

文章编号:1007-2780(2020)07-0710-15

# 改善大视角下 LCD 灰阶图像质量的研究进展

郭玉强, 孙玉宝\*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

**摘要:**近年来,家用电视和办公显示器的尺寸呈现越来越大的发展态势,液晶显示器(LCD)在大尺寸显示领域内占有很大的比重。LCD 的核心是控制背光透过率的液晶面板,由于液晶材料是双折射率材料,所以 LCD 的灰阶图像质量会存在视角依赖性。为了解决现阶段大尺寸 LCD 的发展需求,也使读者较快地了解相关研究进展,本文总结了改善大视角下灰阶图像质量的部分研究,并对相关方法进行了归纳和评述。文中简述了部分可以提高 LCD 对比度的方法。详细介绍了能够降低 LCD 伽马偏移的方法,并将这些方法进行了归类。最后介绍了一些与视角相关的其他性能。本文列举并归纳了多种方法,对未来改善 LCD 的灰阶图像质量具有指导意义。

**关键词:**液晶显示器件;视角;对比度;伽马偏移

**中图分类号:**TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0710

## Progress in improving the gray scale image quality of LCD under large viewing angle

GUO Yu-qiang, SUN Yu-bao\*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** In recent years, the size of television and office displays shows an increasing trend, and liquid crystal display (LCD) occupies a large proportion in the large-area display field. The core of LCD is liquid crystal panel that controls the transmittance of backlight, and liquid crystal is a birefringence material, so the gray scale image quality of LCD depends on the viewing angle. In order to meet the development needs of large-area LCD at the present stage and to make readers quickly acquire the relevant research progress, some researches on improving the gray scale image quality under large viewing angle are summarized, classified and reviewed. Firstly, some methods to improve the contrast of LCD are introduced. Then, the methods to reduce the LCD gamma shift are introduced in detail and classified. Finally, some additional properties related to the viewing angle are pointed out. In this paper a variety of methods are enumerated and summarized, which have a guiding significance for improving the gray scale image quality of a specific LCD in the future.

**Key words:** liquid crystal display; viewing angle; contrast ratio; gamma shift

收稿日期:2020-04-11;修订日期:2020-04-19.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2018YFB0703701);国家自然科学基金(No.61475042)

Supported by National Key R&D Program of China (No.2018YFB0703701); National Natural Science Foundation of China (No.61475042)

\* 通信联系人, E-mail:sun\_yubao@163.com

## 1 引言

LCD 凭借着成熟的工艺、配套的上中下游产业链、较高的性价比与长寿命等优势,在大尺寸显示领域中发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。近年来,LCD 在不断地进行性能改进。在与其他种类的显示器件的竞争过程中,LCD 不断开发和利用新技术,已经在多个方面表现出优异的性能,例如可以获得 8K 超高分辨率,12 位或更高灰阶的高动态范围显示,搭载高亮度和高饱和度背光源后获得良好的暗态与较高的对比度,拥有逼真的色彩和满足动态显示需求的高刷新率等<sup>[3-5]</sup>。

但是,LCD 依然面临着巨大的挑战,尤其是 LCD 的发展趋势受到了有机发光二极管显示器等新型显示技术的挑战。新型显示技术方兴未艾,它们在某些性能参数方面有更好的表现,所以 LCD 必须加紧创新与优化,特别亟需在其薄弱方面做出改进。

目前,LCD 在大尺寸显示中仍然占据大半的比例,并且向着越来越大的尺寸发展。大尺寸就意味着大视角,所以大视角所带来的灰阶图像质量问题是必须要面对和解决的重要任务。与 LCD 视角相关的性能参数有很多,例如对比度、伽马偏移、色彩偏移、亮度和色域范围等,这些参数将决定着 LCD 灰阶图像质量。本文针对这几个与视角相关的性能参数进行总结和讨论。

## 2 对比度

LCD 存在最高对比度与灰阶对比度。最高对比度指的是亮态与暗态透过率的比值,灰阶对比度指的是某一灰阶下的透过率与暗态透过率的比值。自从 LCD 被发明以来,人们就对它的对比度进行了持续的研究。总的来看,LCD 的对比度主要经过了以下几次发展。早期,人们提出了一些具有宽视角的显示模式,这改善了 LCD 在倾斜视角下的对比度,使其能够在大视角下进行观看。在此期间,为了进一步提高对比度,人们还提出了使用光学补偿膜补偿的方法,并且还针对不同的显示模式开发了不同的补偿方法,获得了较高的对比度。近年来,为了使 LCD 的对比度达到可比拟主动发光显示器的效果,人们又提出了使用高

亮度 Mini LED(Light-emitting diode)背光源、局部调光技术、双盒显示技术等<sup>[6]</sup>。这些技术使得 LCD 的对比度又一次得到了质的飞跃,也助力了它在大尺寸显示领域内的发展。

20 世纪 70 年代,市场上主要以工艺较为简单的扭曲向列相(TN:twisted nematic)LCD 为主<sup>[7]</sup>,它的正视对比度较低,并且对比度对视角的依赖性较强,所以需要提高其对比度。为了解决这个问题,人们在 20 世纪末开发出了一些具有宽视角的显示模式,例如:共面转换(IPS:in-plane switching)<sup>[8]</sup>、边缘场转换(FFS:fringe field switching)<sup>[9]</sup>与光学自补偿弯曲(OCB:optical compensated bend)<sup>[10]</sup>等显示模式。另外,垂面排列(VA:vertical aligned)LCD 中的液晶分子近乎垂直排列,所以在正交偏光下,VALCD 具有较高的正视对比度。2002 年,Kikuchi 等人制备了聚合物稳定蓝相液晶(BPLC:blue phase liquid crystal)<sup>[11]</sup>,BPLC 温度被拓宽至包括室温在内的一个较大的范围,它的稳定性得到了保证<sup>[12]</sup>。常态下,BPLC 处于光学各向同性,所以 BPLCD 也具有较高的对比度<sup>[13]</sup>,并且还具亚毫秒级响应速度和无需取向的优点,使其被认为是下一代液晶显示模式。

在 LCD 中使用合适的光学补偿膜后,其暗态漏光可以得到改善,进而对比度也可以得到提升<sup>[14]</sup>。光学补偿膜是各向异性的透明聚合物材料,商业上通常将这层聚合物材料添加在偏光片内侧,形成宽视角偏光片。宽视角偏光片可以起到两个作用:一是纠正倾斜视角下偏光片的消光比;二是对离轴方向液晶的相位变化进行补偿,降低相位延迟量的变化,实现更好的暗态。图 1 展示了 LCD 的主要部件、宽视角光学补偿膜的位置与添加光学补偿膜前后的显示效果<sup>[15]</sup>。可以看出,添加补偿膜前后,大视角下的图像质量得到了显著提高。

对于不同的显示模式,需要添加的光学补偿膜的种类也不尽相同<sup>[16-18]</sup>。一般地,初始指向矢为水平排列的 LCD 需要添加  $n_x > n_z > n_y$  类型的双轴补偿膜或单轴补偿膜组,例如 TN、IPS 与 FFS 显示模式。添加补偿膜后,它们的正视对比度可以得到显著提升,并且大视角下的对比度也可以得到提高。而初始指向矢为垂直排列的 LCD 需要添加  $n_x > n_y > n_z$  类型的双轴补偿膜或

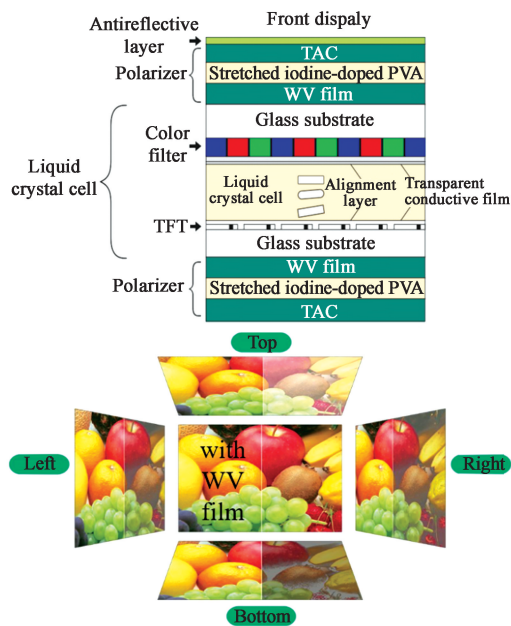


图1 LCD中的主要部件及添加宽视角补偿膜前后的显示效果图<sup>[15]</sup>

Fig.1 Main components in LCD and the images before and after adding the wide viewing compensation film<sup>[15]</sup>

