液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays
ESCI/Scopus收录
中文核心期刊
主管：中国科学院
主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
京东方科技集团股份有限公司
中国物理学会液晶分会
中国光学光电子行业协会液晶分会
主编：郭海成

液晶显示器多种显示模式色彩表现的研究进展

黄晓丽，孙玉宝，马红梅

引用本文:
黄晓丽, 孙玉宝, 马红梅. 液晶显示器多种显示模式色彩表现的研究进展[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 355-370.
HUANG Xiao-li, SUN Yu-bao, MA Hong-mei. Research progress in color performance of LCD with various display modes[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 355-370.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0231

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

快速响应的共面转换型液晶显示器

Fast-response in-plane switching liquid crystal display

液晶与显示. 2017, 32(9): 685-691 https://doi.org/10.3788/YJYXS20173209.0685

改善大视角下LCD灰阶图像质量的研究进展

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

液晶与显示. 2020, 35(7): 710-724 https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0710

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

Design of high contrast in-plane-switching polymer-stabilized blue phase liquid crystal display device based on rhombus electrodes

液晶与显示. 2017, 32(11): 886-894 https://doi.org/10.3788/YJYXS20173211.0886

半导体量子棒的光控取向技术进展

Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment

液晶与显示. 2020, 35(5): 409-421 https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0409

低驱动电压和快速响应的共面转换液晶显示器

Low driving voltage and fast-response in-plane switching liquid crystal display

液晶与显示. 2016, 31(7): 649-654 https://doi.org/10.3788/YJYXS20163107.0649

文章编号:1007-2780(2021)03-0355-16

液晶显示器多种显示模式色彩表现的研究进展

黄晓丽,孙玉宝,马红梅*
(河北工业大学 应用物理系,天津 300401)

摘要:随着液晶显示技术的不断发展,人们对高性能液晶显示器的需求越来越迫切,研究者们也对提升液晶显示性能进行了一系列的研究。色彩表现是液晶显示性能的一个重要方面,Gamma 偏移和色偏移是评价色彩表现的重要指标。本文对常用的 3 种液晶显示模式的色彩表现进行总结,并主要对共面转换与垂面排列液晶显示模式的改善方法进行了详细介绍和分析,这对后续研究者和器件设计者的研究具有指导意义。针对不同的显示模式,有相应的方法来提高色彩表现,但每种方法都有自己的固有缺陷,需使用者进行选择。

关 键 词:液晶显示器;共面转换;垂面排列;Gamma 偏移;色偏移
中图分类号:TP141.9 **文献标识码**:A **doi**:10.37188/CJLCD.2020-0231

Research progress in color performance of LCD with various display modes

HUANG Xiao-li, SUN Yu-bao, MA Hong-mei*

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

Abstract: With the continuous development of liquid crystal display, the demand for high-performance liquid crystal display is more and more urgent. Many researchers had also carried out a series of researches on improving the performance of liquid crystal display. The color performance, which can be indicated by Gamma shift and color shift, is an important aspect of LCD performance. This paper summarizes the color performance of the conventional three LCD modes, and mainly introduces the improved methods of in-plane switching and vertical aligned LCD modes. It has an important significance to the researchers and designer of LCD. For different display modes, there are corresponding methods to improve the color performance, but each method has its own inherent flaws, it requires users to choose.

Key words: liquid crystal display; in-plane switching; vertical aligned; Gamma shift; color shift

---

收稿日期:2020-09-08;**修订日期**:2020-10-12.
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:mhmtj@163.com

1 引 言

液晶显示器(LCD)作为平板显示领域中的主力显示技术,与有机电致发光显示器(OLED)等新型显示技术进行不断的竞争,不断提高其显示性能,延长其作为主要显示技术的地位。各种显示技术在亮度、对比度、驱动电压、响应时间等显示性能方面都已达到了比较理想的水平,相比之下色彩表现就成为高质量显示器的重要参数。色彩表现包括色域、Gamma 偏移和色偏移等指标,量子点技术应用在液晶显示器中,获得了超过 120% NTSC 的色域,比 OLED 的色域更高;Gamma 偏移和色偏移在各种显示器件中都存在。为了提高液晶显示器的色彩表现,降低液晶显示器的色偏移和 Gamma 偏移,人们提出了多种方案。从普通扭曲向列相(Twisted Nematic,TN)液晶显示器到膜补偿 TN-LCD,从 4 畴垂直排列(Vertical Aligned,VA)型到 8 畴 VA-LCD、共面转换(In-Plane Switching,IPS)类型液晶显示器中使用"之"字形电极结构,以及各种形状的电极结构,获得了显示性能上的巨大进步[1]。

在高性能液晶显示器中,多畴垂面排列和超级 IPS 类型液晶显示器是应用最为广泛的液晶显示模式,较为低档的膜补偿 TN-LCD 用于中小尺寸显示器中,一般对 Gamma 偏移和色偏移不做很高的要求。在本文中,对散射膜方法在 TN-LCD 中的应用,对多畴结果对高性能液晶显示器中超级 IPS 类型和多畴垂面排列液晶显示器的作用,分别进行综述,总结不同方法在 Gamma 偏移和色偏移方面的作用。

2 色彩表现

2.1 Gamma 偏移

Gamma 曲线源于阴极射线管显示器的电光响应曲线,即其亮度与输入电压的非线性关系。由于显示器不只是在最亮和最暗之间转换,它还有很多中间灰度级状态,结合人眼对亮度的敏感曲线,Gamma 指数用于描述各种显示器中灰阶与亮度的关系。理想情况下,在一定的灰度级下,各种视角下的归一化透射率应该相同。在液晶显示器中,由于液晶材料的各向异性,电压透过率曲线在各视角下通常不一致,因此,在不同视角下,与灰度有关的透射率曲线的分离现象称为 Gamma 偏移。

为了定量地评估 LCD 在某一倾斜视角下的伽马偏移,2004 年 KIM 等人提出了离轴图像失真指数 $D(\theta,\phi)$,当 $D(\theta,\phi)<0.2$ 时,Gamma 偏移被认为对于人眼是无法区分的。$D(\theta,\phi)$ 的表达式为[2]:

$$D(\theta,\phi)=\left\langle\frac{\Delta B_{i,j(\text{on-axis})}-\Delta B_{i,j(\text{off-axis},\theta,\phi)}}{\Delta B_{i,j(\text{on-axis})}}\right\rangle_{i,j=0\sim255}, \tag{1}$$

式中,〈〉表示各个灰度下的平均值,$\Delta B_{i,j}$ 代表第 i 和第 j 灰度级之间的透射率差,on-axis 代表法线方向(即正视视角),off-axis 代表一定的倾斜视角,θ 和 ϕ 代表极角和方位角。这个参数代表不同观看角度下与正视观看情况下的绝对差别。

