

文章编号:1007-2780(2016)08-0760-08

负型液晶在 ADS 广视角技术中的应用

王菲菲,邵喜斌*

(北京京东显示技术有限公司,北京 100176)

摘要:为满足液晶面板尤其是大尺寸产品对高透过率不断提升的需求,进行负型液晶在 ADS 广视角技术中的研究。首先,介绍 ADS 技术的发展进程及主要特点,然后模拟分析负型液晶参数变化对 ADS 显示特性的影响,最后,利用 mini cell 对负型液晶和 PI 材料的进行实验室评价。液晶参数中: Δn 影响透过率, $|\Delta\epsilon|$ 和 K 值影响响应时间和工作电压, γ_1 影响响应时间。负型液晶透过率比正型液晶提升约 8%,但响应时间增加约 50%,负型液晶与 PI 的匹配性及残像差于正型液晶,与 PI 材料的搭配对残像有显著影响。调整负型液晶参数可优化产品性能。负型液晶可大幅提高产品的透过率,但需要加快响应时间和提升残像水平。响应速度的提高除了需要降低液晶的黏度,还需在电极结构优化方面做更多努力,而残像水平的提升,除提高负型液晶材料本身的稳定性外,与其搭配的取向材料的研发也十分重要。

关键词:广视角技术;高级超维场转换技术;负型液晶;残像

中图分类号:O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0760

Application of negative LC in ADS wide view technology

WANG Fei-fei, SHAO Xi-Bin*

(Beijing BOE Display Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to meet the demand of high transmittance for large size products, we research the application of negative LC in ADS technology. First, we introduce the development progress and main features of ADS technology. And then, we analyze the relationship between negative LC parameters and ADS display characteristics. Finally, we evaluate the features of different negative LC matching with different PI materials. Among the parameters of negative LC, Δn greatly affects on transmittance, $|\Delta\epsilon|$ and K mainly impact on response time and operation voltage, γ_1 has great influence on RT. The transmittance of negative LC is about 8% higher than that of positive LC, but the RT is increased by $\sim 50\%$. The matching of negative LC and PI materials is worse than positive LC, and it has significant impact on imaging sticking. The product performance can be optimized by adjusting the negative liquid crystal parameters. The transmittance can be greatly improved by using of negative LC, but the response time and image sticking should be greatly improved for large size display. Response time can be fasted by lower γ_1 of LC, but it may be not enough, further optimizing the pixel structure is also necessary. Image sticking can be improved by enhancing the stabilized of LC, while the development of PI material for negative LC is also very important.

Key words: wide view technology; advanced super dimension switch technology; negative liquid crystal; image sticking

收稿日期:2016-04-25;修订日期:2016-05-23.

* 通信联系人, E-mail: shaoxibin@boe.com.cn

1 引言

基于液晶材料独特的电光特性^[1-3]和显示模式的不断发展,液晶被广泛应用于显示当中^[4],TN-LCD (Twist Nematic Liquid Crystal Display,扭曲向列相液晶显示)是最早提出并实现量产的显示模式,生产成本较低,主要优点是其工作温度范围较高,响应速度快。随着 LCD 技术的发展,广视角成为显示领域追求的目标。TN-LCD 的视角问题限制了其应用空间。现有的广视角技术有:TN+Film(广视角补偿膜)^[5],MVA (Multi-domain Vertical Alignment) 模式^[6]和 PVA (Patterned Vertical Alignment) 模式^[7],以及 IPS (In Plane switching) 模式^[8]和 ADS (Advanced Super Dimension Switch) 模式^[9]。

在众多广视角技术中,高级超维场转换(ADS)技术以其较高的透过率和色彩还原性,成为液晶显示最具竞争力的显示模式,广泛应用于手机、笔记本、台式机监视器、电视等各个产品群。对于 ADS 显示模式,原理上正型液晶和负型液晶均可适用,传统的 ADS 模式中主要使用正型液晶。经过多年发展,通过液晶材料的改善和像素设计优化进一步提升透过率的空间已经非常有限。而使用负型液晶,理论上可再提升透过率 10% 以上,因此,各液晶面板厂商将目光转向负型液晶^[10],纷纷进行负型液晶材料及工艺的开发工作。

