟滞使界面状态具有历史依赖性^[4],因此外加电压逐级升高并不必然导致油膜持续收缩。相比之下,由 0 V 直接突加 30 V 可在短时间内提供较强的电润湿驱动力,诱发局部油膜破裂和收缩,但持续单极性作用下界面电荷状态仍会演化,并受到毛细回复和接触线钉扎的共同影响,因此形成的开口难以长期保持并发生回流。带直流偏置方波虽引入极性交替,但正、负电平幅值不对称,周期平均电压不为零,仍存在明显的极性偏置;当正向峰值进一步提高至

35 V 时,较强电场又会加剧局部界面变形和非均匀破裂。因此,在当前实验条件下,持续单极性及具有较大直流偏置的驱动均不利于形成稳定、均匀的像素开口。

在 60 Hz、50% 正极性占空比的对称双极性方波下,预实验比较了 ± 10 V、 ± 15 V、 ± 20 V 和 ± 25 V 连续驱动 5 s 后的像素状态。 ± 10 V 和 ± 15 V 下未观察到明显开口;幅值提高至 ± 20 V 后,像素形成较明显的开口,如图 4(f) 所示;继续提高至 ± 25 V 时,部分像素出现了油墨翻墙。相较于直流及带直流偏置的驱动方式,对称双极性方波通过周期性交替电压极性,可减弱持续单向电场作用及其引起的界面电荷单向积累。另一方面,幅值由 ± 20 V 提高至 ± 25 V 时,式(1)所示的有效电润湿驱动作用随驱动幅值提高而增强,较强电场会加剧油墨界面变形和运动,从而

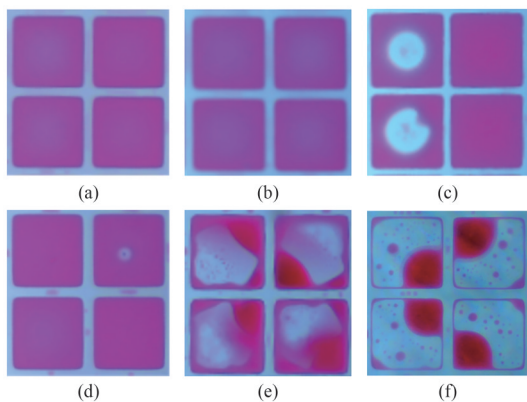


图4 不同驱动方式下量子点电润湿显示器件的代表性像素状态。(a) 初始状态;(b) 连续阶梯升压至50 V;(c) 激励电压30 V;(d) $-2 \sim 30$ V偏置方波;(e) $-5 \sim 35$ V偏置方波;(f) ± 20 V对称方波。

Fig. 4 Representative pixel states of the QD-EWD under different driving protocols. (a) Initial state; (b) Continuous stepped voltage up to 50 V; (c) 30 V transient DC excitation; (d) $-2 \sim 30$ V biased square wave; (e) $-5 \sim 35$ V biased square wave; (f) Symmetric ± 20 V square wave.

提高油墨翻墙的风险。基于上述定性预实验,后续参数研究以 ± 20 V作为基准幅值。

3.2 频率与正极性占空比对开口响应的影响

本文在 ± 20 V、正极性占空比为50%的对称双极性方波下,分别测试20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz、90 Hz和120 Hz时器件在5 s与30 s的开口率,以考察频率对开口建立过程和显示稳定性的影响,如图5(a)所示。显微观察结果

表明,在驱动过程中,20 Hz下油墨出现强烈抖动并伴随旋转,30 Hz为下油墨轻微抖动,40 Hz和50 Hz下仍可观察到抖动,60 Hz、90 Hz和120 Hz下宏观开口状态相对稳定。在40 Hz、50 Hz、60 Hz、90 Hz和120 Hz下,5 s至30 s的开口率增量分别为1.48、2.54、5.15、7.68和10.81个百分点,且在60~120 Hz范围内,器件30 s开口率均保持在68%以上。但随频率升高,5 s时的早期开口水平有所下降,表明较高频率主要表现为开口建立过程的延后。