为了定量评估 LCD 在某个方位角内的伽马偏移,2019 年 GUO 等人提出了方位角图像失真指数 $D_{\mathrm{A}}(\theta)$,当 $D_{\mathrm{A}}(\theta)<0.2$ 时,人眼就不能分辨出 LCD 在某一视锥下存在的 Gamma 偏移,从而进一步完善了对 Gamma 偏移的评价。$D_{\mathrm{A}}(\theta)$ 的表达式为[3]:

$$D_{\mathrm{A}}(\theta)=\left\langle\frac{\left|\Delta B_{i,j(\text{off-axis},\theta)\min}-\Delta B_{i,j(\text{off-axis},\theta)\max}\right|}{\Delta B_{i,j(\text{off-axis},\theta)\min}}\right\rangle_{i,j=0\sim255}, \tag{2}$$

式中:min 代表最低的伽马曲线,max 代表最高的伽马曲线。这个参数表示某个极角情况下,不同方位角下伽马偏移的绝对差别,相比于单独使用离轴图像失真指数,采用这两个参数共同来表示显示器的 Gamma 偏移量在理论上更为合理。

2.2 色偏移

色偏移是确定 LCD 面板颜色均匀性的重要参数,它表示 LCD 的画面颜色在倾斜视角下发生变化的现象。LCD 与角度相关的颜色均匀性通常由分光光度计测量,当显示器颜色设置为全亮状态时,它可以显示 u' 和 v' 坐标,u'、v' 表示色度。色度坐标 u' 和 v' 是在视觉上大多数颜色偏离区域中测量的,例如 LCD 面板的水平和垂直方向[4]。任何 LCD 都存在色偏移的现象。

由于人眼对不同色彩的敏感度不同,显示行业中普遍使用均匀色彩空间 CIE1976 $L^*u^*v^*$ 表征色偏移。当进行初步色偏移评价时,可用该体系中的色坐标距离表示。CIE 1976 $L^*u^*v^*$

与 CIE 1931 *XYZ* 色度系统的换算关系及色偏计算的数学表达式为[1]：

$$x=\frac{X}{X+Y+Z}\quad,\tag{3}$$

$$y=\frac{Y}{X+Y+Z}\quad,\tag{4}$$

$$u'=\frac{4X}{X+15Y+3Z}=\frac{4x}{-2x+12y+3}\quad,\tag{5}$$

$$v'=\frac{9Y}{X+15Y+3Z}=\frac{9y}{-2x+12y+3}\quad,\tag{6}$$

$$\Delta E=\Delta u'v'=\sqrt{(u'_2-u'_1)^2+(v'_2-v'_1)^2}\quad,\tag{7}$$

其中：u'、v'表示色度，即从 *XYZ* 坐标系转变为 $L^*u^*v^*$ 坐标系，ΔE 表示色偏量，$[u'_1,v'_1]$为正视视角下的色度坐标值，$[u'_2,v'_2]$代表倾斜视角下的色度坐标值。一般认为，当 $\Delta E<0.02$ 时则人眼不能分辨出 LCD 存在色彩偏移。

3　散射膜方法

1995 年，ZIMMERMAN 等人为了提高对比度、降低色偏移，首次提出使用准直背光源，又为了获得宽视角，进一步提出了将 3 维微结构的光散射膜与准直背光源结合，将穿过液晶盒的准直光束散射向各个方向。为了保持高的对比度，这种散射膜需要具有高效率和低的环境光散射，为了保持液晶显示器的薄尺寸的优点，准直背光源也必须很薄[5]。这种方法可用于所有模式的液晶显示器，其中，对于薄膜场效应晶体管（Thin Film Transistor，TFT）驱动的液晶显示器，不仅能保持高的对比度，还能实现宽视角，更能降低色偏移和 Gamma 偏移。

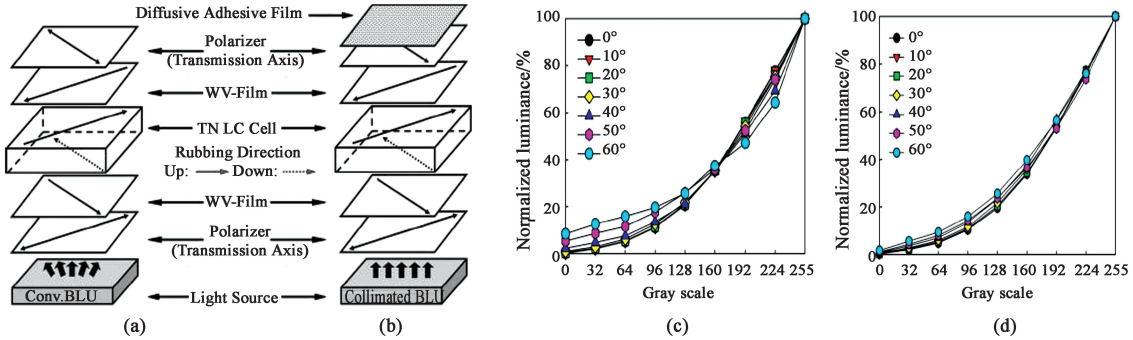
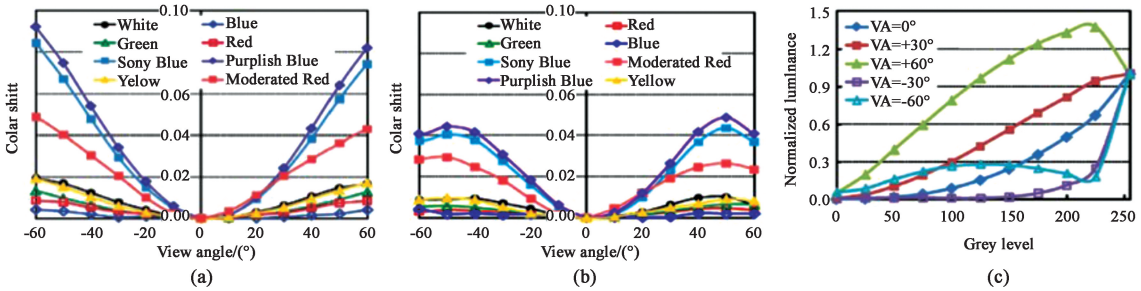


图 1　(a)补偿膜方式的 TN 盒；(b)加散射膜的 TN 盒；(c)补偿膜方式 TN 盒的 Gamma 曲线；(d)加散射膜 TN 盒的 Gamma 曲线[6]。

Fig.1　(a)TN cell with compensation film; (b)TN cell with scattering film; (c)Gamma curves of the TN cell with compensation film; (d)Gamma curves of the TN cell with scattering film[6].