目前,负型液晶在 ADS 模式的应用已经取得一定突破,在手机屏上实现量产。而对于 NB (Note Book)、TPC (Tablet PC) 以及 MNT (Monitor) 以及大尺寸的 TV 产品,由于残像水平差及响应时间慢的制约,各液晶面板厂商还在进行负型液晶应用的研究。本文将介绍 ADS 技术及其演进历史,利用软件模拟分析负型液晶主要参数对 ADS 模式的显示的影响规律;最后,利用 ADS 模式 mini cell 对负型液晶及 PI 材料进行评价。

2 ADS 广视角技术

FFS 技术是 1996 年提出的广视角技术,也属于水平电场显示技术,FFS 模式工作电压低,色

彩还原性高,响应速度快,并且具备比 IPS 更高的透过率^[1]等诸多突出优点,在中小尺寸产品上得到了广泛应用。

BOE 在 FFS 的基础上,通过对设计、材料和工艺的全方面改进,使其应用领域扩展到 TV 全系列产品(统称为 ADS 技术),成为唯一实现从小尺寸的手机屏到超大尺寸电视全覆盖的广视角技术。持续提升 ADS 产品的性能是 BOE 近年来重点研发工作之一。

2.1 ADS 技术的电场驱动原理及发展进程

ADS 技术是一种通过 TFT 基板上的顶层条状像素电极和底层面状公共电极之间产生的边缘电场,使电极之间及电极正上方的液晶分子都能在平行于玻璃基板的平面上发生转动的技术。ADS 技术属于水平电场的显示技术,由于 LC 分子主要在水平平面旋转,从各个方向上看来,光程差变化不大,透光率差异小,这也正是 ADS 实现广视角原因。

随着 ADS 双畴技术的开发以及逐步优化,目前的 ADS 广视角技术具有比以往更优异的性能。ADS 技术的发展主要经历以下几个阶段:第一阶段,主要实现宽视角、高开口率、低功耗、高亮度等问题,使用正型液晶,虽然正型液晶在边缘电场作用下有倾斜排列而导致光效率低,但是其响应速度快,驱动电压低,残余直流电压低,价格便宜等优点,确保了边缘场模式的产品化。第二阶段,从电极结构方面考虑改善了色偏,将像素改为楔形电极,采用双畴结构^[11]。第三阶段,楔形电极方面的改良大幅缩小彩色滤光片固有的黑矩阵与像素电极间的重叠幅度,进一步提高透光率。第四阶段,通过对像素结构、驱动技术和材料的优化,进一步提升透过率、改善色偏和残像,确保大尺寸 TV 的充电率。

2.2 ADS 技术的优缺点

“硬屏”技术:ADS 技术液晶在初始状态呈水平排列,并且施加电压时在水平电场的作用下液晶仍水平排列,当外界施加压力时,水平排列的结构不容易受外力影响,实物表现为按压无水波纹;而被称为“软屏”技术的 VA 模式,液晶初始状态呈垂直排列状,施加电压时在垂直电场的作用下液晶会在一定程度上倾斜排列,当外界施加压力时,按压处液晶排列容易受到影响呈现暗影,且回复时间慢。

广视角:相比其他液晶面板(TN 面板),ADS 超宽视角技术像素电极的图形为楔状图形,这样在一个像素中存在两个不同的电场方向,在一个像素内液晶分子从最初的排列位置偏转到两个相反的方向,达到自补偿效果,增大可视角度。

高透过率:ADS 液晶屏像素电极和公共电极均采用 ITO 透明电极材料,狭缝电极的顶部液晶也可以在电场作用下旋转,增加了光的透过率,克服了常规 IPS 技术透光效率低的问题,大视角观察时,透过率变化较小。

高速运动图像实现能力:ADS 液晶屏的多维场转换技术,具备更高的液晶分子响应速度和 G to G 响应时间的均一性,没有拖尾和重影现象,可以更好的表现运动画面,为大屏幕液晶电视应用提供最佳的视角和图像解决方案。

但是,通常 ADS 技术需要在制造过程中经过 5~6 次的光刻掩膜过程,比其它广视角技术增加一次,工艺复杂程度和难度有所增加,生产的良品率与成本有所上升。目前,BOE 已经实现同等数量掩膜的工艺。