单轴补偿膜组,例如VA显示模式。VALCD本身具有较高的正视对比度,添加补偿膜后,倾斜视角下的对比度可以得到提升。

局域调光技术有两种实现方法:其一是使用高亮度的LED光源和调光光阀,控制光阀透光与否就可以控制不同区域的亮暗;其二是使用点阵型的Mini LED充当背光源,分别点亮不同位置的Mini LED就可以控制不同区域的亮暗情况。

2011年,Huang W等人展示了使用LED局域调光技术前后,LCD显示出的画面,如图2所示<sup>[19]</sup>。从图中可以看出,未使用局域调光技术

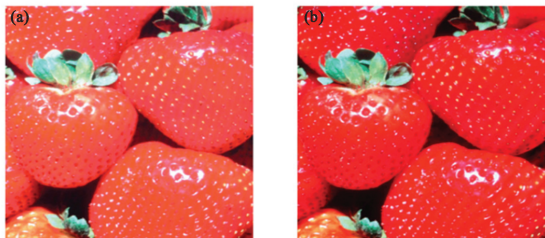


图2 使用局域调光技术前(a)后(b),LCD的画面效果<sup>[19]</sup>。

Fig.2 Color images of LCD before (a) and after (b) using the local dimming technique<sup>[19]</sup>

时,草莓之间的黑色区域难以达到最黑的状态,而需要显示高亮度时,又难以表现出期待的亮度,所以从对比度上来看,它的灰阶图像质量较差。使用局域调光技术后,画面展现出了应有黑色区域与高亮区域,画面的对比度得到了显著提升。

图3展示了2018年Tan等人提出的一款基于Mini LED背光源的LCD,它在理论上可以实现零亮度与超高亮度之间的灰阶显示,具有较高的对比度与较高的动态范围<sup>[20]</sup>。一般地,局域调光技术可以控制某一显示区域内的亮暗情况,尤其在显示黑色图像时,可以直接使该区域处于无背光状态,所以局域调光技术可以使LCD的理论对比度达到无穷大,这与主动发光显示器件对比度有相似的显示效果。

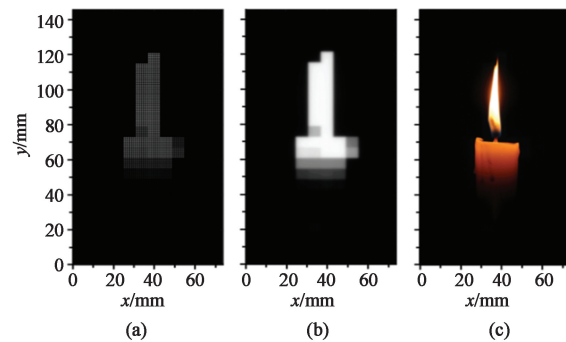


图3 基于Mini LED背光源LCD的亮态Mini LED分布(a),亮态光强分布(b)与蜡烛显示效果图(c)<sup>[20]</sup>。

Fig.3 Bright-state Mini LED distribution (a), bright state light intensity distribution (b) and the candle image of LCD based on Mini LED backlight (c)<sup>[20]</sup>.

除了使用高亮度LED背光源实现局域调光技术外,还可以使用双盒显示技术来提升LCD的对比度。2017年,Chen等人报道了一种由两个不同显示模式叠加在一起组成的LCD,它整体对比度可以提高到1 000 000 : 1,60°视锥内的对比度高于1 000 : 1<sup>[21]</sup>。

目前,LCD的对比度几乎可以提升到与主动发光显示器相比拟的程度。如果考虑到环境光的影响,LCD可以表现出相对较高的实际对比度<sup>[3]</sup>。从LCD的发展趋势与业界的共识上来看,大尺寸LCD会向Mini LED背光的方向发展,以抗衡现有的主动发光显示器。

### 3 伽马偏移

“伽马”一词源于阴极射线管栅极电压的幂指数,它被用来描述阴极射线管的电子流密度,所以伽马指数决定着像素的亮度。后来伽马指数一直沿用至今,用来描述各种显示器件中灰阶与亮度之间的关系。由于液晶材料是各向异性的,所以在不同视角下,LCD 会表现出不同的电光性能,进而各个视角下灰阶与亮度的关系曲线就会彼此分离,这就是伽马偏移。

图 4(a)展示了某款显示器在正视下的彩色图像。在这个图像中,中间 4 幅图是具有不同色调的彩色画面,四周是具有不同灰度的黑白灰阶卡。当沿着倾斜视角观看图像时,中间 4 幅彩色画面的颜色发生了变化,并且灰阶卡的灰度顺序也发生了错乱,在图像最右侧甚至出现了灰度转彩色的现象,如图 4(b)所示。这表明,LCD 的图像在倾斜视角下会发生伽马偏移,并且在大视角下更为明显。

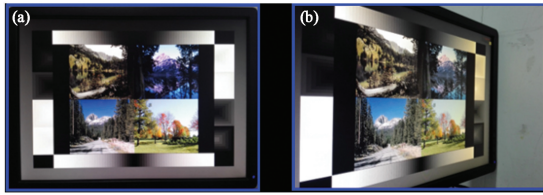


图 4 某款 LCD 在正视下(a)与倾斜视角下(b)所显示的图像

Fig.4 The images of one LCD under the normal direction (a) and oblique viewing angle (b)

显示器上不同位置的观看视角不同,对应的伽马曲线也不同,如图 5 所示<sup>[22]</sup>。对于大尺寸 LCD 来说,即便观看者在 LCD 屏幕中心的正前方,来自 4 个角落的图像依然具有较大的倾斜视角。虽然 LCD 的驱动电路中含有伽马校正模块,但它只能将 LCD 的图像整体调整为某一适当的伽马数值,并不能解决各个视角下存在伽马偏移的问题。所以,LCD 必将存在伽马偏移。

一般地,人们通过不同灰阶之间的平均亮度差来定量地评价显示器件的伽马偏移。2004 年, Kim 等人提出了离轴图像失真指数  $D(\theta, \phi)$  来评价 LCD 在某一倾斜视角下的伽马偏移,如式(1)所示<sup>[23]</sup>。其中,  $\theta$  表示极角,  $\phi$  表示方位角。

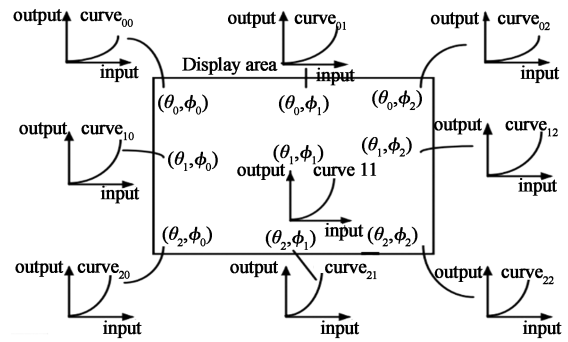


图 5 某款 LCD 在不同视角下的伽马曲线<sup>[22]</sup>

Fig.5 Gamma curves of one LCD under various viewing angles<sup>[22]</sup>

若采用极角形式来呈现离轴图像失真指数,则需要指明最大离轴图像失真指数对应的方位角,来显示出最严重伽马偏移对应的具体角度。2019 年,Guo 等人提出使用方位角图像失真指数  $D_A(\theta)$  来评价 LCD 在某一视锥下的伽马偏移,从而进一步地完善了对伽马偏移的评价,如式(2)所示<sup>[24]</sup>。式中,  $\theta$  表示极角,计算时需要首先找到某一视锥下的最大与最小伽马偏移对应的伽马曲线,然后再计算这两个伽马曲线之间的伽马偏移。这个指数无需指明具体的方位角,因为它代表了某一视锥内的最大伽马偏移。在判别条件上,当这两个指数低于 0.2 时,就可以认为 LCD 的伽马偏移处于人眼不可分辨的程度。

$$D(\theta, \phi) = \left\langle \frac{|\Delta B_{i,j}(\text{on-axis}) - \Delta B_{i,j}(\text{off-axis}, \theta, \phi)|}{\Delta B_{i,j}(\text{on-axis})} \right\rangle_{i,j=0 \sim 255}, \quad (1)$$

$$D_A(\theta) = \left\langle \frac{|\Delta B_{i,j}(\text{off-axis}, \theta)_{\min} - \Delta B_{i,j}(\text{off-axis}, \theta)_{\max}|}{\Delta B_{i,j}(\text{off-axis}, \theta)_{\min}} \right\rangle_{i,j=0 \sim 255}. \quad (2)$$