2009 年，HWANG 等人提出了使用一种将球形颗粒分散在透明介质中的散射膜，由于颗粒与粘合介质之间的折射率不匹配而发生散射，将这种膜贴在液晶盒的上基板，如图 1(b)所示，来自准直背光源的准直光线就会被均匀地散射，能够获得宽视角，此外，这种结构还能将 Gamma 偏移值由使用补偿膜方法的 0.416 降低到 0.208，如图 1(c)和 1(d)所示[6]。

2012 年，PARK 等人提出了一种抛物线凹槽形状的散射膜，将这种散射膜与准直背光源结合，并优化散射膜的尺寸，能降低所有液晶显示模式的 Gamma 偏移和色偏移，如图 2(a)～2(f)所示[7]。



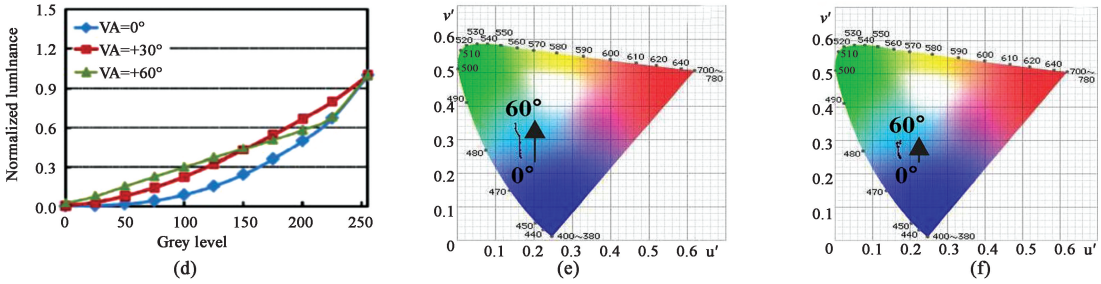


图 2 (a)S-PVA 的色偏移值;(b)加散射膜的 S-PVA 色偏移值;(c)TN-LCD 的 Gamma 曲线(垂直方向);(d)加散射膜的 TN-LCD 的 Gamma 曲线;(e)S-PVA 色度图;(f)加散射膜的 S-PVA 色度图[7]。

Fig.2 (a)Color shift value of S-PVA;(b)Color shift value of S-PVA with the scattering film;(c)Gamma curves of TN-LCD(vertical direction);(d)Gamma curves of TN-LCD with the scattering film;(e)Chromaticity diagram of S-PVA;(f)Chromaticity diagram of S-PVA with the scattering film[7].

4 IPS 类型液晶显示模式

共面转换液晶显示器可细分为平面转换(IPS)模式和边缘场开关(FFS)模式,IPS 模式是靠交错排列的不同极性电极产生水平电场驱动液晶分子旋转,FFS 模式是靠相邻排列的条状像素电极与下方一层公共电极产生的边缘场驱动液晶分子旋转。FFS 模式的透过率比 IPS 模式略高。

IPS 的优势是可视角度高、响应速度快且均衡。缺点是暗态时有少许的漏光,黑色纯度及画质相比于 VA 模式稍差一些。

4.1 传统双畴 IPS 液晶显示模式

IPS 模式的液晶显示器极大地提高了显示器的可视角度,并且在一定程度上降低了显示器的色偏移,但是显示器的色偏移程度依然很明显,仍需进一步改善。早在 1997 年,ARATANI 等人就对 IPS 模式液晶显示器中产生色偏移的原因进行了研究,发现最大透过的波长与光程差有关,通过更加精细的观察发现,平行于加电场时液晶分子排列方向会发生蓝移,垂直于液晶分子方向发生黄移,如图 3(a)所示。那么有至少两个相反的液晶分子排列方向的多畴结构,就能通过使不同方向的色彩进行自补偿来实现均衡效果,从而降低液晶显示器的色偏移,为了减少加工过程,最好只有一个预取向方向,所以他们提出了“之”字形电极结构来抑制色偏移,如图 3(b)所示[8]。加电时,这种结构会沿垂直于电极方向产生两个方向的电场,液晶分子也向两个方向转动,透过下偏光片的线偏振光在液晶层中发生不同的双折射,从而达到互补的效果,使得各个方向的色彩更加均匀,从而抑制色偏移。由图 3(c)~3(f)可以看出,在 50°极角下,最大透过率和 10%灰度级时,“之”字形 IPS 模式都能有效抑制色偏移。但是,“之”字形结构拐角处不能显示,也会降低液晶显示器的透过率。

2002 年,KIM 等人将“之”字形结构用于 FFS 模式的液晶显示器,如图 4(b)所示,经过分析和模拟,发现也能明显降低 FFS 模式液晶显示器的色偏移,如图 4(c)和 4(d)所示,工作原理与“之”字形 IPS 模式类似。

2010 年,CHEN 等人提出在小尺寸的液晶显示器中为了保持高分辨率和开口率,最好使用单畴结构,为了降低色偏移,提出了一种类似“之”字形的结构,如图 5(a)所示,这样对角线上两个部分的子像素就能互相补偿[10]。不过,这样的像素结构设计会在数据线和像素电极之间出现暗区,由于该区域的电场强度不均匀。他们进一步将数据线也设计成类似“之”字形结构,如图 5(b)所示,这样在斜视角下也能实现自补偿,能在保持高开口率的情况下实现低色偏移,如图 5(c)所示,FFS V.1 为传统条形 FFS 结构,FFS V.2 为新设计的类似“之”字形 FFS 结构。从图 5(d)~5(f)可以看出,这种新型的“之”字形 FFS 结构能有效降低色偏移。