3 负型液晶模拟分析

液晶是 LCD 的核心材料,其特性参数对 LCD 的显示特性有直接影响,液晶参数可以通过液晶单体的种类及含量进行调整,各参数之间相互制约,需要根据显示特性的要求平衡各个参数而得到合理的参数值。本文中关注的显示特性主要包括透过率(Transmittance, Tr),响应时间(Response Time, RT),工作电压(Operation Voltage, VOP)。

对于水平电场模式下,透过 TFT 侧偏光板的光沿着 Z 轴方向前进,射出 CF 侧偏光板的光透过率可以通过 Jones Vector(V')得出相应的光透过率 Tr 公式(1)。

$$Tr = \frac{1}{2} \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda}, \quad (1)$$

其中: Δn 为液晶的双折射,盒厚 d 表示各层液晶工作状态综合后的结果,与实际盒厚略有差异。 $\Delta n d$ 共同影响 Tr,当 $\Delta n d$ 为 $\lambda/2$ 时,Tr 有最大值。可以通过调整 Δn 和 d 值优化 Tr。

根据 Freedericksz 转变,ADS 模式的阈值电压 V_{th} 可以如公式(2)所示,

$$V_{th} = \frac{\pi L}{d} \sqrt{\frac{K_{22}}{\epsilon_0 |\Delta \epsilon|}}, \quad (2)$$

其中: d 为液晶盒厚, L 为电极间距。 V_{th} 与 K_{22} 成正比,与 $\epsilon_0 |\Delta \epsilon|$ 成反比。

液晶的响应时间为 t_{on} 与 t_{off} 之和,亮度从 0% 上升到 90% 的时间间隔为开态响应时间 t_{on} ,而亮度从 100% 下降到 10% 的时间为关态响应时间 t_{off} 。通过求解力矩和弹性阻力合成后的力平衡公式,得出水平电场相应的 t_{on} 和 t_{off} 。 t_{on} 和 t_{off} 都与液晶的转动黏度 γ_1 成正比,与 $\epsilon_0 |\Delta \epsilon|$ 成反比。其中 t_{on} 对应外加电压时的液晶转动状态,受外加电压的影响较大; t_{off} 与 $\gamma_1 d^2$ 成正比,与 K_{22} 成反比。

$$t_{on} = \frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 - \frac{\pi^2 K_{22}}{d^2}} = \frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \Delta \epsilon (E^2 - E_{th}^2)}, \quad (3)$$

$$t_{off} = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K_{22}} = \frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \Delta \epsilon E_{th}^2}. \quad (4)$$

根据上述公式,可从理论上得出液晶参数与显示特性的关系趋势,但由于公式推导过程中均为理想化条件,忽略预倾角及液晶在电场作用下的实际指向矢分布等其他因素的影响。我们使用 Tech Wiz 2D 软件模拟在接近 ADS 模式实际工作条件下,负型液晶各个参数的变化对显示特性的影响情况,为优化液晶参数提供数据支持。液晶盒厚 d 设定为 $3.55 \mu\text{m}$,预倾角为 2° ,电极结构为:Pitch $8 \mu\text{m}$,width $2.3 \mu\text{m}$,Slit angle 7° 。

3.2 折射率

从视角及透过率的角度考虑,要求液晶材料具有适度的 Δn ,不同显示模式对 Δn 值的要求不同;一般为消除彩虹效应,获得大的对比度和视角, Δn 值范围应在 0.07~0.11 之间,最好在 0.08~0.1 左右。

首先, n_e 保持 1.589 不变, Δn 从 0.086 增加到 0.118(间隔 0.004): Δn 的变化对 Tr 的影响最大,随着 Δn 增加,Tr 呈现先增后减的趋势,存在最高极值点,与公式(1)的趋势相吻合。如图 1(a)所示,当 Δn 增加量为 0.024 时,Tr 提升百分比最高,可达 11.5%;如图 1(b)所示, Δn 增加量为 0.032 时,VOP 降低百分比为 8%,RT 降低百分比为 1.97%。

3.3 介电常数

保持 $\epsilon_{//}$ 为 3.47 不变, $\Delta \epsilon$ 由 -1.6 逐渐降低至

与公式(3)和(4)的趋势一致。 γ_1 值增加 54, Tr 增加百分比为 0.01%, VOP 无变化, RT 增加百分比为 22.17%。

3.5 弹性常数

液晶有展曲形变,扭曲形变和弯曲形变,其弹性常数分别对应 K_{11} , K_{22} 和 K_{33} 。在 ADS 模式水平电场中,液晶分布基本上是平行于玻璃基板的,使用平行电场使其转动,控制透射光的相位,因此, K_{22} 对 ADS 模式显示性能的影响较大;而 K_{33} 对 ADS 模式显示性能的影响较小, K_{33} 对于弯曲形变的 VA 模式的影响较大^[12]。