近年来,人们提出了多种方法来改善 LCD 的伽马偏移,其中一些方法能够显著地降低伽马偏移,其中一些方法可以将 LCD 的伽马偏移降低至人眼不可分辨的程度。这些方法可以大致分为以下几类:(1)在 LCD 外层添加具有特殊结构的光散射膜;(2)优化电极结构;(3)改进驱动方法。下面就针对这几种方法展开介绍。

#### 3.1 具有特殊结构的光散射膜

LCD 的显示原理决定了它的伽马偏移只能被改善,不能被消除。所以,人们就尝试在 LCD 的最外侧添加具有特殊结构的光散射膜,来实现

降低 LCD 伽马偏移的目的。一般地,这类光散射膜的外表面上具有几十至几百微米的图形化结构。这些结构能够将 LCD 的出射光变为朝向各个方向的散射光,这样就可以达到均匀电光性能的目的,进而可以获得较低的伽马偏移。

2015 年,Gao 等人使用半椭球形光散射膜来改善 LCD 在大视角下的伽马偏移<sup>[25]</sup>,其中半椭球形凸起的半径为  $600\ \mu\text{m}$ ,如图 6(a)所示。在整个装置中,准直背光可以通过玻璃基板与液晶层最终入射到半椭球形光散射膜的表面。此时,光依然具有良好的准直性,若在此时观察 LCD,则倾斜视角下一定会存在较严重的伽马偏移。当光穿过半椭球形光散射膜后,原本准直的光就变成了朝向四面八方的散射光,此时各个视角下的电光性能就实现了“混配”的效果,所以这款光散射膜可以降低 LCD 的伽马偏移。他们展示的结果表明,这种半椭球形光散射膜可以用于 TN、VA、IPS 与 FFS 等多种显示模式,并且都能将伽马偏移降低至肉眼不可分辨的范围。从图 6(b)可以看出,当把这种光散射膜应用至 IPS LCD 上时,离轴图像失真指数可以降至 0.041 0,此时的伽马偏移是肉眼不可分辨的。

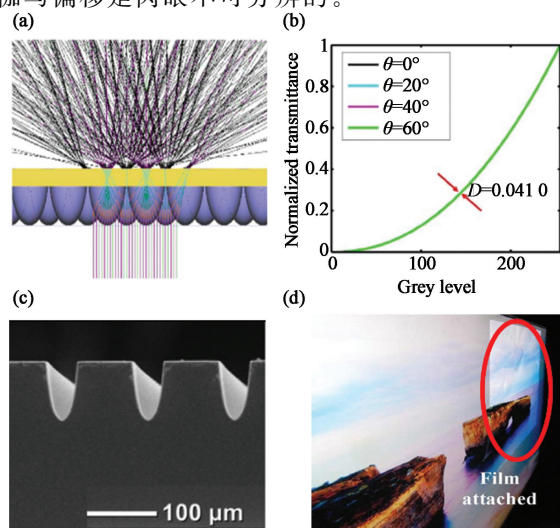


图 6 (a)半椭球形光散射膜;(b)使用该光散射膜后,IPS LCD 的伽马曲线<sup>[25]</sup>;(c)抛物线状光散射膜;(d)某款 LCD 使用该光散射膜后的效果<sup>[26]</sup>。

Fig.6 (a) Semi-ellipsoid light scattering film; (b) Gamma curves of IPS LCD after using this scattering film<sup>[25]</sup>; (c) Light scattering film with parabolic grooves; (d) Image of one LCD after using the scattering film<sup>[26]</sup>.

除了添加半椭球形光散射膜外,三棱柱、抛物线与四棱台等形状的光散射膜也可以用来降低 LCD 的伽马偏移<sup>[26-28]</sup>。2012 年,Park 等人<sup>[26]</sup>提出使用带有凹刻抛物线形状的光散射膜来改善 LCD 的伽马偏移,这种光散射膜中每一个凹刻抛物线形状的尺寸约为  $80\ \mu\text{m}$ ,如图 6(c)所示。当在 LCD 的外表面添加了这种光散射膜后,LCD 在倾斜视角下图像质量得到显著提升,如图 6(d)所示。

从原理上可以看出,这类光散射膜适用于各种显示模式。另外,它可以单独制造,而后贴合到 LCD 表面,所以这种方法具有一定的独立性。这类光散射膜也存在一些缺点,例如它基于散射的原理,会损失光利用率和分辨率;它需要制备特殊形状的凸起结构,这会增加制造成本;为了削弱多层膜干涉效应,需要选用特定折射率的基底材料和化学粘合剂等。

### 3.2 电极结构

近年来,人们提出了多种电极结构来改善 LCD 的伽马偏移。从电极产生的电场方向分布上来分,这些电极结构可分为以下 3 种:(1)多畴电极结构;(2)单畴电极结构;(3)特殊电极结构。

早期,人们主要使用多畴电极结构来降低 LCD 的伽马偏移,例如“之”字形电极结构与“人”字形电极结构<sup>[29-32]</sup>。随着对伽马偏移的深入研究,发现一些单畴电极结构也可以表现出较低的伽马偏移。另外,为了适应某个具体的设计要求,人们又提出了一些具有特殊形状的电极结构来获得较低的伽马偏移。下面就按照以上 3 个种类介绍如何从电极结构方面降低伽马偏移。

#### 3.2.1 多畴电极结构

多畴电极结构指的是 LCD 的电极分布在两个或两个以上的方向上,它们可以在某一坐标平面上存在不同的朝向,也可以在不同的坐标平面上分布<sup>[33-35]</sup>。一般地,多畴电极结构可以产生互补的液晶指向矢分布,所以可以不同程度地改善伽马偏移<sup>[36-42]</sup>。

2010 年,Rao 等人研究了使用“之”字形电极结构来改善 BPLCD 的伽马偏移<sup>[43]</sup>。传统的 IPS BPLCD 的电极结构是单畴的叉指状电极,如图 7(a)所示。这种电极结构可以产生垂直于电极方向的电场分布,所以沿电极方向与垂直电极方向的电光性能就会存在较大差异。大视角下,沿电

极方向就会存在较严重的伽马偏移。如果将电极形状改为“之”字形,如图 7(b)所示,则可以产生两个方向的电场分布,此时沿电极方向与垂直电极方向的电光性能就会达到互补的效果,进而会得到较低的伽马偏移。

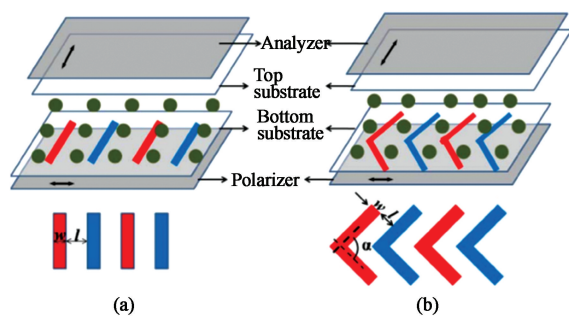


图 7 单畴(a)与“之”字形多畴(b)电极结构<sup>[43]</sup>

Fig.7 Single-domain (a) and zigzag multi-domain (b) electrode structures<sup>[43]</sup>