4.2 正交形电极结构

2006 年,KIM 等人提出“之”字形结构由于

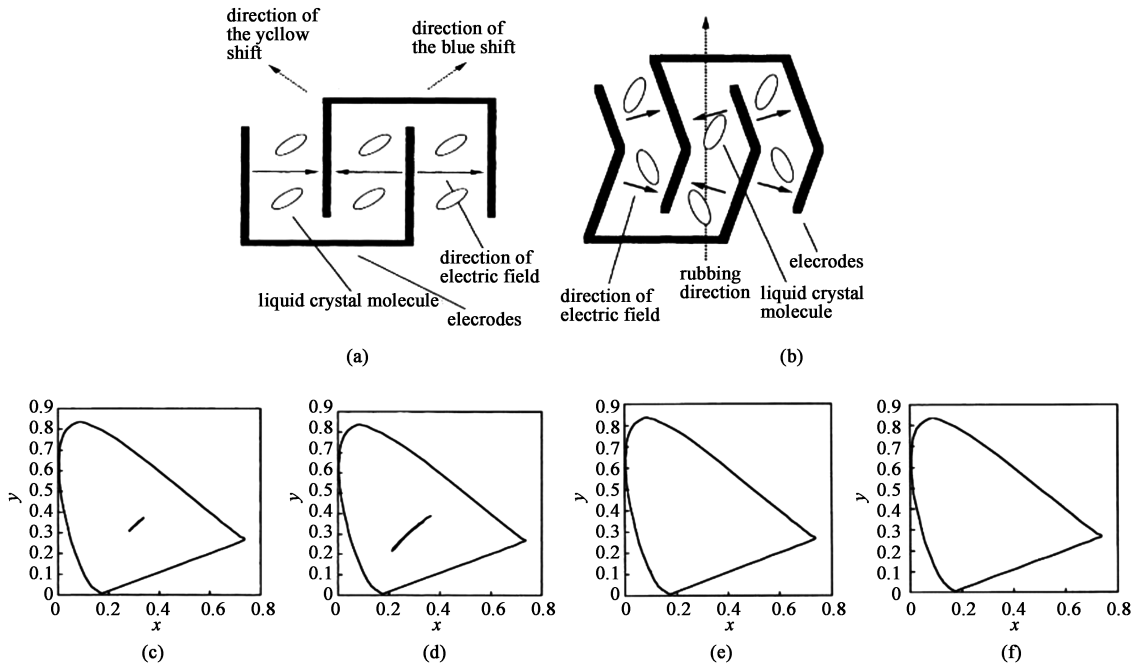


图 3　(a)IPS 模式中的蓝移和黄移；(b)“之”字形 IPS 结构；(c)最大透过率时普通 IPS 模式在 50°极角下的色度图；(d)10%灰度级时普通 IPS 模式在 50°极角下的色度图；(e)最大透过率时“之”字形 IPS 模式在 50°极角下的色度图；(f)10%灰度级时“之”字形 IPS 模式在 50°极角下的色度图[8]。

Fig.3　(a)Blue shift and yellow shift in IPS mode; (b)Zigzag IPS structure; (c)Chromaticity diagram of normal IPS mode at 50° polar angle at maximum transmittance; (d)Chromaticity diagram of normal IPS mode at 50° polar angle at 10% gray level; (e)Chromaticity diagram of zigzag IPS mode at 50° polar angle at maximum transmittance; (f)Chromaticity diagram of zigzag IPS mode at 50° polar angle at 10% gray level [8].

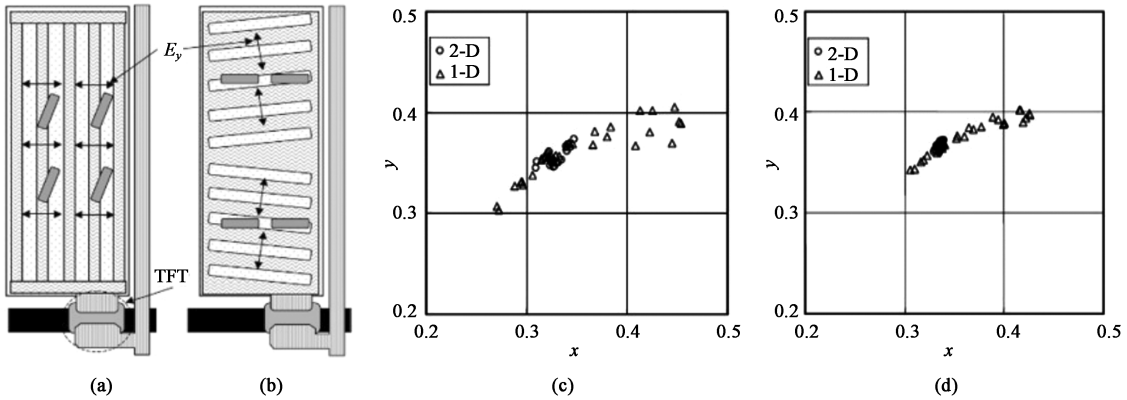


图 4　(a)传统 FFS 模式；(b)“之”字形 FFS 模式；(c)中间灰度级下两种结构的色度图；(d)全白状态下两种模式的色度图[9]。

Fig.4　(a)Traditional FFS mode; (b)Zigzag FFS mode; (c)Chromaticity diagrams of the two structures in the middle gray level; (d)Chromaticity diagrams of the two structures in the white state [9].

加电时上下部分液晶分子之间的夹角比较小，如图 6(a)所示，不能实现完全的自补偿，当液晶分子相互垂直时，自补偿效果最好，能最大限度地降低色偏移，所以他们提出了一种新的正交形 FFS