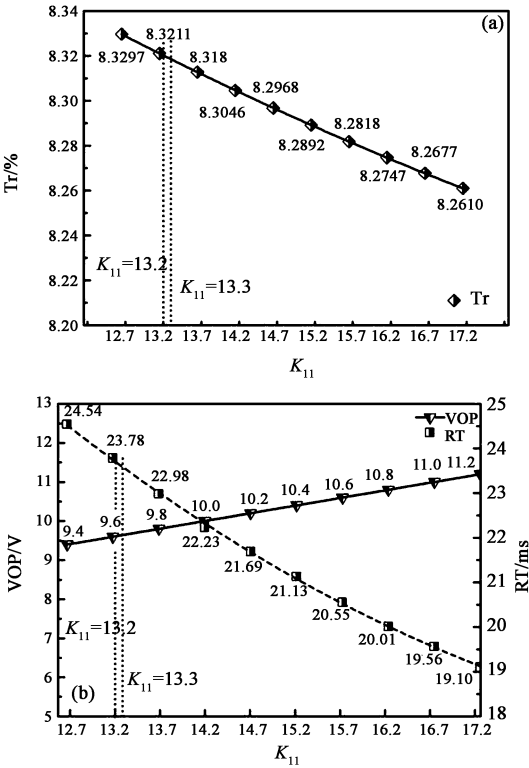


图 4 K_{11} 与(a)Tr 的关系;(b)VOP 及 RT 的关系
Fig.4 Relation curve between (a) K_{11} and Tr; (b) K_{11} and VOP&RT

K_{11} 从 12.7 增加到 17.2(间隔为 0.5)。如图 4(a)所示,随着 K_{11} 增加,Tr 呈微弱下降趋势,如图 4(b)所示,而 VOP 呈上升趋势,RT 呈下降趋势。 K_{11} 增加 4.5 时,Tr 下降百分比为 0.01%,VOP 提升百分比为 19.15%,RT 下降百分比为 22.17%。 K_{22} 难于测测量,通常根据推算, K_{22} 约等于 $K_{11}/2$, K_{22} 对 Tr, VOP 以及 RT 的影响趋势 K_{11} 与相同。

因此,综合上述模拟结果,从提示产品性能的角度考虑,Tr 的提升可以通过调整 Δn 值来实

现;VOP 降低可以通过增加 $|\Delta\epsilon|$ 或者降低 K_{11} (K_{22})实现;降低 RT 可以通过降低 γ_1 及和提高 K_{11} (K_{22})实现。

4 负型液晶实验室评价

4.1 实验条件及测试设备

测试项目:液晶的光学特性,液晶与 PI 的匹配性,残像;测试设备:Panel 评价设备 BMS-1205 测试样品的光学特性,日本东京 6254 型设备测试样品的 VHR/RDC 特性,CA2000 测试样品的亮度。台阶仪 DekTak 150 测试 PI 的厚度,大塚电子(OTSUKA)的 RETS-4600 测试 mini cell 的 cell gap, pretilt angle 等参数。VHR 的测试条件: Square 5 V,持续 60 μ s,间隔 16.7 ms,Temp:60 $^{\circ}$ C。

表 1 正型液晶和负型液晶参数
Tab.1 LC parameters of positive LC and negative LC

Item	液晶参数	液晶型号		Remark
		正型液晶	负型液晶	
		M-P	M-N	
1	Tni ($^{\circ}$ C)	80	75.5	
2	γ_1 (g/cm ³)	63	100	
3	n_e	1.600	1.587	
4	n_o	1.487	1.483	
5	Δn	0.113	0.104	
6	$\epsilon_{//}$	10.10	3.60	
7	$\epsilon_{\perp}$	3.20	7.20	
8	$\Delta\epsilon$	6.90	-3.60	
9	K_{11}	13.2	13.3	
10	K_{22}	6.7	7.5 *	$K_{22} \approx K_{11}/2$
11	K_{33}	13.3	15.0	

