

## TFT-LCD一种黑Mura机理分析及工艺验证改善

王耀杰, 杨宗顺, 熊奇, 朱建华, 熊永, 毕芳

### 引用本文:

王耀杰, 杨宗顺, 熊奇, 等. TFT-LCD一种黑Mura机理分析及工艺验证改善[J]. 液晶与显示, 2020, 35(9): 927-932.

WANG Yao-jie, YANG Zong-shun, XIONG Qi, et al. Process validation solution of TFT-LCD black Mura[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 927-932.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0927>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### Mobile产品异物产生机理及改善研究

Reduction and mechanism of particles on mobile products

液晶与显示. 2019, 34(8): 748-754 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0748>

### 高PPI ADS产品白Mura不良产生原理及改善研究

Principle and improving research of white mura defect in high PPI ADS product

液晶与显示. 2016, 31(5): 435-441 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163105.0435>

### Rubbing Mura产生机理及改善研究

Principle and improvement research of rubbing Mura

液晶与显示. 2018, 33(6): 469-474 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183306.0469>

### 高世代线TFT-LCD面板对盒精度的提升

Ass'y margin improvement of high-generation line's TFT-LCD panel

液晶与显示. 2019, 34(2): 136-145 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193402.0136>

### 基于彩色滤光片柱状隔垫物高度的液晶滴下工艺

LC drop process based on PS height of color filter

液晶与显示. 2020, 35(5): 437-443 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0437>

文章编号:1007-2780(2020)09-0927-06

# TFT-LCD 一种黑 Mura 机理分析及工艺验证改善

王耀杰\*, 杨宗顺, 熊 奇, 朱建华, 熊 永, 毕 芳

(重庆京东方光电科技有限公司, 重庆 400714)

**摘要:** TFT-LCD 面板生产过程中会出现各种 Mura, 尤其是电视大尺寸产品, 对显示均一性要求很高。Mura 现象种类多, 原因差异性大, 本文分析的 Mura 属于电视面板的特殊不良。为解决此黑 Mura, 首先进行了实物分析研究, 通过液晶盒特性、表面微观以及电学分析确认实物未见明显异常, 为极微观异常。采用目前实际可操作方法很难进行深入分析, 需依靠工艺验证来明确, 因此通过工艺验证确认到不良为配向膜清洗机相关, 而清洗机独立单元繁多。依据不良可能的原因以及实际生产线的运营状况, 设计了 5 项相关可行性实验: 清洗速度降低, 清洗后增加静置时间, 紫外光清洗强度提升, 毛刷远离基板以及清洗机高压二流体喷淋压力调整。通过以上工艺验证结果, 推理出不良形成原因为电荷残留, 并提出两个合理可行的改善方向, 首先是减少基板在高压二流体喷淋下的停留, 其次为增加监控或关闭高压二流体喷淋, 使不良从 0.94% 降低至 0.00%, 提升了产品品质。

**关键词:** TFT-LCD; 黑 Mura; 清洗机; 工艺验证; 电荷残留

**中图分类号:** TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/YJYXS20203509.0927

## Process validation solution of TFT-LCD black Mura

WANG Yao-jie\*, YANG Zong-shun, XIONG Qi, ZHU Jian-hua, XIONG Yong, BI Fang

(Chongqing BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Chongqing 400714, China)

**Abstract:** Various Mura, especially in large size products which need high requirement for display uniformity, can appear during the production of TFT-LCD. There are many types of Mura phenomena which reasons are very different. The Mura analyzed in this paper belongs to the special defect of TV models. In order to solve the black Mura of TV, this paper firstly carries out defect analysis and research. Through the characteristics of cell and surface microscopic & electric analysis, it is confirmed that the defect is not obviously observed and extremely microscopic. There is no way to carry out further analysis using the practical methods currently, and it is necessary to rely on the factory process verification to find the crux of the problem. It is verification that the defect is related to the PI cleaner, but the cleaning machine has a large number of independent units, so five related feasibility tests are designed: reducing cleaning speed, increasing laying time after PI cleaner, increasing UV cleaning intensity, removing brush away from the glass and adjusting cleaner HPMJ pressure. The process results show that the mechanism is inferred, also two reasonable and feasible improvement directions are proposed: reducing glass retention under cleaner HPMJ and increasing monitoring or shutting down HPMJ. The defect can be reduced from 0.94% to 0.00%.

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-06-17.