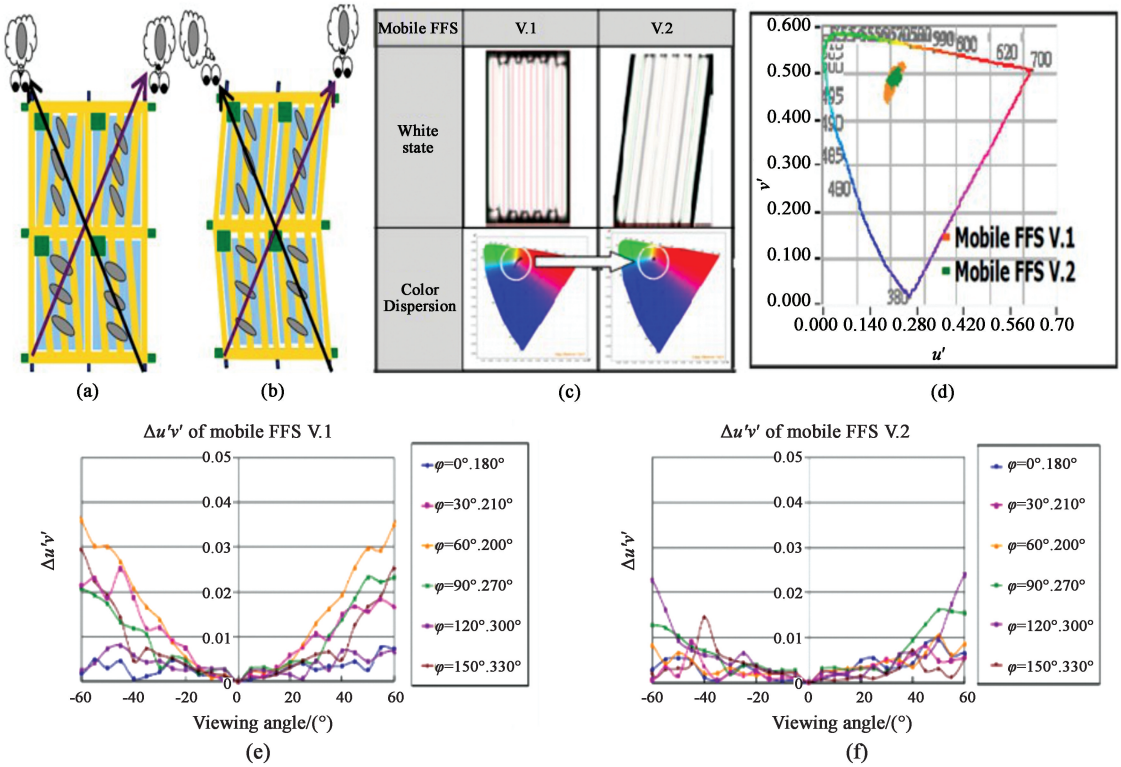


图 5 (a)类似“之”字形的结构;(b)新型“之”字形 FFS 结构;(c)FFS V.1 与 FFS V.2 的对比;(d)FFS V.1 与 FFS V.2 的色度图对比;(e)FFS V.1 的色偏移值;(f)FFS V.2 的色偏移值[10]。

Fig.5 (a)Zigzag-like structure;(b)New zigzag FFS structure;(c)Comparison of FFS V.1 and FFS V.2;(d)Chromaticity diagram comparison of FFS V.1 and FFS V.2;(e)Color shift value of FFS V.1;(f)Color shift value of FFS V.2 [10].

模式的液晶显示器结构,如图 6(b)所示,存在这种结构像素中上半部分和下半部分中的液晶分子从关闭状态到开启状态始终保持 90°旋转对称性,因此能达到比较好的自补偿,从而能有效降低色偏移,尤其在驱动电压比较低时和宽视角范围内,其色彩表现相对突出[11]。

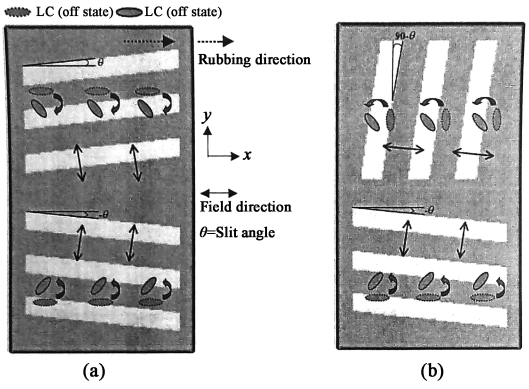


图 6 (a)“之”字形 FFS 模式;(b)正交形 FFS 模式[11]。

Fig.6 (a)Zigzag FFS mode;(b)Orthogonal FFS mode[11].

2012 年,WU 等人结合光对准技术进一步详细研究比较了 FFS 模式液晶显示器的“之”字形和正交形结构对色偏移和 Gamma 偏移的影响。由图 7(a)和图 7(b)可以看出,在更宽的视角下,正交形结构对于色偏移的抑制作用更好。由于“之”字形结构的液晶分子扭曲不足以使液晶分子相互垂直,从而不能实现很好的自补偿,而正交形的液晶分子始终相互垂直,所以在不同的透过率下,正交形结构的色偏移始终比“之”字形要低,如图 7(c)~7(e)所示。图 7(f)和图 7(g)也显示出,在不同的极角下,正交形结构对色偏移的抑制作用也比“之”字形要更好。对于 Gamma 偏移来说也有相似的效果,选择灰度等级 144 来比较“之”字形 FFS 模式和正交形 FFS 模式,与 Gamma 2.2 曲线相比,“之”字形 FFS 模式的伽玛偏移率为 34.54%,而正交形 FFS 模式仅为 17.73%,如图 7(h)和图 7(i)所示[12]。