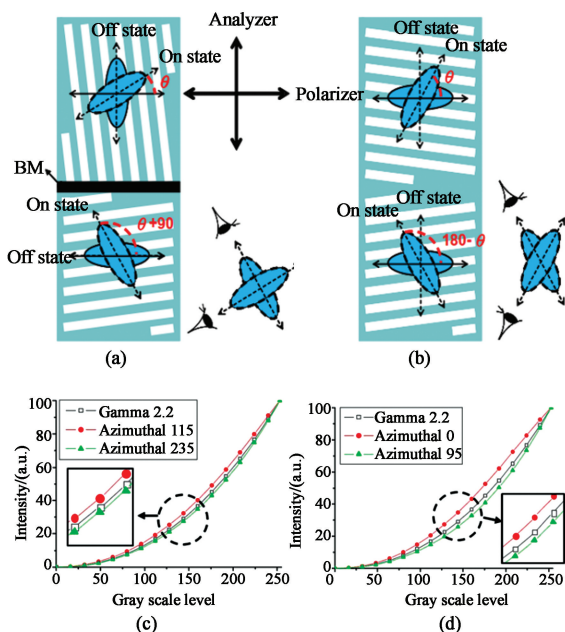


图 8 正交型(a)与“人”字形多畴电极结构(b);正交型(c)与“人”字形(d)多畴电极结构的伽马曲线<sup>[44]</sup>。

Fig.8 Perpendicular-type (a) and chevron-type multi-domain (b) electrode structures; Gamma curves of perpendicular-type (c) and chevron-type multi-domain (d) electrode structures<sup>[44]</sup>。

多畴电极结构中的电极形状是不固定的,只要能够产生两个及两个以上方向的电场,都可以称作多畴电极结构。2012 年, Wu 等人研究了正交型与“人”字形多畴电极结构对 FFS LCD 伽马

偏移的影响<sup>[44]</sup>。图 8(a~b)是这两种电极结构示意图,图中结果表明,这两种电极结构都可以产生两个电场方向不同的显示区域,它们能够实现互为补充的效果。图 8(c~d)为两种电极结构的伽马曲线,从图中可以看出,它们都可以表现出肉眼不可分辨的伽马偏移。

高介电常数材料是一类具有较高相对介电常数的绝缘材料<sup>[45-48]</sup>,它可以改变液晶层中的电场分布<sup>[49-50]</sup>。将高介电常数材料应用至 LCD 中可以降低驱动电压,如果在此基础上再使用“之”字形多畴电极结构,则 LCD 的伽马偏移会显著下降。图 9(a)为 2018 年提出的一种具有高介电常数凸起的 BPLCD,这种电极结构可以产生更为均匀的横向电场分布<sup>[51]</sup>。若将“之”字形多畴电极结构应用在高介电常数凸起 BPLCD 时,在  $45^\circ$  方位角及  $60^\circ$  极角下的离轴图像失真指数可以降低至 0.159 0,伽马偏移处于肉眼不可分辨的范围,如图 9(b)所示。

当初液晶指向矢为多个方向排布时, LCD 也可以表现出较低的伽马偏移<sup>[52-53]</sup>。虽然这种方法与多畴电极结构是不同的,但本质上需要利用光控取向技术来实现多畴液晶指向矢定域排

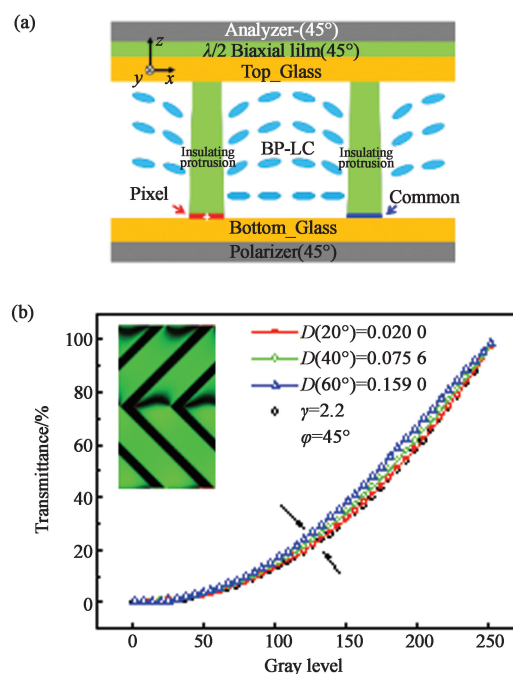


图 9 高介电常数凸起 BPLCD 的电极结构(a)与伽马曲线(b)<sup>[51]</sup>

Fig.9 Electrode structure (a) and gamma curves (b) of BPLCD with high dielectric protrusion<sup>[51]</sup>

列<sup>[54]</sup>,所以将这部分内容也归结到此,以给相关研究提供更多思路。

2010 年, Miyachi 等人研究了一种紫外固化的 VA LCD (UV<sup>2</sup>A LCD: ultraviolet VA LCD)<sup>[55]</sup>,这种 UV<sup>2</sup>A LCD 的初始液晶指向矢分布是靠倾斜光固化来实现的。如图 10 所示, UV<sup>2</sup>A LCD 可以在基板玻璃内侧产生两个方向的初始液晶指向矢分布,这样它的光电性能就可以实现互补的效果,进而也存在较低的伽马偏移。由于像素尺寸小于人眼的分辨极限,所以在加电条件下,它可以实现均匀的红绿蓝三基色显示效果。

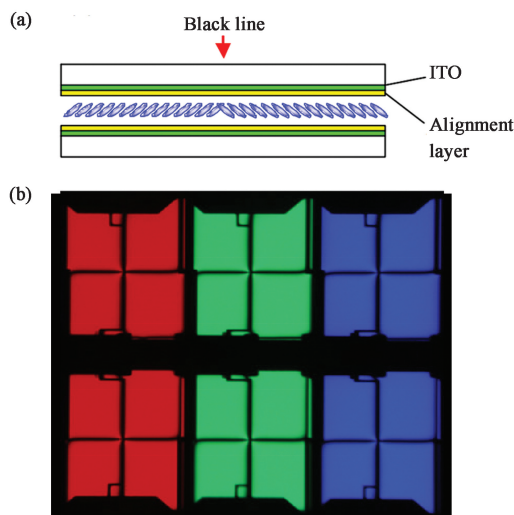


图 10 UV<sup>2</sup>A LCD 的液晶指向矢分布(a)及其亮态像素图(b)<sup>[55]</sup>

Fig.10 Liquid crystal director distribution (a) of UV<sup>2</sup>A LCD and its on-state pixel (b)<sup>[55]</sup>

此外,2013 年 Mun 等人研究了一种四畴结构的 TNLCD,在 4 个像素区域中,基板表面的液晶分子取向相互正交<sup>[56]</sup>。结果显示,它在 60°视角下展现出了肉眼不可分辨的伽马偏移。

### 3.2.2 单畴电极结构

与多畴电极结构不同,单畴电极结构中的电极仅朝向某一方向。过去,人们一般认为多畴电极结构有不同方向的电场分布,可以产生不同朝向的液晶指向矢,进而可以实现降低伽马偏移的效果。事实上,一些单畴电极结构也可以实现类似的效果<sup>[57]</sup>。

2020 年,Guo 等人提出了一种单畴凸起 FFS LCD,如图 11(a)所示。加电后,这种电极结构可

以产生上下互补的电场分布<sup>[58]</sup>。在上半层液晶中,电场主要以横向分布为主;在下半层液晶中,电场以环绕凸起电极的方式存在。总的来看,它可以产生类似于蘑菇状的对称电场分布。图 11(b)是单畴凸起 FFS LCD 的伽马曲线,结果显示,这种电极结构在不同视角下的电光特性曲线表现出相近的驱动电压,在 90°方位角及 60°极角下的离轴图像失真指数可以降低至 0.094 3。

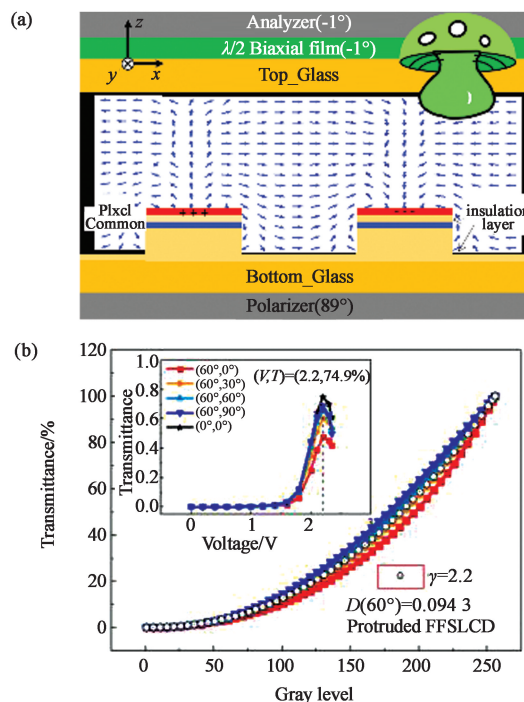


图 11 凸起 FFS LCD 的电极结构(a)与伽马曲线(b)<sup>[58]</sup>

Fig.11 Electrode structure (a) and gamma curves (b) of the protruded FFS LCD<sup>[58]</sup>