\* 通信联系人, E-mail: wangyaojie@boe.com.cn

**Key words:** TFT-LCD; black Mura; cleaner; process verification; electrostatic remain

## 1 引言

薄膜晶体管液晶显示器(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display, TFT-LCD)以其低辐射、低功耗、低空间占用率以及轻便、美观等优点,在各个行业得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。现在,人们越来越关注显示器件的显示效果,如广色域、高对比度、快响应速度等,并对整个显示器的画质均一性,如 Mura,要求也越来越苛刻。市场的主流电视产品均采用 TFT-LCD 作为显示面板,而电视产品尺寸大,局部画质不均一是常见的品质问题。

Mura 是指在相同灰阶画面下,因视觉感受到的明暗不均匀现象<sup>[3]</sup>,直观的判定方法为:调节产品到灰阶画面,从不同视角观察,会在面板的不良位置看到明暗度差异以及色彩不均一。Mura 在 TFT-LCD 生产过程中是比较常见的缺陷不良<sup>[4-7]</sup>,影响因素较多。为此,徐伟<sup>[8]</sup>等进行了大量的研究工作,整理总结了 3 类 Mura 产生原因:发光源本身造成的 Mura、液晶相关异常造成的 Mura 以及由于阵列成型工艺过程中产生的电学性 Mura。多数 Mura 通过实物分析可以明确具体原因,如光照异常<sup>[9]</sup>、切割导致黑色光阻外漏<sup>[10]</sup>、TFT 与彩膜对位偏差大<sup>[11]</sup>、液晶量偏多<sup>[12]</sup>等,极少部分 Mura 从实物分析中很难得出明确结论,需要采用工艺验证才能解释。本文针对电视产品量产过程中出现的一种未知黑 Mura,从液晶盒特性、微观与电学以及工艺验证的角度进行了大量测试和分析推理,提出了切实可行的解决方案,此类特殊不良以及相同验证研究尚未见诸报道。

## 2 不良分析

### 2.1 不良现象

产品给信号与背光源点亮。不良在低灰阶画面可见,其他高灰阶画面以及红绿蓝单色看不到,正视或 20°侧视屏,不良不明显;在上下视角达到 45°后清晰可见,为泛黑色 Mura,条状。与基板一边夹角固定,条状 Mura 水平间距固定,点灯时长超过 20 min,不良可消失,不再复现。

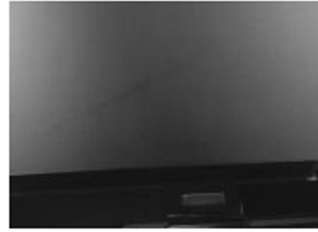


图 1 不良现象

Fig.1 Defect phenomenon

### 2.2 液晶盒特性测试

对异常区域以及相邻正常区域特性进行测试,结果如图 2 和图 3 所示。异常与正常区域盒厚均在  $3.52 \sim 3.55 \mu\text{m}$  之间,液晶扭曲角均在  $0.35^\circ \sim 0.5^\circ$  之间,对比特性两项数据均无明显异常,说明非盒厚性及液晶配向不良。

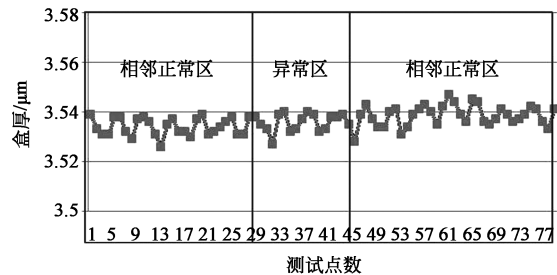


图 2 盒厚对比

Fig.2 Gap comparison

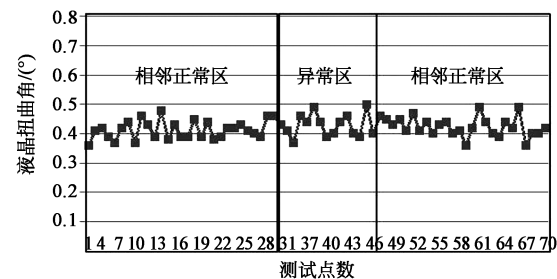


图 3 扭曲角对比

Fig.3 Twist angle comparison

### 2.3 膜面微观分析

拆屏将 TFT 侧与彩膜侧相互搓动,不良跟随 TFT 侧移动,判断不良位于 TFT 侧。去除液晶,在宏观 Mura 检查机下观察 TFT 侧膜面,未见异常。微观分析,相同 SEM 参数下得出如图 4 结果,对比正常与异常区域,表面形貌一致,未见