4.3 四畴电极结构

2016 年,PARK 等人提出了如图 8(c)所示的

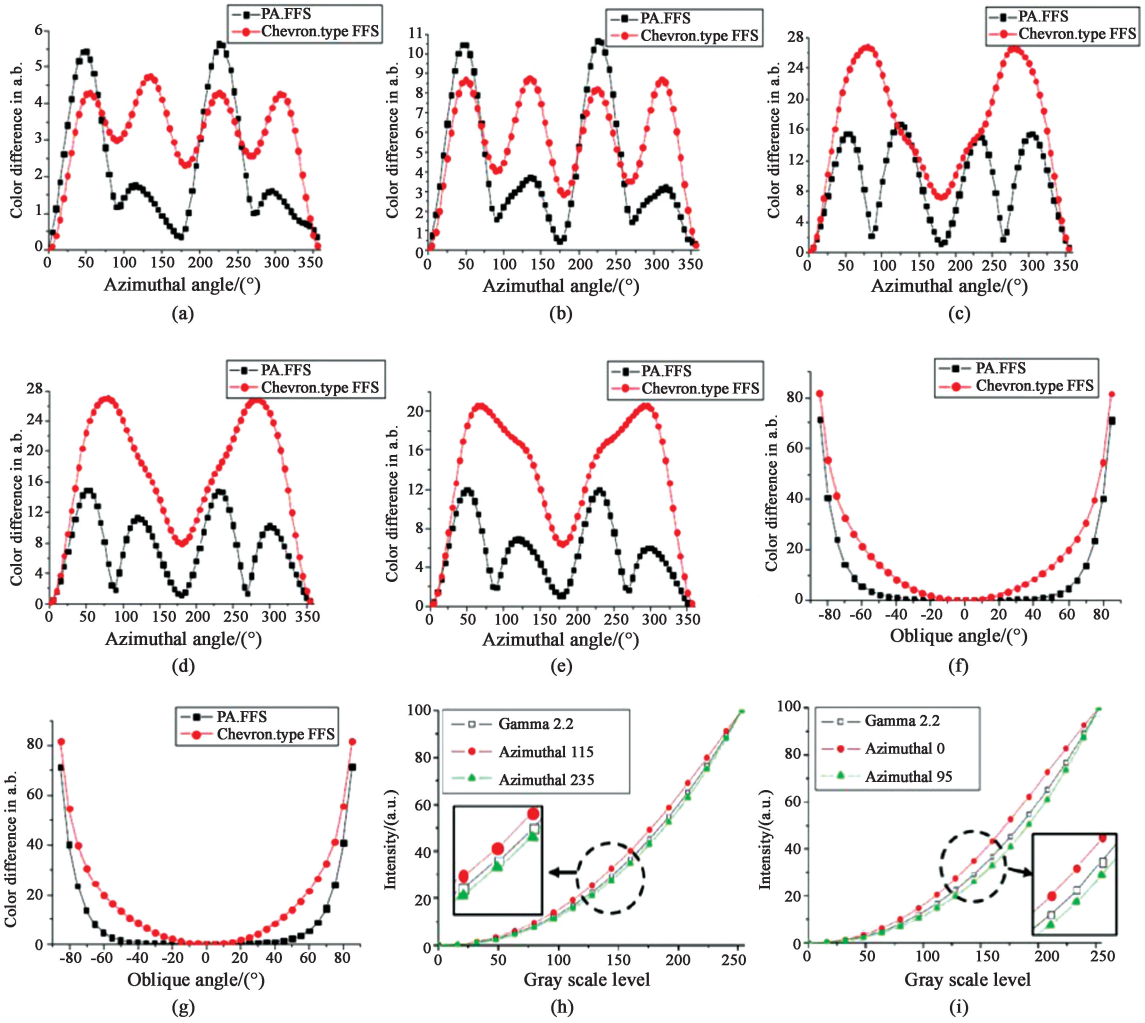


图 7　(a)45°极角下色偏移随方位角的变化；(b)60°极角下色偏移随方位角的变化；(c)30%透过率时色偏移随方位角的变化；(d)50%透过率时色偏移随方位角的变化；(e)70%透过率时色偏移随方位角的变化；(f)100°方位角时色偏移随极角的变化；(g)280°方位角时色偏移随极角的变化；(h)正交形 FFS 在 60°极角、不同方位角时最大 Gamma 偏移；(i)“之”字形 FFS 在 60°极角、不同方位角时最大 Gamma 偏移[12]。

Fig.7　(a)Change of color shift with azimuth at 45° polar angle; (b)Change of color shift with azimuth at 60° polar angle; (c)Change of color shift with azimuth at 30% transmittance; (d)Change of color shift with azimuth at 50% transmittance; (e)Change of color shift with azimuth at 70% transmittance; (f)Change of color shift with polar angle at 100° azimuth; (g)Change of color shift with polar angle at 280° azimuth; (h)The maximum Gamma shift under different azimuth angles of the orthogonal FFS at 60° polar angle; (i)The maximum Gamma shift under different azimuth angles of the Zigzag FFS at 60° polar angle[12].

四畴结构来降低显示器的 Gamma 偏移和色偏移。这种结构的 1 和 4 区域的液晶分子始终相互垂直，2 和 3 区域的液晶分子始终相互垂直，相邻两个区域的液晶分子成一定夹角且旋转方向相反，所以入射光无论从哪个方向以倾斜角度入射，都能得到很好的自补偿，并且显示出对称的亮度分布[13]。如图 8(d)～8(f)所示，在低灰度级下，具有 2D“之”字形、2D 正交形和 4D 电极结构的 FFS 模式在 75°极角处的平均色偏移分别为 0.038、0.012 和 0.010，在中灰度级下，平均色偏移分别为 0.019、0.007 和 0.002。这些结果清楚地表明，不管灰度级如何，4D 电极结构都可以抑制整个视角范围内的色偏移。如图 8(g)～8(i)所示，传统 FFS 模式的 D(45°,

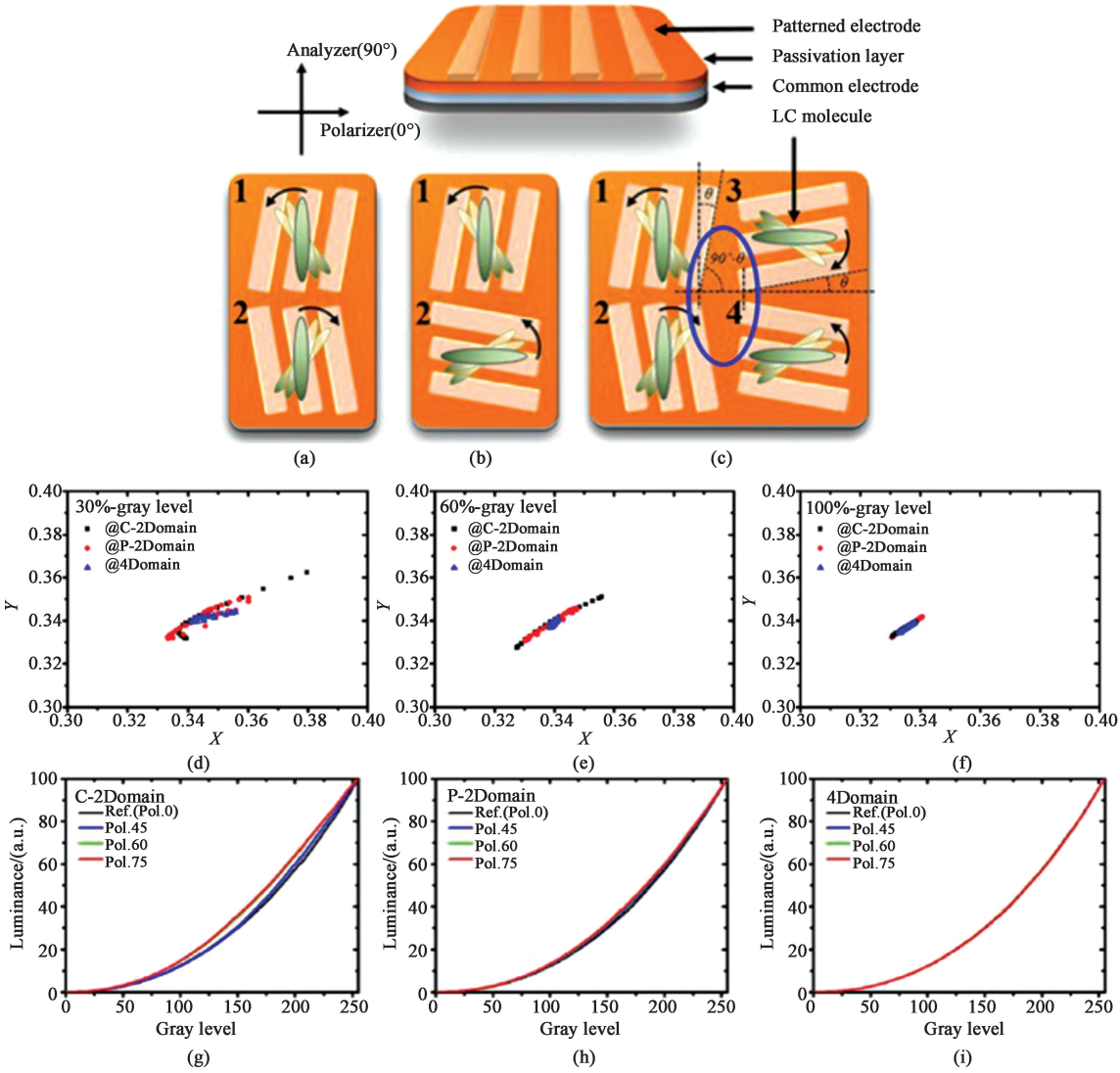


图 8 (a)2D“之”字形 FFS 结构示意图;(b)2D 正交形 FFS 结构示意图;(c)4D FFS 结构示意图;(d)30%灰度级时 75°极角、不同方位角下的色度图;(e)60%灰度级时 75°极角、不同方位角下的色度图;(f)100%灰度级时 75°极角、不同方位角下的色度图;(g)2D“之”字形在 45°方位角下的 Gamma 曲线图;(h)2D 正交形在 45°方位角下的 Gamma 曲线图;(i)4D FFS 在 45°方位角下的 Gamma 曲线图[13]。