使用 mini cell 对负型液晶及 PI 匹配性进行评价。Mini cell 制备流程如下:将具有电极结构的 TFT 玻璃和白玻璃洗净,涂覆 PI,Rubbing 后涂覆 seal 胶,对盒,然后利用毛细作用将液晶灌入液晶盒中,最后用 UV 胶封口。其中,PI100 nm, cell gap3.55 μ m, pretilt angle2 $^{\circ}$, 正型液晶使用 mini cell 的电极结构为 Pitch 8 μ m, Width 2.6

μm, Slit angle 7°; 负型液晶 mini cell 的电极结构为 Pitch 8 μm, Width 2.3 μm, Slit angle 11°。

所使用的液晶型号及液晶参数如表 1 所示。本节所用的 PI 均为 rubbing PI, 正型液晶搭配 N 公司的 PI 材料 A(型号: N-A), 负型液晶分别搭配 N 公司的 PI 材料 B(型号: N-B) 和 J 公司的 PI 材料 C(型号: J-C)。

4.2 光学特性

利用上述方法制备的 ADS mini cell, 本部分 mini cell 所测试的液晶参数如表 1 所示。将负型液晶与正型液晶从 Tr, VOP 和 RT 三个方面进行对比, 测试结果如表 2 所示, 比较负型液晶与正型液晶光学测试结果: 负型液晶 M-N 的 Tr 比正型液晶 M-P 的提升了 8.29%, VOP 基本不变, 但是 RT 比正型液晶增加了 49.5%。

负型液晶比正型液晶 Tr 有提升, 主要是由于负型液晶分子沿垂直于电场方向排布, 在 ADS 显示模式中, 负型液晶分子因垂直于电场分布因而表现较低的倾角, 比起正型液晶, 扭曲角分布也较均匀, 因而在电极正上方及边缘的位置表现比正型液晶更高的透过率。

VOP 随 |Δε| 增加而减小(如图 2), 随 K₁₁(K₂₂) 的增加而增加(如图 4): 负型液晶的 |Δε| 值小于正型液晶(表 1), 所以负型液晶的 VOP 大于正型液晶; 负型液晶和正型液晶的 K₁₁(K₂₂) 值非常接近, 对两者的 VOP 基本没有影响。

RT 随 γ₁ 的增加而增加(如图 3), 随 K₁₁(K₂₂) 的增加而加快(如图 4): γ₁ 是 RT 的主要影响因素, 负型液晶的 γ₁ 远大于正型液晶, 其响应时间比正型液晶慢。两者的 K₁₁(K₂₂) 值接近, 对两者的 RT 基本没有影响, 光学测试结果如表 2 所示。

表 2 光学特性实测数值		
Tab.2 Measured values of optical characteristics		
Item	正型液晶 M-P	负型液晶 M-N
Tr/%	27.4	29.7
ΔTr	—	8.29%
VOP/V	11.7	11.6
ΔVOP	—	−0.85%
RT/ms	31.0	46.3
ΔRT	—	49.46%

负型液晶的响应时间是限制其应用的主要问题, 根据响应时间的公式(3)和(4)可以通过以下方法提高响应时间: (1) 提高外加电压(ODC), 电场强度增加, 上升时间降低; (2) 减小盒厚, 取向膜的锚定力效果明显, 下降时间降低; (3) 降低液晶粘性, 阻碍相邻液晶运动的作用力减小, 响应时间降低; (4) 基于现有负型液晶响应速度普遍偏慢, 单纯从材料角度改善可能无法满足大尺寸特别是电视的要求, 需要进一步研究新的电极结构或者像素设计, 提升响应速度。

4.3 液晶与 PI 的匹配性

液晶混合物一般要具有高的线电阻率(10¹²~10¹⁴ Ω/cm)。电荷保持率(VHR)是反映液晶混合物固有电阻率及液晶与 PI 材料匹配性的重要指标, 其影响因素如公式(5):

$$VHR = \left[(1 - e^{\frac{-2T}{\tau}}) \left(\frac{\tau}{2T} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中: T 为帧时间, τ 为像素和存储电容的时间常数。