理想 Young-Lippmann 关系主要描述准静态条件下电压与表观接触角之间的关系,其表达式本身不显含驱动频率,因此不能直接描述实际器件的动态频率响应。实际EWD具有频率相关的电学和界面动力学特性,交流频率变化可改变器件等效阻抗、介电层实际电压分配及界面极化状态^[17]。在较低频率下,单个半周期持续时间较长,油-水界面及三相接触线有较充分的时间跟随周期性电场状态发生形貌调整,因此周期性收缩、回缩等界面运动更容易表现为宏观油墨抖动。随着频率提高,流体界面难以完全跟随每个驱动周期变化,宏观抖动因而减弱;但随着驱动周期进一步缩短,器件内部电荷响应与界面运动之间的动态匹配可能发生变化,进而限制油膜破裂和收缩过程,表现为90 Hz和120 Hz条件下5 s早期开口水平较低。已有研究同样表明,驱动频率会影响EWD的开口稳定性及油墨回流行为^[5]。此外,量子点的表面配体、浓度和分散状态

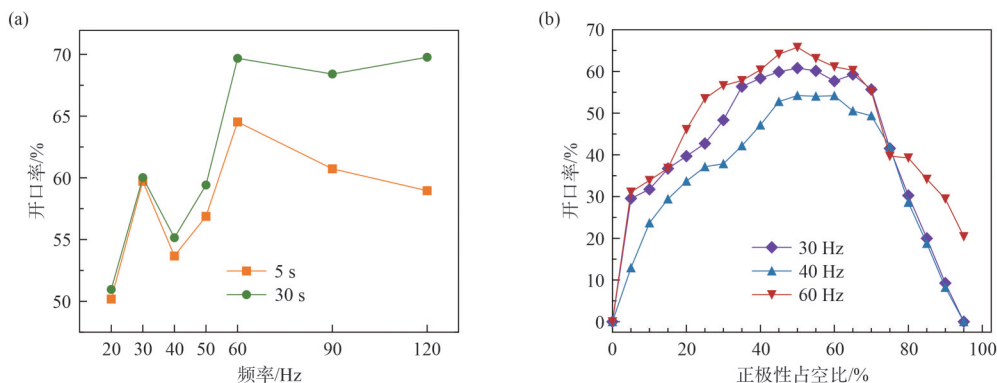


图5 量子点电润湿显示器件的频率与占空比响应。(a) 不同频率下5 s和30 s的平均开口率;(b) 30 Hz、40 Hz和60 Hz下不同正极性占空比条件下驱动5 s后的平均开口率。

Fig. 5 Frequency and duty-cycle responses of the QD-EWD. (a) Average aperture ratios at 5 s and 30 s under different frequencies; (b) Average aperture ratios after 5 s of driving under different positive-polarity duty cycles at 30 Hz, 40 Hz, and 60 Hz.

可能改变体系界面张力及润湿行为^[12-14]。因此本实验中的频率响应可理解为器件电学弛豫与界面流体动力学共同作用的结果,而量子点界面效应的具体贡献仍需结合阻抗谱及动态界面测试进一步验证。

在此基础上,为比较正极性作用时间对器件早期驱动响应的影响,在 $\pm 20\text{ V}$ 条件下分别设置 30 Hz、40 Hz 和 60 Hz 驱动频率,测量不同正极性占空比下连续驱动 5 s 后的平均开口率。如图 5(b) 所示,3 种频率下的开口率均随正极性占空比增加呈先升高后降低的总体趋势,并在 50% 附近形成较高开口状态。50% 占空比下,30 Hz、40 Hz 和 60 Hz 对应的开口率分别为 60.80%、54.21% 和 65.79%。当占空比提高至 95% 时,30 Hz 和 40 Hz 下未观察到明显开口,而 60 Hz 下仍保持 20.41% 的开口率,表明不同频率下器件对极性作用时间配比的响应存在差异。

对于正、负峰值等幅的双极性方波,改变正极性占空比不会改变理论均方根电压,但会改变正、负极性的作用时间及周期平均电压:

$$\bar{V} = (2D - 1)V_0, \quad (8)$$

式中: D 为以 0~1 表示的正极性占空比, V_0 为电压幅值。当占空比偏离 50% 时,波形中将产生非零平均电压,同时正、负极性作用时间失衡。已有研究表明,波形占空比和极性交替方式会影响电润湿显示器件的界面电荷状态、油墨回流及开口稳定性^[5-7]。因此,50% 附近获得较高开口率,可能主要源于较为平衡的双极性作用减弱了持续极性偏置及界面净电荷积累;随着占空比进一步偏离 50%,单极性的持续作用时间增加,界