Fig.8 (a)Schematic diagram of 2D zigzag FFS structure;(b)Schematic diagram of 2D orthogonal FFS structure;(c) Schematic diagram of 4D FFS structure;(d) Chromaticity diagram with different azimuth angles at 75° polar angle at 30% gray level;(e)Chromaticity diagram with different azimuth angles at 75° polar angle at 60% gray level;(f)Chromaticity diagram with different azimuth angles at 75° polar angle at 100% gray level;(g)Gamma curve diagram of 2D zigzag at 45° azimuth;(h)Gamma curve diagram of 2D orthogonal at 45° azimuth;(i)Gamma curve diagram of 4D FFS at 45° azimuth[13].

75°)为 0.287,而 2D“之”字形和 2D 正交形 FFS 模式的 $D(45°,75°)$ 分别为 0.159 和 0.074,4D 结构 FFS 模式的 $D(45°,75°)$ 为 0.007,说明尽管通过使用 2D 结构发生了改进,但是对于大的极角仍然存在 Gamma 偏移,4D 结构的效果比 2D 结构要好很多[13]。

4.4 S 形电极结构

2007 年,Lee 等人在“之”字形的基础上又提出了 S 形结构。S 形 FFS 结构示意图如图 9(a)所示。不同位置电极间距不同,电场的大小和方向也不同,这导致了加电压时,液晶分子在不同位置有不同的旋转方向,图 9(a)给出了其中的 4 种

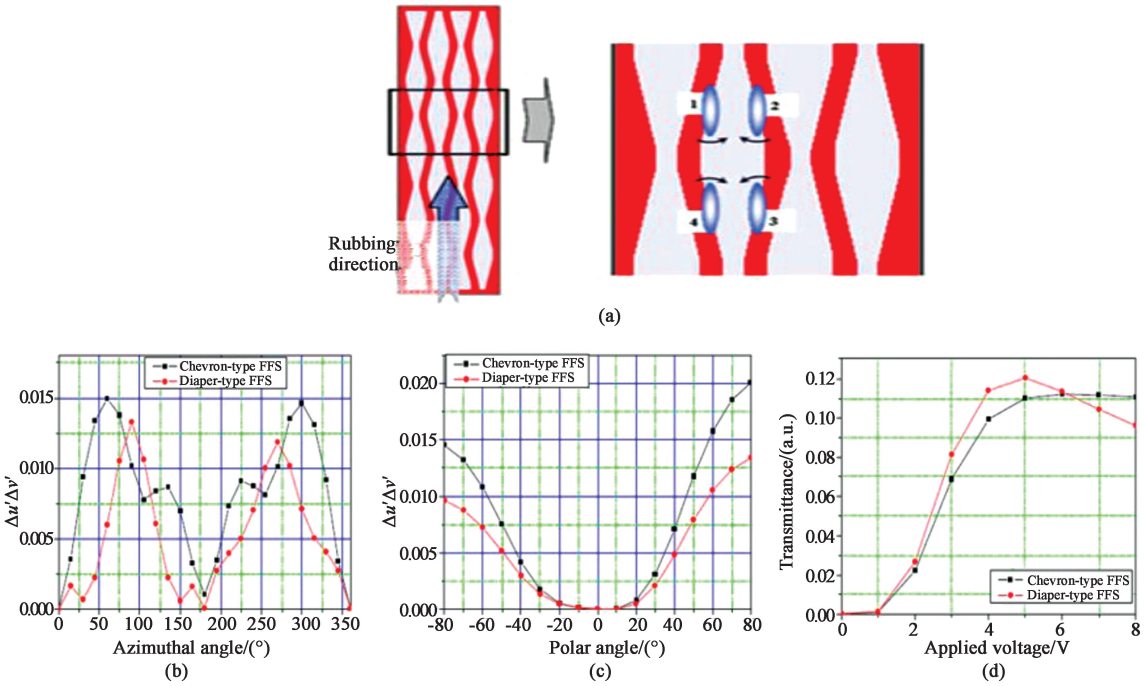


图 9　(a)S 形 FFS 结构示意图；(b)不同方位角下的色偏移值；(c)不同极角下的色偏移值；(d)*V-T* 曲线[14]。

Fig.9　(a)Schematic diagram of diaper FFS structure; (b)Color shift value under different azimuth angles; (c) Color shift value under different polar angles; (d)*V-T* curve[14].

方向，这就使得各个方向的补偿更加均衡，会降低 Gamma 偏移和色偏移，如图 9(b)和 9(c)所示。此外，由于相对于输入偏振器的平均 LC 指向矢角接近 45°，并且 LC 层的有效延迟接近半波延迟，因此强的横向场可以容易地允许更多的光透射，S 形结构比“之”字形电极结构具有更大的透光率，如图 9(d)所示[14]。

5　VA 模式液晶显示器

VA 型液晶面板在目前的显示器产品中应用较为广泛，使用在高端产品中，目前 VA 型面板分为两种：MVA、PVA。MVA 型是利用突出物使液晶静止时并非传统的直立式，而是偏向某一个角度静止；当施加电压时液晶分子改变成水平方向，背光通过则更为快速，这样便可以大幅度缩短响应时间，也因为突出物改变液晶分子配向，让视野角度更为宽广。PVA 是一种图案电极垂面排列技术，该技术直接改变驱动电极的形状，删掉了突出物，从而使暗态漏光降低，可以获得优于 MVA 的亮度输出和对比度。

VA 模式的优点是对比度较高、色温较高、漏光程度较低、可视角度提升到 178°，有改善 TN 版面失色的问题。缺点是：虽然有与 IPS 一样的 178°可视角，但左右看屏幕会有偏白的情况，色彩较 IPS 显示模式较差。

5.1　多畴 VA 显示模式

PVA 模式的工作原理如图 10 所示，不加电压时，液晶分子垂直排列，无双折射，面板成暗态。加电压时，图案电极施加倾斜的垂面场，液晶分子沿图案电极施加场的垂直方向倾斜，形成四畴结构，这种 VA 模式不需要摩擦取向，依靠电场作用形成四畴结果。

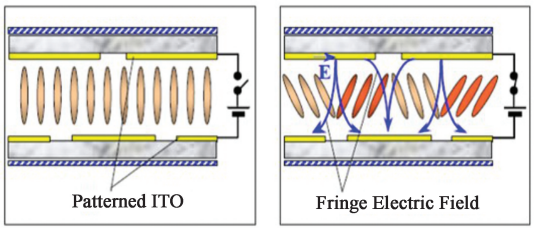


图 10　PVA 模式的工作原理。(a)不加电时；(b)加电时[15]。

Fig.10　Working principle of PVA mode. (a) Not powered; (b)Powered[15].