本部分测试负型液晶搭配两款不同 PI 液的 VHR 特性, 测试结果如表 3 所示: 以正型液晶为参照, 负型液晶的 VHR 差于正型液晶, 负型液晶搭配不同的 PI 液所测得的 VHR 数值存在较大差异, 负型液晶与 PI 液有一定的匹配性, 对于液晶 M-N, 搭配 N 公司 B 型 PI 的常温及高温的 VHR 均要高于 J 公司 C 型 PI 的 VHR。负型液晶应用时, 选择与其相匹配的 PI 液也是至关重要的。

表 3 液晶 M-N 的 VHR 实测数值		
Tab.3 Measured VHR values of M-N		
Item	M-N PI: N-B	M-N PI: J-C
VHR/25 °C	99.29%	98.42%
ΔVHR/25 °C	90.51%	86.10%
VHR/60 °C	−9.49%	−13.90
ΔVHR/60 °C	−0.71%	−1.58%
Remark	以正型液晶搭配正型 PI 的 VHR 数值为 100%	

4.4 残 像

残像是液晶显示画质的重要评价参数, 它产

生主要有两方面原因：(1)如公式(6)液晶面板驱动电压波形会由于 Feed through 电压或晶体管特性变动而含有 Offset DC 成分,长时间进行这种方式的驱动后,直流成分将会在配向膜与液晶的界面引起离子累积,从而导致残像的发生;残留 DC 的主要原因在于:液晶盒介质成层状重叠的状况下,由于该介质之各层的弛豫时间的差异,使得各层间产生的残留电荷和液晶盒内的杂质离子往配向膜界面吸附。

$$V_{\text{Feedthrough}} = \frac{(V_{\text{gh}} - V_{\text{gl}}) C_{\text{gs}}}{C_{\text{gl}} + C_{\text{lc}} + C_{\text{st}}} \quad (6)$$

不同灰阶的液晶电容 C_{lc} 不同,显示屏内不同位置的扫描信号延迟差异引起 $(V_{\text{gh}} - V_{\text{gl}})$ 不同,所以在不同灰阶和面内不同位置都会出现 Feed through 电压差。(2)显示屏内的离子不纯物,其来源主要是设备和材料两个方面,而对于液晶材料主要可以从液晶材料本身纯度以及液晶材料稳定性两个方面考虑,由于负型液晶材料含有强极性的官能团,导致其提纯比正型液晶材料难度大,这是负型液晶残像差于正型液晶的原因之一。此外,配向膜材料也是影响残像的重要原因,还涉及 Seal(封框胶),CF 材料。

使用 ADS mini cell 评价负型液晶搭配两款 PI 液的残像。残像评价方法:mini cell 在棋盘格画面 aging 5 min,30 min,50 min 后,分别测试灰阶状态下黑格区域与白格区域亮度对比。起初我们使用 10 V 的交流电压对 mini cell 进行棋盘格 aging,aging 5 min,30 min,50 min 时间后残像不可见;然后我们对 mini cell 施加 0.03 V 的偏置电压,模拟测试存在残留 DC 的情况下,负型液晶与不同 PI 的残像结果,残像测试结果如图 5 所示。随着 aging 时间的增长,残像变差;负型液晶搭配不同 PI 液,残像结果存在较大差异。

基于残像产生的基本原理,若改善残像,一是要抑制驱动上存在的直流 DC 偏置电压;二是要抑制显示屏内存在的离子不纯物。因此,负型液晶材料残像的改善主要有以下几个方向,通过电路

调整抑制 DC 偏置电压;提高负型液晶材料的纯度和稳定性;与负型液晶搭配的配向膜材料的开发^[13]。

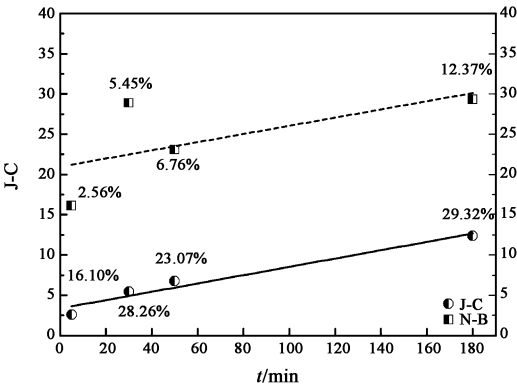


图 5 负型液晶与不同 PI 的残像测试结果
Fig.5 Image sticking of negative LC with different PI

5 结 论

本文介绍 ADS 技术及其演进历史,利用公式及软件模拟并归纳分析负型液晶参数对 ADS 显示特性的影响:可以通过优化负型液晶参数优化显示性能,Tr 的提升可以通过调整 Δn 来实现;VOP 降低可以通过增加 $|\Delta \epsilon|$ 或者降低 K_{11} (K_{22})实现;降低 RT 主要可以从降低 γ_1 及和提高 K_{11} (K_{22})实现。