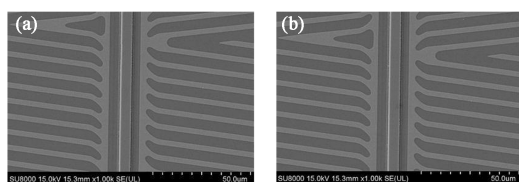


图4 正常区域(a)与异常区域(b)微观形貌

Fig.4 Normal area(a) and abnormal area(b) micro-topography

明显异常。

## 2.4 电学分析

正常模组产品的源极使用交流信号,栅极扫描频率为 60 Hz。改变源极交流信号和栅极扫描频率,可激发电学性不良现象。对不良屏源极施加直流信号,不良形态及程度未变化。增加和减小栅极扫描频率分别至 70 Hz 和 50 Hz,不良形态及程度仍未有明显变化。

## 3 实验与分析

通过实物分析,很难明确不良发生原因,需产线工艺验证才能有结论。黑 Mura 在形态上,与对盒工艺的清洗机一种单元-高压二流体喷淋(High Pressure Micro Jet, HPMJ)有一定匹配性。在对盒工艺中,有两道含高压二流体喷淋的清洗工序;配向膜涂覆前的清洗(配向膜清洗机)以及摩擦配向后的清洗。需通过试验明确高压二流体喷淋对黑 Mura 的影响以及机理分析,便于后续改善。

黑 Mura 在基板上位置固定。投入前,在两道清洗工序中将 TFT 基板水平旋转 180°,观察不良发生位置。验证数量均为 60 张,基板在摩擦配向后清洗机前水平旋转 180°,不良位置未变动。而基板在配向膜清洗机前旋转后,不良在基板上位置也同样水平旋转了 180°,故黑 Mura 直接成因来源于配向膜清洗机高压二流体喷淋单元。常规配向膜清洗机工序:等离子清洗→润湿→药液清洗→毛刷→高压二流体喷淋→风刀吹干→紫外光清洗,清洗机属于一个完整且相互影响的系统,因此需在清洗机中各相关工序设计验证方法,来明确对黑 Mura 的影响。

### 3.1 清洗速度放缓对黑 Mura 的影响

高压二流体喷淋清洗的原理是:清洗液和气体加压到 5~30 MPa 后,通过 Micro Jet 喷嘴喷

出,形成了大量的几微米或几十微米的微小形态液滴,并以极高速度和密度连续地喷射冲击清洗表面,从而可将粉尘粒子、脏物除去,去除的异物粒径在几微米到几百微米不等<sup>[13]</sup>。

高压二流体喷淋清洗效果的好坏会直接影响后端不良,从改善不良角度考虑,需提升高压二流体喷淋清洗效果,降低 TFT 基板在清洗机中的流片速度。因产能问题,需设计合理的速度。如表 1 所示,共进行两组测试,原来速度为 A,每组各降低 500 mm/min 和 1 000 mm/min。结果表明,TFT 基板降速 500 mm/min 对改善黑 Mura 有一定好处,但仍有 0.31%发生率;当降速 1 000 mm/min 时,黑 Mura 已经没有发生,改善效果明显,但 TFT 基板流动速度降低会影响工厂产能,需从其他方向改善。

表 1 TFT 基板在清洗机降速与黑 Mura 发生率关系

Tab.1 Relationship between cleaner speed and black Mura

| 流片速度/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 数量/片 | 黑 Mura<br>发生率/% |
|------------------------------------|------|-----------------|
| A                                  | 640  | 0.94            |
| A-500                              | 640  | 0.31            |
| A-1 000                            | 640  | 0.00            |

### 3.2 清洗后放置时间对黑 Mura 的影响

正常工艺中,TFT 基板经过配向膜清洗后,不经过后端缓冲腔室放置,直接进行配向膜涂覆。本次验证方法为配向膜清洗后,TFT 基板在缓冲腔室中放置一定时间,可使一些挥发性的物

表 2 缓冲腔室放置时间与黑 Mura 发生率关系

Tab.2 Relationship between buffer laying time and black Mura

| 缓冲腔室<br>放置时间/min | 数量/片 | 黑 Mura<br>发生率/% |
|------------------|------|-----------------|
| 10               | 640  | 0.94            |
| 30               | 640  | 0.78            |
| 60               | 640  | 1.09            |
| 120              | 640  | 0.63            |