图 12(a)展示了 2020 年提出的一款异步双面电极结构的电势分布。从图中可以看出,虽然这种电极结构是单畴的,但是它可以产生上下、左右均对称的电场分布<sup>[59]</sup>。由于它的电场分布对称性较好,所以它可以展现出较低的伽马偏移。图 12(b)显示,异步双面电极结构的离轴图像失真指数呈现出不对称的分布,但整体上随着极角的增加而降低。如图所示,全视角下离轴图像失真指数均低于 0.2。并且报道中指出异步双面电极结构在全视角下的方位角图像失真也为 0.2 以下。此外,这种电极结构允许存在一定的错位。当上下基板错位距离为电极宽度的一半以内时,它仍然保持肉眼不可分辨的伽马偏移。

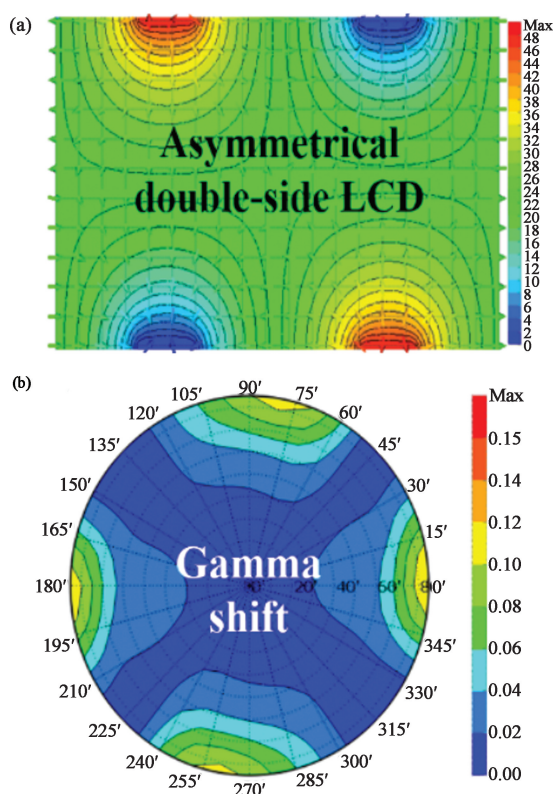


图 12 异步双面电极结构的电势分布(a)与离轴图像失真指数分布(b)<sup>[59]</sup>

Fig.12 Potential distribution (a) and off-axis image distortion index distribution (b) of the asymmetrical double-side electrode structure<sup>[59]</sup>

### 3.2.3 特殊电极结构

为了在伽马偏移、驱动电压与对比度等方面表现出更加优异的性能,需要设计一些相对特殊的电极结构。研究发现,一些具有特殊形状的电极结构也可以获得较低的伽马偏移<sup>[60-64]</sup>。

图 13(a~b)是 Chen 等人在 2017 年提出的菱形凸起电极结构及其伽马曲线分布<sup>[65]</sup>。这种电极结构既可以产生  $xoy$  面内的双畴电场分布,又可以产生带有  $z$  分量的电场分布。所以,施加合适的电压后,其  $60^\circ$  极角下离轴图像失真指数为 0.163 4,是具有较低伽马偏移的电极结构。另外,这种结构在驱动电压、透过率与对比度等方面亦有良好的表现。

2017 年,Guo 等人提出了单渗透电极结构,它是可以产生对称电场分布的电极结构<sup>[66]</sup>。给像素电极施加一定的电压后,这种电极结构可以产生 X 形的电场分布,这是一种上下、左右均对称的电场分布,如图 13(c)所示。图 13(d)是单渗

透电极结构的伽马曲线,可以看出,  $135^\circ$  方位角及  $60^\circ$  极角下的离轴图像失真指数仅为 0.063 5,是同类电极结构中伽马偏移较低的结果。此外,这种电极结构也具有其他优势,例如较低的驱动电压、较高的透过率和对比度。

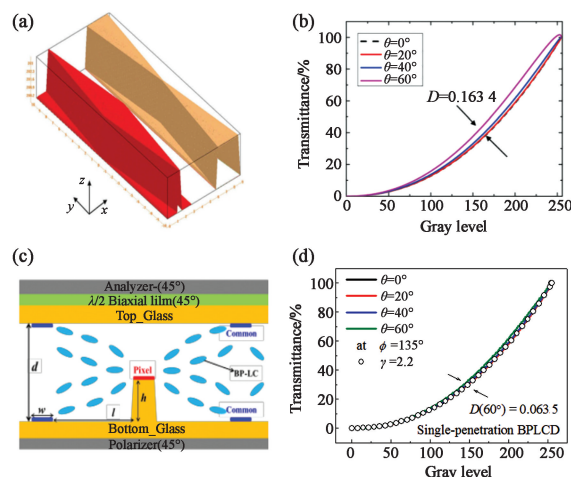


图 13 菱形凸起电极结构(a)及其伽马曲线(b)<sup>[67]</sup>;单渗透电极结构(c)及其伽马曲线(d)<sup>[68]</sup>。

Fig.13 Diamond-shape electrode structure (a) and gamma curves (b)<sup>[67]</sup>; Single-penetration electrode structure (c) and gamma curves (d)<sup>[68]</sup>.

改善电极结构能够有效降低 LCD 的伽马偏移。可选的电极结构种类较多,可参考的相关报道也较多。总的来看,能够获得多畴对称液晶指向矢分布的电极结构都可以或多或少地降低伽马偏移。当然,这种方法也存在一些弊端,例如增加制作难度和成本,限制 LCD 的分辨率,影响透过率或其他性能。

## 3.3 驱动方法

### 3.3.1 主/副像素驱动

除了液晶材料与电极结构外,驱动方法对 LCD 的伽马偏移也存在影响。在驱动方法上,可以采用主/副像素驱动方法来改善 LCD 的伽马偏移。这种方法需要在显示面板上设计主像素和副像素,然后在主像素上施加一个较高的驱动电压,在副像素上施加一个较低的驱动电压<sup>[67-69]</sup>。施加电压后,主/副像素内具有互补的液晶指向矢分布,并且像素的尺寸又小于人眼的分辨极限,所以 LCD 会体现出两个像素上的综合电光性能。通过调整主/副像素的面积比例与电压比例,就可以

获得预计的伽马曲线<sup>[70-73]</sup>。这种方法已经被应用于部分大尺寸 LCD 上<sup>[74-76]</sup>, 下面举一实例说明这种方法。

图 14(a~d)为三星电子在 2005 年展示的一款 208 cm (82 in) 英寸图案化垂面排列 (PVA: patterned vertical aligned) LCD 的电极结构、双漏极薄膜晶体管 (TFT: thin film transistor)、主/副像素上的伽马曲线与最终的伽马曲线<sup>[77]</sup>。主/副像素的面积分配靠 A、B 显示区域的面积来控制, 主/副像素上输入电压的比例靠一个耦合电容来控制。从图 14(c)中可以看出, 像素 A 区域内的伽马曲线比欲获得的伽马曲线偏上, 像素 B 区域内的伽马曲线比欲获得的伽马曲线偏下。调节好 A、B 区域内的伽马曲线后, PVA LCD 可以展示出综合的伽马曲线。结果显示, 这款 PVA LCD 在 70° 视角下的最大离轴图像失真指数仅为 0.144。主/副像素驱动方法可以有效地降低 LCD 的伽马偏移, 它可以应用在各种的显示模式中。但是, 主/副像素驱动方法的主要难度是设计与之配套的耦合双漏极薄膜晶体管<sup>[78]</sup>。此外, 还要选好合适的主/副像素面积比例和电压比例。