通过利用 ADS 模式的 mini cell 对负型液晶材料的评价结果可知:负型液晶的透过率可以比正型液晶提高约 8%,VOP 与正型液晶基本保持一致,但是 RT 比正型液晶增高约 50%,RT 的提升可通过降低液晶黏度实现,但由于负型液晶本身强极性特点导致粘度降低较难,还应进一步通过优化电极结构来降低响应时间;负型液晶的 VHR 低于正型液晶,其残像水平差于正型液晶,而且材料及其组合对残像水平有显著影响。因此,对于负型液晶的应用,除提高负型液晶材料的纯度和稳定性外,与负型液晶搭配的配向材料的开发的也非常重要。

参 考 文 献:

[1] REINITZER F. Beiträge zur kenntniss des cholesterins [J]. Monatshefte für Chemie und Verwandte Teile Anderer Wissenschaften, 1888, 9(1): 421-441.
[2] HEILMEIER G H, ZANONI L A. Guest-host interactions in nematic liquid crystals. A new electro-optic effect [J]. Applied Physics Letters, 1968, 13(3): 91-92.

- [3] WYSOCKI J, ADAMS J, HAAS W. Electric-field induced phase change in cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1968, 20(19): 1024-1025.
- [4] ZHAN H M, ZHENG X, Wang Y P, *et al.* Low-voltage, high transmittance fringe-field switching mode liquid crystal for monitor display [J]. *Liquid Crystals*, 2014, 41(6): 755-760.
- [5] 邵喜斌,吴声,郭建新,等.负性双折射膜补偿的扭曲向列液晶显示器的视角[J].液晶与显示,1996,11(3):165-172. SHAO X B, WU S, GUO J X, *et al.* The viewing angle of characteristics of TN-LCD compensated with negative birefringence film [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 1996, 11(3): 165-172. (in Chinese)
- [6] TAKEDA A, KATAOKA S, SASAKI T, *et al.* 41.1: a super-high image quality multi-domain vertical alignment LCD by new rubbing-less technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 1998, 29(1): 1077-1080.
- [7] LU R B, WU S T, LEE S H. Reducing the color shift of a multidomain vertical alignment liquid crystal display using dual threshold voltages [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(5): 051114-1-051114-3.
- [8] OH-E M, KONDO K. Electro-optical characteristics and switching behavior of the in-plane switching mode [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(26): 3895-3897.
- [9] LEE S H, LEE S L, KIM H Y. Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(20): 2881-2883.
- [10] LEE S H, KIM H Y, LEE S M, *et al.* Ultra-FFS TFT-LCD with super image quality, fast response time, and strong pressure-resistant characteristics [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2002, 10(2): 117-122.
- [11] JEON Y M, SONG I S, LEE S H, *et al.* P-165: optimized electrode design to improve transmittance in the fringe-field switching (FFS) liquid crystal cell [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 328-331.
- [12] 员国良,郑成武,华瑞茂.含链端烯基负性液晶单体的合成及其性能研究[J].液晶与显示,2013,28(4):510-515. YUAN G L, ZHENG C W, HUA R M. Preparation and characteristics of terminal alkeny-bearing lateral fluoro-benzene negative liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 510-515. (in Chinese)
- [13] SEEN S M, KIM M S, LEE S H. Image sticking resistant liquid crystal display driven by fringe electric field for mobile applications [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(5R): 050208.

作者简介:邵喜斌(1969—),男,吉林人,博士,现任职于北京京东方显示技术有限公司,IT/TV 产品开发中心中心长,主要从事 LCD 显示技术方面的研究。E-mail: shaoxibin@boe.com.cn

王菲菲(1983—),女,吉林松原人,博士,现任职于北京京东方显示技术有限公司,研究员,主要从事 LCD 显示技术方面的研究。E-mail: wangfeifei@boe.com.cn