面电荷及极化状态发生变化,从而改变有效电润湿驱动力并降低开口稳定性。此外,量子点表面配体及分散状态还可能改变体系的界面润湿特性^[12,14],从而增加当前器件对极性作用时间的敏感性。

综合 5 s 与 30 s 结果,60 Hz 下既未出现 20~50 Hz 条件下较明显的油墨抖动,又能够在 5 s 时获得高于 90 Hz 和 120 Hz 的早期开口水平,同时 30 s 开口率保持在较高范围,因此后续选取 60 Hz 作为基准频率。需要说明的是,频率扫描与占空比扫描分别采用独立加载过程进行测试,因此二者在 60 Hz、50% 正极性占空比这一相同名义条件下获得的 5 s 平均开口率存在小幅差异。

3.3 量子点引入与紫外光辅助条件下的亮度响应

为明确量子点引入后器件亮度随正极性占空比变化的响应特征,本节选取普通电润湿器件与量子点电润湿显示器件,在 $\pm 20\text{ V}$ 、60 Hz 基准方波下分别测试环境光及环境光叠加 395 nm 紫外光条件下的亮度。如图 6(a) 所示,环境光条件下普通器件的亮度随正极性占空比增加总体呈上升趋势,由 0% 时的 359.30 cd/m^2 增至 95% 时的 562.75 cd/m^2 ;而量子点器件的亮度则由 365.34 cd/m^2 逐渐增至 50% 时的 550.98 cd/m^2 ,随后降至 95% 时的 384.68 cd/m^2 ,呈现先升高后降低的变化特征。量子点器件的亮度-占空比响应与图 5(b) 所示 5 s 开口率-占空比响应在总体趋势上相似,尽管两组数据的采集时刻不同,二者均在 50% 正极性占空比附近达到较高水平,并在进一步偏离极性平衡后下降,说明极性作用时

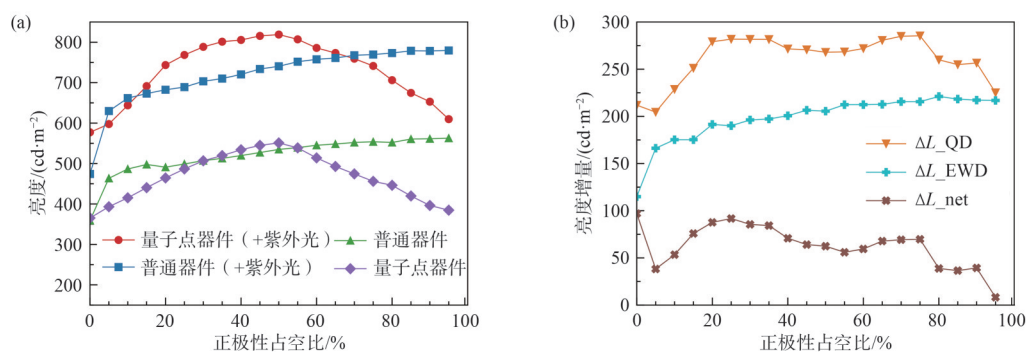


图 6 基准方波下普通电润湿器件和量子点电润湿显示器件的亮度响应。(a) 不同照明条件下的亮度-占空比关系; (b) UV 诱导亮度增量及对照校正亮度增量。

Fig. 6 Luminance responses of conventional EWD and QD-EWD under the reference square wave. (a) Luminance-duty-cycle curves under different illumination conditions; (b) UV-induced and control-corrected luminance increments.