质耗散。设置 4 组测试,静置时间分别为 10,30,60,120 min,发生率分别为 0.94%,0.78%,1.09%,0.63%,如表 2 所示。结果表明,经过配向膜清洗后增加放置动作,无易挥发性物质存在,对不良改善效果不明显。

3.3 毛刷对黑 Mura 的影响

毛刷位于高压二流体喷淋前方,对清除玻璃基板上 5 μm 以上的异物效果明显。使用的毛刷要经常保持清洁,因为刷子会吸收附着物,引起玻璃基板的二次污染。刷子寿命较短,容易老化、掉落,当基板表面膜层材质比较松软时,还容易引起玻璃基板膜层划伤,因此毛刷工序相对敏感。同时,流片过程中毛刷转动,一直与玻璃基板摩擦,会产生静电,对 TFT 基板会有一定影响,可能在经过高压二流体喷淋后加重,因此把上下毛刷均远离玻璃基板验证,结果如表 3 所示,不使用毛刷,黑 Mura 发生率为 0.78%,无明显改善效果。

表 3 毛刷有无使用与黑 Mura 的发生率关系  
Tab.3 Relationship between brush and black Mura

| 毛刷是否使用 | 数量/片 | 黑 Mura 发生率/% |
|--------|------|--------------|
| 使用     | 640  | 0.94         |
| 不使用    | 640  | 0.78         |

3.4 紫外光清洗强度对黑 Mura 的影响

紫外光清洗是为了去除有机物,对改善基板表面的亲和性,降低基板表面的接触角有很大帮助。玻璃基板所积累的紫外线能量越多,表面有机物越少。为排除微观不可见有机物的影响,增加紫外灯数量 2 灯→3 灯→5 灯验证,黑 Mura 发生率分别为 0.94%、0.63% 和 0.78%,如表 4 所示,效果不明显。

表 4 紫外灯数量与黑 Mura 发生率关系  
Tab.4 Relationship between UV lamp quantity and black Mura

| 紫外灯数量 | 数量/片 | 黑 Mura 发生率/% |
|-------|------|--------------|
| 2 灯   | 640  | 0.94         |
| 3 灯   | 640  | 0.63         |
| 5 灯   | 640  | 0.78         |

3.5 高压二流体喷淋压力对黑 Mura 的影响

高压二流体喷淋压力越大,清洗效果越好,但容易使基板破损。因此设置 10,8,5,0 MPa(0 MPa 代表关闭高压二流体喷淋),黑 Mura 发生率分别为 0.94%,0.78%,0.31%,0.00%,如表 5 所示。压力越低,黑 Mura 发生率越低。关闭高压二流体喷淋后,黑 Mura 没有发生。

表 5 高压二流体喷淋压力与黑 Mura 发生率关系  
Tab.5 Relationship between HPMJ pressure and black Mura

| 高压二流体<br>喷淋压力/MPa | 数量/片 | 黑 Mura<br>发生率/% |
|-------------------|------|-----------------|
| 10                | 640  | 0.94            |
| 8                 | 640  | 0.78            |
| 5                 | 640  | 0.31            |
| 0                 | 640  | 0.00            |

4 机理分析与改善

通过观察基板在清洗机的流片状态,发现一部分基板会因后端取片机抽片不及时,在高压二流体喷淋下停留,而停留的基板黑 Mura 发生率要明显高于正常水平。在高压二流体喷淋下无停留的基板,黑 Mura 发生率极低。所以当 CO<sub>2</sub>管道中有水进入,冲刷时,高压二流体喷淋持续对玻璃基板冲刷会对 TFT 膜面产生影响。通过各项相关工艺验证,可进一步说明黑 Mura 形成机理。

4.1 机理分析

验证 3.1 中,降低玻璃基板流片速度,发生率下降明显,主要是配向膜清洗机产出缓慢,基板可被取片机及时取走,不会在高压二流体喷淋下停留。验证 3.2 表明,受到高压二流体喷淋持续冲刷后,不良区域基本没有可挥发性物质形成。验证 3.3 和 3.4 表明,异常区域无微观不可见有机物形成,毛刷没有二次污染基板。涂汉敏等对 CO<sub>2</sub>-水体系的相平衡特征进行了研究,并说明 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>O 有多种缔合模型<sup>[14]</sup>,CO<sub>2</sub>提前长时间和水接触,会溶入水中形成各种缔合物,在高压二流体喷淋冲刷玻璃基板后可能残留在表面,但验证 3.2 和 3.4 可以排除,因为紫外光增强,静置时间增加,缔合物会分解殆尽,发生率会降低,但结果未