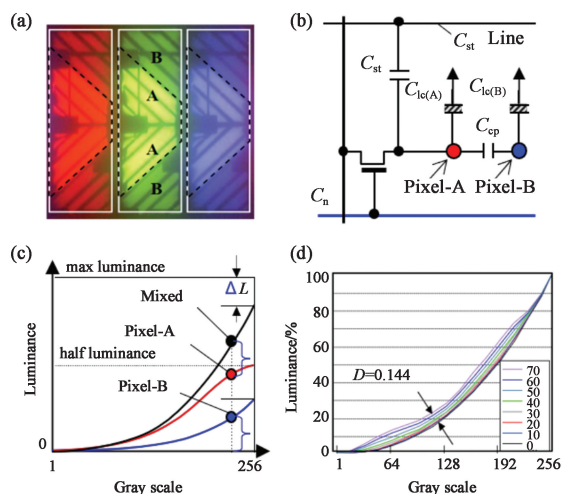


图 14 (a)具有主/副像素的电极结构;(b)具有双漏极的 TFT 电路;(c)主/副像素的伽马曲线与它们的等效伽马曲线;(d)使用主/副像素驱动后, PVA LCD 的伽马曲线分布<sup>[77]</sup>。

Fig.14 (a) Electrode structure with main/sub-pixel; (b) TFT circuit with double drain electrodes; (c) Gamma curves of main/sub-pixel and their equivalent gamma curve; (d) Gamma curve distribution of PVA LCD after using the main/sub-pixel driving method<sup>[77]</sup>.

### 3.3.2 截断透过率方法

截断透过率方法是在 2020 年 Guo 等人提出的一种降低 LCD 伽马偏移的方法<sup>[79]</sup>。这种方法的原理是: 在像素电极上施加一个较小的电压 (小于正视下的驱动电压), 这也相当于截断一定的透过率来显示画面。这种方法可以避免倾斜视角下出现灰阶反转的现象, 各个视角下的电光特性曲线更为均一, 从而可以获得较低的伽马偏移。

图 15 展示了 IPS BPLCD 在不同视角下的电光特性曲线, 图中不同的比例系数表示此时的透过率占正视下最高透过率的比例。从图中可以看出, 若采用正视下最高透过率对应的电压来驱动 IPS BPLCD, 那么倾斜视角下会出现灰阶反转的现象, 此时将会存在严重的伽马偏移。若施加 90% 及以下透过率对应的驱动电压, 那么倾斜视角下的电光特性曲线均为单调变化, 这样 IPS BPLCD 会表现出较低的伽马偏移。

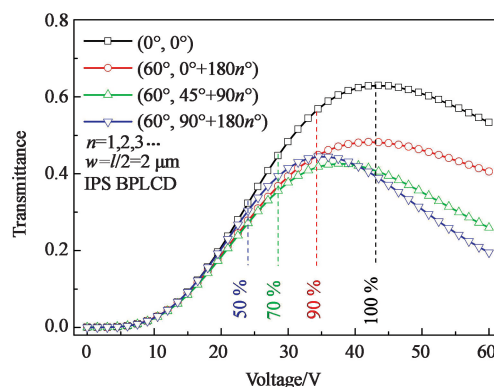


图 15 不同视角下, IPS BPLCD 的电光特性曲线<sup>[80]</sup>

Fig.15 VT curves of IPS BPLCD under various viewing angles<sup>[80]</sup>

从图 16(a~b)中的结果可以看出, 当采用 100% 透过率对应的电压驱动 IPS BPLCD 时, 其在 90° 方位角及 60° 极角下离轴图像偏移指数为 0.462 1。若透过率截断点为 80%, 则 IPS BPLCD 的离轴图像偏移指数可以降低至 0.128 2。使用截断透过率方法后, 60° 视锥内各个方位角下的离轴图像失真指数的分布将会更加均匀, 如图 16(c) 所示。结果表明, IPS BPLCD 的方位角图像失真指数可以从 0.312 0 降低至 0.049 2。此外, 这种方法不仅适用于传统的 IPS 电极结构, 还可以应用于一些具有低驱动电压的电极结构, 例如

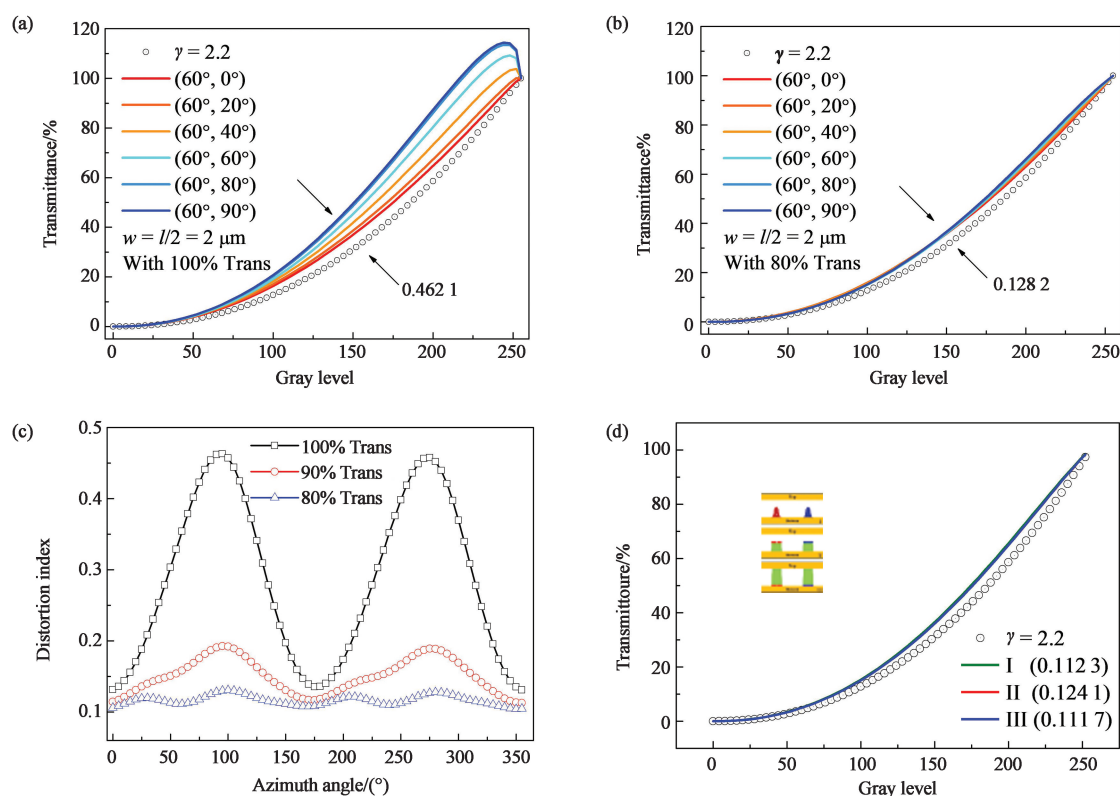


图 16 (a~b)使用截断透过率方法前后,IPS BPLCD 的伽马曲线;(c)IPS BPLCD 的离轴图像失真指数分布;(d)应用截断透过率方法后,几种电极结构在  $60^\circ$  视角下的伽马曲线<sup>[81]</sup>。

Fig.16 (a~b) Gamma curves of IPS BPLCD before and after using the intercepting transmittance method;(c) Off-axis image distortion index distribution of IPS BPLCD;(d) Gamma curves of some electrode structures at  $60^\circ$  after applying the intercepting transmittance method<sup>[81]</sup>.