间对油墨收缩形貌的调控会进一步反映到器件光学输出。相比之下,普通电润湿器件的亮度随正极性作用时间增加而总体升高。由于两类器件除油墨中是否复配量子点外,其余器件结构及测试条件保持一致,这种差异表明量子点引入后器件的亮度-占空比响应发生了改变。这种差异可能同时与量子点复配对油墨界面润湿和收缩形貌的影响,以及其对油墨吸收、散射和受激发光特性的改变有关^[11-15]。因此,当前量子点器件的亮度-占空比关系不能简单沿用普通电润湿器件的驱动-光学映射规律。

进一步比较两类器件可见,在5%~95%的有效扫描区间内,环境光下量子点器件仅在35%~50%占空比范围内获得高于普通器件的亮度,而叠加395 nm紫外光后,该范围扩大至15%~65%。图6(b)显示,量子点器件与普通器件的UV诱导亮度增量分别为204.48~285.36 cd/m²和114.91~221.09 cd/m²;经普通器件对照校正后,各占空比下的 ΔL_{net} 均大于0,范围为8.25~96.96 cd/m²。395 nm紫外光能够激发量子点产生附加光学输出,而普通器件测得的UV诱导亮度增量可能包含紫外光源可见光泄漏及器件与白色底板的共同光学响应,因此, $\Delta L_{\text{net}} > 0$ 表明相对于普通电润湿器件,量子点器件在相同测试条件下仍表现出额外的UV诱导亮度增量。需要指出的是, ΔL_{net} 并未在50%占空比处达到最大值,说明其变化不能简单等同于几何开口率或量子点发光强度,还受到油墨分布、吸收、界面反射以及激发光和出射光传播路径等因素共同影响。因此,395 nm紫外光在本文中主要用于表征量子点复配油墨的附加光学响应,并非器件实现显示所必需的工作光源。

3.4 双阶段波形调控及开口保持特性分析

前述幅值实验表明,油膜启动与持续维持对驱动强度的要求并不完全相同:启动阶段需要较强的瞬态电润湿作用,以促进油膜破裂、接触线去钉扎及初始收缩;而在开口形成后,若继续保持较高幅值,则可能增加界面过度变形、油膜分裂及油墨翻墙的风险。基于这一差异,本文将驱动过程划分为启动和维持阶段,在启动阶段施加较高幅值以建立开口,随后降低幅值以维持油墨收缩状态并减弱持续高场作用。结合前期器件

响应观察,固定启动阶段为0.5 s,本节不对启动时间进行优化,而重点考察启动幅值与维持幅值的匹配关系。同时,结合 ± 20 V可建立稳定开口、 ± 25 V连续驱动5 s时部分像素出现翻墙的预实验结果,据此选取3组具有代表性的启动-维持幅值组合进行比较,即在60 Hz,50%正极性占空比下,以全程 ± 20 V方波为基准进行实验对比,具体参数及结果见表1。图7所示的波形结构仅示意两个阶段的幅值切换关系,方波周期数量不代表实际周期数。

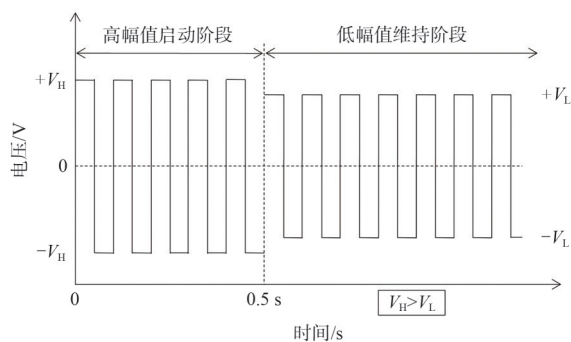


图7 启动-维持双阶段波形示意图

Fig. 7 Schematic of the two-stage driving waveform with startup and maintenance phases

基准方波的平均开口率由5 s时的65.07%增至30 s时的69.72%,表明在 ± 20 V持续驱动下,油墨仍经历一定程度的形貌调整。需要说明的是,双阶段波形实验采用独立加载的基准组进行同步对照,因此其基准开口率与前述占空比扫描中的测量值存在小幅差异。

由表1可知,不同启动与维持幅值组合表现出不同的早期开口与持续驱动特征。方案A在5 s时的平均开口率为66.33%,较同期基准提高1.26个百分点;30 s时为66.15%,较同期基准低3.57个百分点,残留面积比例和空间标准差分别增至9.85%和1.16%。这表明 ± 15 V维持阶段虽能够保持一定开口,但维持作用相对不足。较低的维持幅值会减弱电润湿作用,使毛细回复作用相对增强,三相接触线可能发生回缩并引起局部油墨回铺或重新分布,从而增加局部残留及像素间响应差异。