明显体现。

结合点灯现象与工艺验证可排除基板表面极微观物质残留可能性,电荷残留相关性更大。 $\text{CO}_2$ 提前溶入水中,最后经过高压二流体喷淋,水阻值发生变化,除静电效果变差,长时间冲刷玻璃基板,电荷会持续累积被 TFT 保护层所俘获,并形成感应积累的电荷,如图 5 所示,在后端工艺很难消散。制作成面板后,点灯状态下,这些电荷干扰了像素区正常电场,出现与正常区域差异化显示效果。在持续点灯过程中,TFT 开关不停充放电,保护层俘获的电荷和感应积累的电荷逐渐释放,不良逐渐变轻直到消失,之后再次点灯,不良也不复现。

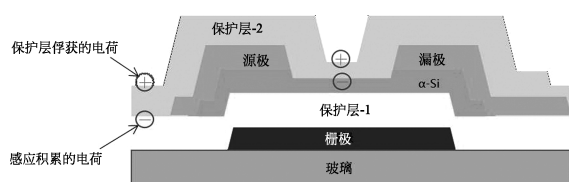


图 5 TFT 膜层积累的电荷

Fig.5 Charge accumulated on the TFT layer

彩膜层结构如图 6 所示,玻璃上层分别是黑色光阻、红绿蓝光阻、平坦层和支撑柱,材质相同均为高分子材料且结构简单,不易出现电荷残留;而通过图 5 可见 TFT 基板膜层结构复杂,材料繁多。层与层之间容易累积电荷,并相互感应,不易消散。

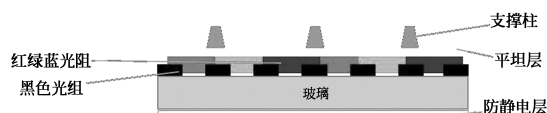


图 6 彩膜结构

Fig.6 Color film structure

## 4.2 改善措施

通过工艺验证,改善黑 Mura 有两种措施。第一种是不变动高压二流体喷淋,减少基板在高压二流体喷淋下的停留。本验证降低流片速度 1 000 mm/min 后,不良可降到 0.00%。这种做法

适用于产能不紧张的情况下。如果要提升产能,可以提升软件系统,设置合理取片机取屏方式,比如,配向膜清洗机后端停机后,取片机可将清洗机产出的基板及时取出,放置在缓冲腔室中;待后端开机后,持续投入,保证清洗机无基板停留。

第二种改善措施是监控或关闭高压二流体喷淋。在高压二流体喷淋的管道中设置监控探头,如果有异常可以及时报警反馈,便于查找原因并维护,降低不良发生率。关闭高压二流体喷淋,可完全避免黑 Mura 发生,同时,对于产线来讲,监控会减少,基板破损降低,节能减排,人员处理更便捷,不用的高压二流体喷淋设备可为配向工艺后清洗机作备件,节约了设备采购费,但是会导致盒内异物增加以及配向膜膜面涂覆异常,需验证并调试清洗机其他单元。

## 5 结 论

本文针对 TFT-LCD 制程中出现的黑 Mura 进行研究分析和工艺验证改善,通过液晶盒特性、表面微观和电学分析确认了不良为极微观异常,实物分析很难得出结论,需依靠工艺验证才能明确症结所在。首先不良实物形貌匹配指向清洗机高压二流体喷淋单元,通过基板在清洗机投入前的水平旋转验证,判断为配向膜清洗机对 TFT 基板造成了影响。清洗机属于一个完整而复杂的系统,因此设计了清洗速度降低、清洗后增加静置时间、紫外光强度提升、毛刷远离基板以及高压二流体喷淋压力调整这 5 项验证,分析得出黑 Mura 成因主要为电荷积累,无法耗散,点灯状态下影响到亚像素正常电场。改善措施为减少基板在高压二流体喷淋单元下的停留以及增加监控或关闭高压二流体喷淋,均可使黑 Mura 发生率降低到 0.00%,既提升了产品品质,又降低了后端模组维修压力。本研究的思路和方案也可作为后续不良解决的参照,同时清洗机导致的 Mura 类不良也值得继续研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 王新久.液晶光学和液晶显示[M].北京:科学出版社,2006:106-109.  
WANGX J. *Liquid Crystal Optics and Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 106-109. (in Chinese)