凸起电极结构、具有高介电常数材料的电极结构与渗透电极结构等,如图 16(d)所示。

截断透过率方法相对独立,它既可以单独使用,也可以搭配其他的方法来降低 LCD 的伽马偏移。这种方法比较简单,无需添加新的制备工艺。此外,这种方法无需施加峰值电压,这也节约了一部分电能。但是,这种方法的原理就决定了会存在一定的透过率损失。当然,多畴电极结构、主/副像素驱动方法等也会存在损失透过率的现象。所以,研究人员可以从实效性、操作难度、驱动电压与透过率等方面综合考量,来决定所使用的方法。

#### 4 其他与视角相关的性能

除了对比度与伽马偏移之外,还有一些其他性能也与视角相关,如色彩偏移、亮度和色域等

性能。

色彩偏移是指色坐标上某一坐标点在倾斜视角下发生偏移的现象。事实上,色彩偏移与伽马偏移相关,能够改善伽马偏移的方法也适用于降低色彩偏移<sup>[81-83]</sup>。

亮度是指 LCD 展现出来的光强,它与背光源的光强和 LCD 透过率的视角特性均相关。背光源发出的光在多层散射膜的作用下可具有较好的视角均匀性,LCD 的透过率随视角有较大的变化,极角越大则对应的亮度通常越低。为了提升 LCD 在不同视角情况下的亮度均匀性,通常使用外贴散射膜方法来均匀出射光的角度分布<sup>[25-28]</sup>。

色域是指显示器可以显示的色彩范围在色度坐标系中所占的面积,它通常以某一色域指标的百分比形式呈现。LCD 的色域也与视角相关,视角越大则色域通常越小。色域与伽马偏移和色偏移相关,所以前文介绍的关于改善伽马偏移的方

法也可以用来提升色域。近几年,人们制备出了一些含有量子点的特殊光学补偿膜或光散射膜,添加这些光学薄膜亦可以显著提升 LCD 的色域<sup>[84-85]</sup>。

## 5 总结与展望

本文综述了大视角下 LCD 灰阶图像质量的相关研究。首先,简述了提高对比度的一些方法,如使用宽视角显示模式、添加补偿膜与局域调光技术等。然后,总结了改善伽马偏移的方法,包括:添加具有特殊结构的光散射膜、优化电极结构与改进驱动方法。最后介绍了一些与视角相关的

其他性能和相应的改善方法。文中对以上方法的利弊进行了分析。

从目前的发展趋势上看,LCD 向着基于 Mini LCD 局域调光技术的大尺寸显示器发展,显示特性也要实现高清晰度和宽色域,与视角相关的图像显示质量也就受到了关注。本文中关于降低大尺寸 LCD 伽马偏移的内容是改善大视角显示图像质量的关键内容。改善伽马偏移的方法应当简单且有效,离轴图像失真指数和方位角图像失真指数应作为判定显示器图像显示质量的标准参数。在不同的液晶显示模式中,研究人员可以根据显示特性来选择合适的方案以改善灰阶图像质量。

## 参 考 文 献:

- [1] JIA H P. Who will win the future of display technologies? [J]. *National Science Review*, 2018, 5(3): 427-431.
- [2] BARNES D. LCD or OLED: who wins? [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 26-27.
- [3] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 17168.
- [4] KIM K H, SONG J K. Technical evolution of liquid crystal displays [J]. *NPG Asia Materials*, 2009, 1(1): 29-36.
- [5] KIM D H, LIM Y J, KIM D E, *et al.* Past, present, and future of fringe-field switching-liquid crystal display [J]. *Journal of Information Display*, 2014, 15(2): 99-106.
- [6] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [7] SCHADT M, HELFRICH W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(4): 127-128.
- [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] YAMADA F, NAKAMURA H, SAKAGUCHI Y, *et al.* Color sequential LCD based on OCB with an LED back-light [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2000, 31(1): 1180-1183.
- [11] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [12] COLES H J, PIVNENKO M N. Liquid crystal 'blue phases' with a wide temperature range [J]. *Nature*, 2005, 436(7053): 997-1000.
- [13] GE Z B, GAUZA S, JIAO M Z, *et al.* Electro-optics of polymer-stabilized blue phase liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(10): 101104.
- [14] ZHU X Y, GE Z B, WU S T. Analytical solutions for uniaxial-film-compensated wide-view liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(1): 2-20.
- [15] OIKAWA T, YASUDA S, TAKEUCHI K, *et al.* Novel WV film for wide-viewing-angle TN-mode LCDs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(2): 133-137.
- [16] OH S W, KIM A K, PARK B W, *et al.* Optical compensation methods for the elimination of off-axis light leakage in an in-plane-switching liquid crystal display [J]. *Journal of Information Display*, 2015, 16(1): 1-10.
- [17] OH S W, YOON T H. Optical compensation for elimination of off-axis light leakage in a homogeneously-aligned

- liquid crystal cell [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 613(1): 181-189.
- [18] OH S W, YOON T H. Elimination of light leakage over the entire viewing cone in a homogeneously-aligned liquid crystal cell [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5808-5817.
- [19] HUANG W, LI J M, YANG L M, *et al.* Local dimming algorithm and color gamut calibration for RGB LED backlight LCD display [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1): 214-217.
- [20] TAN G J, HUANG Y G, LI M C, *et al.* High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [21] CHEN H W, ZHU R D, LI M C, *et al.* Pixel-by-pixel local dimming for high-dynamic-range liquid crystal displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1973-1984.
- [22] MARCU G, CHEN W, CHEN K, *et al.* Color correction in TFTLCD displays for compensation of color dependency with the viewing angle [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, 33(1): 713-715.
- [23] KIM S S, BERKELEY B H, KIM K H, *et al.* New technologies for advanced LCD-TV performance [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2004, 12(4): 353-359.
- [24] GUO Y Q, WANG Y F, ZHANG C, *et al.* Low voltage blue-phase liquid crystal display with insulating protrusion sandwiched between dual-layer electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(4): 523-534.
- [25] GAO Y T, LUO Z Y, ZHU R D, *et al.* A high performance single-domain LCD with wide luminance distribution [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(4): 315-324.
- [26] PARK S S, SOHN I, CHO E, *et al.* Color shift reduction of liquid crystal displays by controlling light distribution using a micro-lens array film [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(11): 643-649.
- [27] YAN J, XU D M, CHENG H C, *et al.* Turning film for widening the viewing angle of a blue phase liquid crystal display [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(36): 8840-8844.
- [28] HWANG S, MIN J, LEE M G, *et al.* Novel wide viewing liquid crystal display with improved off-axis image quality in a twisted nematic configuration [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(11): 114001.
- [29] LU R, WU S T, GE Z B, *et al.* Bending angle effects on the multi-domain in-plane-switching liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 207-216.
- [30] LU R B, HONG Q, WU S T, *et al.* Quantitative comparison of color performances between IPS and MVA LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(4): 319-326.
- [31] GE Z B, WU S T, LEE S H. Wide-view and sunlight readable transfective liquid-crystal display for mobile applications [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2623-2625.
- [32] LEE G S, KIM J C, YOON T H. Electrode structure for color shift reduction in fringe-field switching mode [J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5405-5415.
- [33] 刘一帆, 蓝伊奋. 基于菱形电极结构的高对比度平面内扭转模式蓝相液晶显示器件设计[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(11): 886-894.
- LIU Y F, LAN Y F. Design of high contrast in-plane-switching polymer-stabilized blue phase liquid crystal display device based on rhombus electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(11): 886-894. (in Chinese).
- [34] GUO Y Q, LI X S, SUN Y, *et al.* Low gamma shift blue-phase liquid crystal display with electric field induced multi-domain electrode structure [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(1): 54-66.
- [35] HONG H K, SHIN H H, CHUNG I. In-plane switching technology for liquid crystal display television [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(4): 361-370.
- [36] EOM Y H, YOON S S, PARK S R, *et al.* Novel in-plane switching (IPS) mode with high transmittance using negative dielectric liquid crystal [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 1092-1094.
- [37] YUAN J M, XU D M, WU S T. An ultra-low voltage blue phase LCD for mobile applications [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 1520-1523.
- [38] LIN Q, SONG J K. Colour shift reduction in vertical alignment liquid crystal cells using the temporal averaging effect of oscillating molecular motion [J]. *Liquid Crystals*, 2012, 39(3): 333-337.
- [39] SHIN Y C, PARK M K, KIM B, *et al.* Micropatterned vertical alignment liquid crystal mode with dual threshold