方案B采用 ± 25 V启动、 ± 20 V维持,其5 s平均开口率提高至68.45%,但30 s时仅为68.95%,未超过基准水平,且残留面积比例达到10.75%。

该结果表明,启动幅值并非越高越好。较高启动幅值能够增强初始电润湿作用,但也可能加剧局部界面变形,增加多点破裂和非均匀收缩的概率。由此形成的离散油滴受到像素墙、疏水层局部缺陷及三相接触线钉扎等因素影响后,可能难以在后续维持阶段重新聚并。因此过高的启动幅值虽有利于早期开口,却可能增加油膜分裂和离散残留风险,这也与过驱动条件下油膜分裂加剧的研究结果相符^[6,10]。

在所测试的 3 种双阶段幅值组合中,方案 C 表现出较好的综合驱动结果。其 5 s 和 30 s 平均开口率分别为 72.19% 和 73.92%,较同期基准分别提高 7.12 和 4.20 个百分点,其中 30 s 平均开口率相对提高 6.02%;残留面积比例由基准的 7.84% 降至 3.48%,相对降低 55.61%,空间标准差由 0.66% 降至 0.56%。上述结果表明,在本实验所测试的幅值组合中,方案 C 在开口保持、残留抑制及像素间一致性方面均表现较好。

图 8 中的代表性像素形貌与上述定量结果一致。基准方波下开放区域内仍存在一定数量的离散残滴,方案 A 在 30 s 时像素间油墨分布差异较明显,方案 B 也可观察到较多分散油滴;相比之下,方案 C 在 5 s 时已形成较集中的油墨收缩区域,30 s 时主要收缩区域仍保持相对稳定,开放区域内的大尺寸残滴较少。上述形貌特征与方案 C 较高的开口率、较低的残留面积比例和空间标准差相对应。

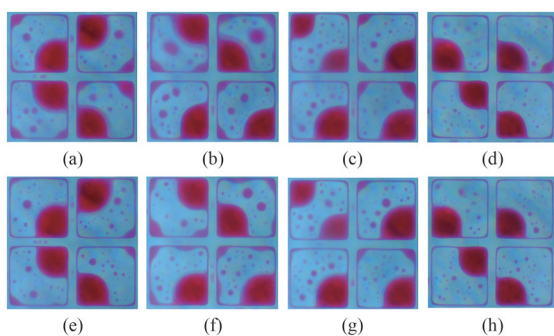


图 8 不同波形下的像素开口形貌。(a)~(d) 5 s 图像;(e)~(h) 30 s 图像。各列依次对应基准方波、方案 A、方案 B 和方案 C。

Fig. 8 Pixel aperture morphologies at 5 s ((a)~(d)) and 30 s ((e)~(h)). The columns correspond to the reference square wave, Scheme A, Scheme B, and Scheme C.

结合上述实验结果及前述幅值预实验,方案 C 较好的综合表现可能与启动和维持幅值的匹配有关。启动阶段采用 ± 22 V,相较于 ± 20 V 能够提供更强的初始电润湿作用,同时低于连续驱动时已出现油墨翻墙现象的 ± 25 V 条件,因此可能在促进油膜破裂和初始收缩的同时,降低局部过度变形和多点破裂的风险。随后采用 ± 18 V 维持,可能有助于减弱持续较高场强作用下的界面变形,同时保持已形成主要油墨收缩区域;相比之下,方案 A 中 ± 15 V 的维持幅值较低,可能使毛细回复作用相对增强并引起局部油墨回铺。由此推测,方案 C 较低的残留及较好的空间一致性与启动和维持阶段驱动强度的合理匹配有关。需要指出的是,本文未直接测量接触线运动、局部界面受力及电荷状态,因此上述分析主要是基于实验现象和已有电润湿理论所作的机理解释,具体界面动力学过程仍需进一步验证。