- [2] KAGAN C R, ANDRYP. 薄膜晶体管(TFT)及其在平板显示中的应用[M]. 廖燕平, 王军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 125-130.  
KAGAN C R, ANDRY P. *Thin Film Transistor (TFT) and Its Application in Flat Panel Display* [M]. LIAO Y P, WANG J, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 125-130. (in Chinese)
- [3] 吴洪江, 王威, 龙春平. 一种 TFT-LCD Vertical Block Mura 的研究与改善[J]. 液晶与显示, 2007, 22(4): 433-439.  
WU H J, WANG W, LONG C. Research and improvement of Vertical Block Mura of TFT-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2007, 22(4): 433-439. (in Chinese)
- [4] 焦峰, 王海宏. TFT-LCD 残像原理与分析-加强篇一[J]. 现代显示, 2012(5): 16-20.  
JIAO F, WANG H H. Principle and analysis of TFT-LCD afterimages-strengthening Part I [J]. *Display*, 2012(5): 16-20. (in Chinese)
- [5] 焦峰, 王海宏. TFT-LCD 残像原理与分析(基础篇)[J]. 现代显示, 2012(4): 54-59.  
JIAO F, WANG H H. Principle and analysis of TFT-LCD afterimages (basic)[J]. *Display*, 2012(4): 54-59. (in Chinese)
- [6] 焦峰, 王海宏. TFT-LCD 残像原理与分析-加强篇二[J]. 现代显示, 2012(6): 17-22.  
JIAO F, WANG H H. Principle and analysis of TFT-LCD afterimages-strengthening Part II [J]. *Display*, 2012(6): 17-22. (in Chinese)
- [7] 马群刚. TFT-LCD 原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 12, 45-47.  
MA Q G. *Principle and Design of TFT-LCD* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 12, 45-47. (in Chinese)
- [8] 徐伟, 彭毅雯, 雷有华, 等. TFT-LCD 横向线状未确认 Mura 分析及改善研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 539-546.  
XU W, PENG Y W, LEI Y H, et al. TFT-LCD horizontal linear unidentified Mura analysis and improvement research [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2013, 28(4): 539-546. (in Chinese)
- [9] 徐利燕, 喻娟, 刘冬, 等. 光照对 ADS 模式 TFT-LCD Flicker 漂移的影响[J]. 液晶与显示, 2016, 31(5): 454-459.  
XU L Y, YU J, LIU D, et al. Effect of illumination on ADS mode TFT-LCD flicker drift [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2016, 31(5): 454-459. (in Chinese)
- [10] 杨宗顺, 朱建华, 张加勤, 等. TFT-LCD 发绿的研究及改善[J]. 液晶与显示, 2019, 34(4): 354-360.  
YANG Z S, ZHU J H, ZHANG J Q, et al. Research and Improvement of TFT-LCD Greening [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2019, 34(4): 354-360. (in Chinese)
- [11] 高雪松, 薛捷, 蒋迁, 等. 一种适用于 TFT LCD 开机 Mura 改善的 TP 定向补正研究[J]. 科技创新与应用, 2018(26): 12-15.  
GAO X S, XUE J, JIANG Q, et al. A TP orientation correction for TFT LCD startup Mura improvement [J]. , 2018(26): 12-15. (in Chinese)
- [12] 季春玲, 吴添德. 一种消除液晶屏高温 MURA 的工艺研究[J]. 山东工业技术, 2017(20): 34-35.  
JI C L, WU T D. Study on the process of eliminating high temperature MURA of liquid crystal panel [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2017(20): 34-35. (in Chinese)
- [13] 詹前贤, 吴永俊. 液晶显示器电极图形制作中的 ITO 基板清洗技术[J]. 洗净技术, 2004(4): 16-21.  
ZHAN Q X, WU Y J. The cleaning technology of ITO substrate in electrode patterning of liquid crystal display [J]. *Technology*, 2004(4): 16-21. (in Chinese)
- [14] 涂汉敏, 郭平, 贾钠, 等. CPA 方程对 CO<sub>2</sub>-水体系相态研究[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 113-119.  
TU H M, GUO P, JIA N, et al. Calculation of phase behavior for CO<sub>2</sub>-water mixtures using CPA EoS [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(4): 113-119. (in Chinese)

#### 作者简介:



王耀杰(1989—),男,山西朔州人,硕士,高级工程师,2014 年于上海大学获得硕士学位,主要从事液晶及半导体相关研究及改善工作。E-mail: wangyaojie@boe.com.cn