- voltages for improved off-axis gamma distortion [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(1): 150-157.
- [40] LI Y F, SUN Y B, ZHAO Y L. A fast-response in-plane switching liquid crystal display with a protrusion structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 012303.
- [41] CHEN Y L, HSIANG J C, WU Y H, *et al.* Multi-domain fringe-field switched mobile LCD for reducing color shift by zigzag-like pixel design [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 1709-1712.
- [42] PARK J H, OH S W, HUH J W, *et al.* Four-domain electrode structure for wide viewing angle in a fringe-field-switching liquid crystal display [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(7): 667-672.
- [43] RAO L H, GE Z B, WU S T, *et al.* Zigzag electrodes for suppressing the color shift of Kerr effect-based liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(4): 115-120.
- [44] WU H Y, FU H M, LIAN J T. Real multi-domain reduced color and gamma shift in fringe-field-switching (FFS) mode LCD with photoalignment method [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, 43(1): 293-296.
- [45] GUO Y Q, WANG Y F, REN Y X, *et al.* Enhanced dielectric properties of conductive-dielectric composites by reducing particle size and core@shell method [J]. *Functional Materials Letters*, 2018, 11(1): 1850010.
- [46] HUANG C, ZHANG Q M. Fully functionalized high-dielectric-constant nanophase polymers with high electromechanical response [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(9): 1153-1158.
- [47] HUANG C, ZHANG Q. Enhanced dielectric and electromechanical responses in high dielectric constant all-polymer percolative composites [J]. *Advanced Functional Materials*, 2004, 14(5): 501-506.
- [48] WANG C C, SONG J F, BAO H M, *et al.* Enhancement of electrical properties of ferroelectric polymers by polyaniline nanofibers with controllable conductivities [J]. *Advanced Functional Materials*, 2008, 18(8): 1299-1306.
- [49] 郭玉强, 王翼飞, 刘建龙, 等. 取向层厚度及介电常数对 TN-LCD 影响的研究 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(11): 1017-1022.
- GUO Y Q, WANG Y F, LIU J L, *et al.* Effect of thickness and dielectric constant of alignment layer on the TN-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(11): 1017-1022. (in Chinese).
- [50] 马红梅, 杨瑞霞, 孙玉宝. 降低聚合物稳定蓝相液晶显示器驱动电压的一种方法 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(3): 163-168.
- MA H M, YANG R X, SUN Y B. A method to reduce the operating voltage of polymer stabilized blue-phase liquid crystal displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 163-168. (in Chinese).
- [51] GUO Y Q, WANG Y F, ZHANG C, *et al.* Blue-phase liquid crystal display with insulating protrusion [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(11): 1585-1593.
- [52] LEE Y J, JO S I, KIM J H, *et al.* Fast eight-domain patterned vertical alignment mode with reactive mesogen for a single-transistor-driving [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(3): 030209.
- [53] LAN S, CHEN X W, WEI H Q, *et al.* Self-alignment of liquid crystal for multi-domain liquid-crystal display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 453-454.
- [54] CHIGRINOV V G, KOZENKOV M V, KWOK H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. England: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [55] MIYACHI K, KOBAYASHI K, YAMADA Y, *et al.* The world's first photo alignment LCD technology applied to generation ten factory [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 579-582.
- [56] MUN B J, JIN T Y, LEE G D. Optical structure to improve the  $\gamma$ -curve distortion of a four-domain (4-D) twisted nematic liquid crystal cell [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, 63(10): 1932-1936.
- [57] GUO Y Q, LI X S, MU Q H, *et al.* Single electro-optic curve for RGB colours in blue-phase liquid crystal display [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(6): 835-845.
- [58] GUO Y Q, LI X S, LI W J, *et al.* Multi-layer protruded electrodes for reducing the operating voltage and gamma shift of fringe-field switching LCDs [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(4): 572-581.
- [59] GUO Y Q, LI X S, YANG Y L, *et al.* Low-gamma shift asymmetrical double-side blue-phase liquid crystal display [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 199-210.

- [60] GOU F W, CHEN H W, LI M C, *et al.* Submillisecond-response liquid crystal for high-resolution virtual reality displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7984-7997.
- [61] TALUKDER J R, HUANG Y G, WU S T. High performance LCD for augmented reality and virtual reality displays [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(6): 920-929.
- [62] LEE J D, LEE J B, CHO S J, *et al.* A novel pixel structure for high transmittance and high image quality LCDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 45(1): 1074-1076.
- [63] CHU F, DOU H, SONG Y L, *et al.* A transfective blue-phase liquid crystal display with alternate electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(8): 1316-1320.
- [64] KIM S U, LEE B Y, SUH J H, *et al.* Reduction of gamma distortions in liquid crystal display by anisotropic voltage-dividing layer of reactive mesogens [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(2): 364-371.
- [65] CHEN H W, LAN Y F, TSAI C Y, *et al.* Low-voltage blue-phase liquid crystal display with diamond-shape electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(7): 1124-1130.
- [66] GUO Y Q, FU M Z, REN Y X, *et al.* Low-voltage blue-phase liquid crystal display with single-penetration electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(14/15): 2321-2326.
- [67] LIM Y J, KIM J H, HER J H, *et al.* Viewing angle switching of liquid crystal display using fringe-field switching to control off-axis phase retardation [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(8): 085501.
- [68] PARK S B, SONG J K, UM Y, *et al.* Pixel-division technology for high-quality vertical-alignment LCDs [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, 31(9): 987-989.
- [69] 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.
- [70] KIM J W, SONG D H, KIM K H, *et al.* In-plane switching of vertically aligned negative liquid crystals for high transmittance and wide viewing angle [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(21): 5256-5261.
- [71] MUN B J, JIN T Y, LEE G D, *et al.* Optical approach to improve the  $\gamma$  curve in as vertical-alignment liquid-crystal cell [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 799-801.
- [72] MA J, YANG Y C, ZHENG Z G, *et al.* A multi-domain vertical alignment liquid crystal display to improve the V-T property [J]. *Displays*, 2009, 30(4/5): 185-189.
- [73] KIM J W, CHOI S W, KIM K H, *et al.* Vertical alignment liquid crystal device with reduced off-axis gamma shift [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(10): 779-782.
- [74] KIM H J, LIM Y J, MURALI G, *et al.* Reduction of gamma distortion in oblique viewing directions in polymer-stabilized vertical alignment liquid crystal mode [J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, 1(2): 157-162.
- [75] KIM H, SHIN K C, KIM J S, *et al.* New three-gamma-curves-integrated VA LCD design for excellent image quality and enhanced transmittance [J]. *Journal of Information Display*, 2016, 17(3): 109-115.
- [76] LIN G J, XIANG R J, YAO I A, *et al.* Evaluating and improving color washout of vertical aligned liquid crystal display [J]. *Displays*, 2014, 35(3): 159-164.
- [77] KIM S S. The world's largest (82-in.) TFT-LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1842-1847.
- [78] LIN C L, HSIANG J C, WU Y H, *et al.* A single cell gap transfective LCD with dual common electrodes and coupling capacitance [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 499-502.
- [79] GUO Y, LI W, LI X, *et al.* Reduced off-axis gamma shift of liquid crystal display by intercepting transmittance method [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(34): 345104.
- [80] TIEN K C, CHUNG J Y, LIAO C H, *et al.* Improved picture quality on analog dual-data type multi-domain polymer sustained alignment LCD technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 1469-1472.
- [81] 宋聪, 林丽锋, 宋文亮, 等. ADS 类面板色偏关键影响因素 [J]. *液晶与显示*, 2019, 34(4): 361-365.
- SONG C, LIN L F, SONG W L, *et al.* Key influence factors on the ADS panel color shift [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(4): 361-365. (in Chinese).
- [82] LU R B, HONG Q, GE Z B, *et al.* Color shift reduction of a multi-domain IPS-LCD using RGB-LED backlight

- [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6243-6252.
- [83] JIAO M Z, GE Z B, WU S T. Broadband wide-view LCDs with small color shift [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(8): 331-334.
- [84] CHEN H W, ZHU R D, HE J, *et al.* Going beyond the limit of an LCD's color gamut [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17043.
- [85] KIM H J, SHIN M H, LEE J Y, *et al.* Realization of 95% of the Rec. 2020 color gamut in a highly efficient LCD using a patterned quantum dot film[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10724-10734.

作者简介:



郭玉强(1992—),男,河北承德人,博士,2020年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶与液晶器件等方面的研究。E-mail: guoyuqiang361@163.com



孙玉宝(1975—),男,河北沧州人,博士,教授,2010年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶与液晶器件等方面的研究。E-mail: sun\_yubao@163.com