3.5 双阶段波形的亮度输出特性

为进一步验证双阶段波形对器件光学输出的改善效果,本节比较基准方波与方案 C 驱动下量子点电润湿显示器件的亮度-正极性占空比响应。在占空比扫描过程中,方案 C 启动阶段和维持阶段采用相同的正极性占空比,仅驱动幅值分别设置为 ± 22 V 和 ± 18 V,其余波形参数保持不变。如图 9 所示,在环境光条件下,方案 C 在 5%~95% 占空比范围内的亮度均高于基准方波,相对基准方波的亮度提升量为 40.53~77.85 cd/m^2 ;叠加 395 nm 紫外光后,方案 C 在 5%~95% 范围

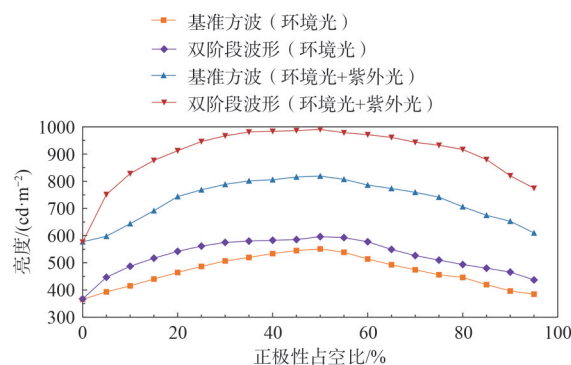


图 9 量子点电润湿显示器件在基准方波和双阶段波形下的亮度-占空比关系

Fig. 9 Luminance-duty-cycle relationships of the quantum-dot electrowetting display driven by the reference square wave and the two-stage waveform

内的亮度提升量达到153.49~210.59 cd/m²。两种照明条件下,方案C的亮度均在50%占空比处达到测试范围内的最大值。其中,环境光下亮度由550.98 cd/m²提高至596.16 cd/m²,相对提高8.20%;环境光叠加紫外光后,亮度由818.91 cd/m²提高至990.50 cd/m²,相对提高20.95%。

在50%正极性占空比下,方案C驱动30 s后的平均开口率由69.72%提高至73.92%,残留面积比例由7.84%降至3.48%,说明开放区域内的油墨覆盖减少,从而有利于提高环境光条件下的器件亮度输出。叠加395 nm紫外光后,方案C的亮度较基准提高20.95%,这一改善可能与量子点受激发光,以及油墨形貌对激发光和出射光传播的共同影响有关。由此说明,双阶段波形不仅改善了持续驱动后的油墨收缩形貌,其在紫外辅助激发条件下仍能够获得更高的器件光学输出。

4 结 论

本文围绕量子点电润湿显示器件的驱动响应及双阶段波形调控开展研究。开放式实验表明,量子点引入油墨后的接触角调制范围明显减小,说明量子点的引入会改变油墨体系的界面电润湿响应。器件实验结果表明,相较于持续单极

性及带直流偏置的驱动方式,对称双极性方波更有利于形成稳定像素开口;在±20 V条件下,驱动频率及正、负极性作用时间配比均会影响开口建立过程,其中60 Hz、50%正极性占空比下连续驱动5 s后的平均开口率达到65.79%。同时,量子点器件与普通电润湿器件呈现不同的亮度-占空比响应,表明传统器件的驱动光学映射不能直接用于当前量子点电润湿器件。

针对恒定幅值难以兼顾早期开口与持续形貌稳定的问题,本文采用启动-维持双阶段驱动。在所测试组合中,0.5 s、±22 V启动,随后±18 V维持的方案C表现出较好的综合效果,其30 s平均开口率达到73.92%,残留面积比例由基准的7.84%降至3.48%;在50%正极性占空比下,环境光及环境光叠加395 nm紫外光条件下的亮度较基准分别提高8.20%和20.95%。结果表明,通过匹配启动与维持阶段的驱动幅值,可在保持有效开口的同时降低持续驱动后的油墨残留并改善器件光学输出。受当前实验条件限制,器件动态响应时间尚未进行定量表征,开放式实验与封装器件的量子点浓度条件也未完全对应,且持续驱动性能的主要考察时间仅为30 s。后续可在此基础上进一步完善器件动态响应、浓度效应及长期驱动稳定性的研究。

参 考 文 献:

- [1] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 383-385.
- [2] 杨斌,邱莹,林喆,等. 柔性电润湿显示发展现状 & 展望[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(4): 436-446.
YANG B, QIU Y, LIN Z, et al. Development status and outlook of flexible electrowetting display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(4): 436-446. (in Chinese)
- [3] ZHANG T Y, ZHU H R, LIU L W, et al. Charge trapping model for investigating oil backflow mechanism in electrowetting display pixels [J]. *Scientific Reports*, 2026, 16(1): 24527.
- [4] 谢子昱,梅婷,林珊玲,等. 电润湿电子纸迟滞特性的灰度失真校正方法[J]. *光子学报*, 2024, 53(7): 0712004.
XIE Z Y, MEI T, LIN S L, et al. Grayscale distortion correction method for hysteresis characteristics of electrowetting display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(7): 0712004. (in Chinese)
- [5] LIU L W, WU Z Y, WANG L, et al. Design of an AC driving waveform based on characteristics of electrowetting stability for electrowetting displays [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 618752.
- [6] WANG J S, WU X Y, LIN Y B, et al. Polarity-dependent driving scheme for suppressing oil film splitting in electrowetting displays [J]. *Micromachines*, 2025, 16(3): 338.
- [7] MEI T, LIN S L, LIN Z X, et al. Technology of dot inversion bipolar grayscale modulation for electrowetting displays [J]. *Optics Express*, 2025, 33(21): 45117-45129.
- [8] YANG Y J, YI Z C, XU W Z, et al. Optimization of overdriving pulse for luminance stability of electrowetting

- displays [J]. *Micromachines*, 2025, 16(10): 1085.
- [9] JIANG H W, LONG Z X, CHEN Q R, *et al.* A multi-stage reset driving scheme based on the sawtooth function for suppressing oil splitting of electrowetting displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2025, 33(9): 993-1005.
- [10] WANG J S, YI Z C, JIANG M H, *et al.* Driving waveform optimization of electrowetting displays based on pixel's 2-D model for reducing oil reflux [J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28536-28551.
- [11] ROQUES-CARMES T, ALDEEK F, BALAN L, *et al.* Aqueous dispersions of core/shell CdSe/CdS quantum dots as nanofluids for electrowetting [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 377(1/3): 269-277.
- [12] TOHGHA U N, ALVINO E L, JARNAGIN C C, *et al.* Electrowetting behavior and digital microfluidic applications of fluorescent, polymer-encapsulated quantum dot nanofluids [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(31): 28487-28498.
- [13] TOHGHA U N, WATSON A M, GODMAN N P. Tuning the electrowetting behavior of quantum dot nanofluids [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 584: 395-402.
- [14] TOHGHA U N, WATSON A M, GODMAN N P. Low voltage electrowetting of non-aqueous fluorescent quantum dot nanofluids [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 359: 119086.
- [15] TOHGHA U N, LY J T, LEE K M, *et al.* Switchable optical properties of dyes and nanoparticles in electrowetting devices [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(2): 142.
- [16] LONG Z X, YI Z C, ZHANG H, *et al.* Toward suppressing oil backflow based on a combined driving waveform for electrowetting displays [J]. *Micromachines*, 2022, 13(6): 948.
- [17] LI Y J, CAHILL B P. Frequency dependence of low-voltage electrowetting investigated by impedance spectroscopy [J]. *Langmuir*, 2017, 33(45): 13139-13147.
- [18] LI Q L, YOU Y X, YANG T H, *et al.* Achieving directional oil manipulation by open inducing structure for electrowetting displays [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2026, 12(7): e00843.
- [19] 刘予敏, 林珊玲, 林志贤, 等. 不同色温环境光下彩色电润湿电子纸的色彩校正[J]. 液晶与显示, 2024, 39(1): 32-39.
- LIU Y M, LIN S L, LIN Z X, *et al.* Color correction of color electrowetting display under ambient light with different color temperatures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(1): 32-39. (in Chinese)

作者简介:



石羽倩, 女, 硕士研究生, 2024 年于福州大学获得学士学位, 主要从事量子点电润湿器件的研究。E-mail: 2840499672@qq.com



林志贤, 男, 博士, 教授, 2010 年于福州大学获得博士学位, 主要从事图像处理以及平板显示驱动技术的研究。E-mail: lzx2005000@163.com