2005 年，三星公司在 PVA 模式的基础上提出了一种 S-PVA 模式的液晶盒结构，工作原理如图 11 所示，与 PVA 不同的是，S-PVA 会将每个像素分成两个不同的子像素，施加不同的电压，导致它们的倾斜方向不同，这样 S-PVA 就会形成一种八畴结构，可以更好地实现自补偿，降低 Gamma 偏移和色偏移，如图 11(d)～11(f)所示，也能实现大视角显示。

其中，按 S-PVA 的制作原理，又可以分为电容耦合型 S-PVA（Capacitively-Coupled type S-PVA；CC-type S-PVA）[2] 和双晶体管型 S-PVA（Two-Transistor type S-PVA；TT-type S-PVA）[15]。CC-type S-PVA 是使用集成电容由主像素向副像素充电。而在 TT-type S-PVA 中，将栅极线的数量加倍，然后在一条公共数据线上多路复用 A 和 B 子像素驱动电平。TT-type S-PVA 通过提供对每个子像素的独立控制，可以保留峰值亮度并实现最佳性能[15]。但是，这两种方法都有很复杂的制作过程，并且会降低开口率增加功耗。

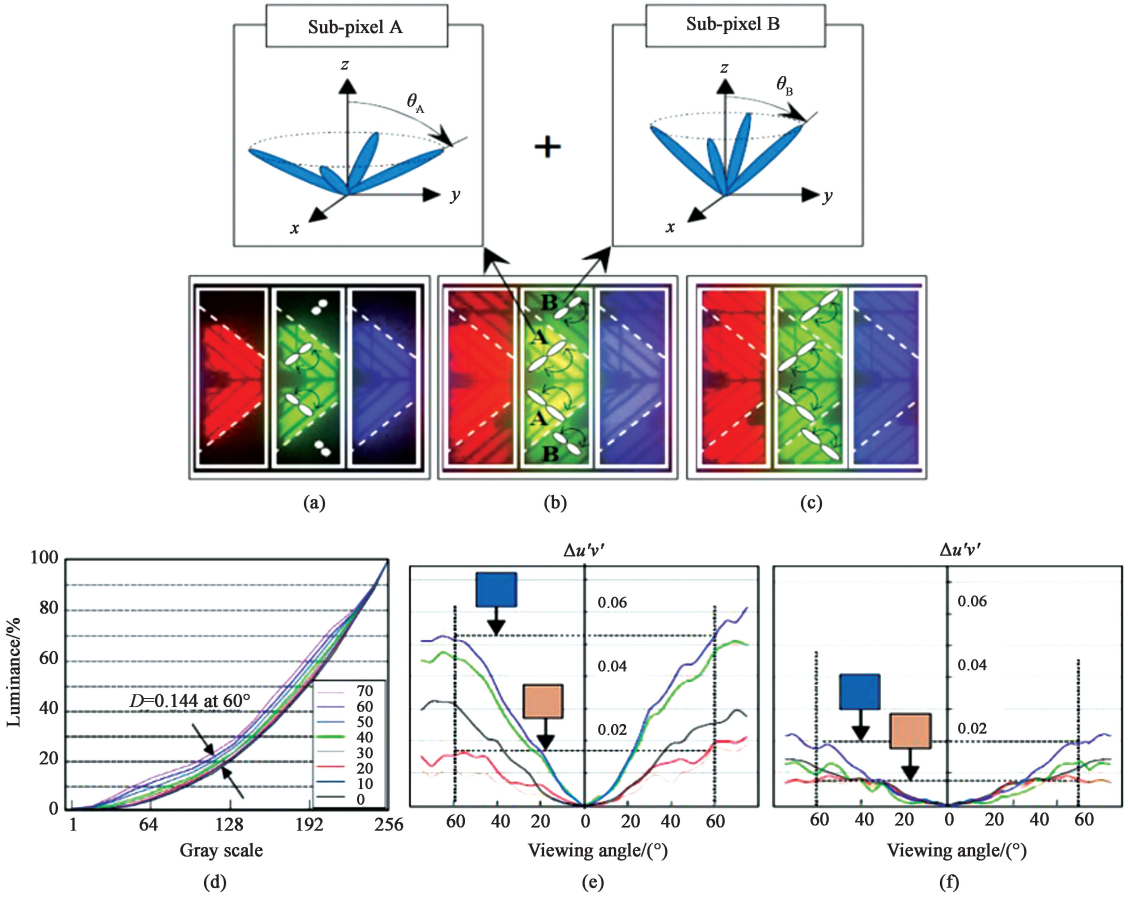


图 11 八畴 S-PVA 模式工作原理。(a)低灰度级；(b)中灰度级；(c)全白；(d)TT-type S-PVA Gamma 曲线；(e)传统 VA 色偏移值；(f)TT-type S-PVA 色偏移值[15]。

Fig.11 Working principle of the eight-domains S-PVA mode.(a)Low gray level;(b)Medium gray level;(c)All white;(d)Gamma curve of TT-type S-PVA;(e)Color shift value of traditional VA;(f)Color shift value of TT-type S-PVA [15].

2008 年，LU 等人提出了一种双阈值电压的 MVA 模式的液晶显示器，如图 12 所示，这种结构也是将每个像素分成两个不同的子像素，在其中一个子像素中制作一薄层的电屏蔽层，这片电屏蔽层会屏蔽一部分电压，使得这个子像素中的阈值电压比另一个子像素高，形成了类似于 CC-type S-PVA 和 TT-type S-PVA 的八畴结构，这种结构在降低 Gamma 偏移和色偏移的基础上，只需要一个薄膜晶体管，也没有开口率低的问题。并且，可以通过调整主副像素的面积和电屏蔽层

的厚度使 Gamma 偏移和色偏移降低到最佳值，如图 12(b)～12(d)所示，传统 MVA 的 $D(60°,0°)$的值为 0.351 0，主副像素面积比为 1∶1 的双阈值电压 MVA 的 $D(60°,0°)$的值为 0.250 6，主副像素面积比为 1∶4 的双阈值电压 MVA 的 $D(60°,0°)$的值为 0.162 9[16]。

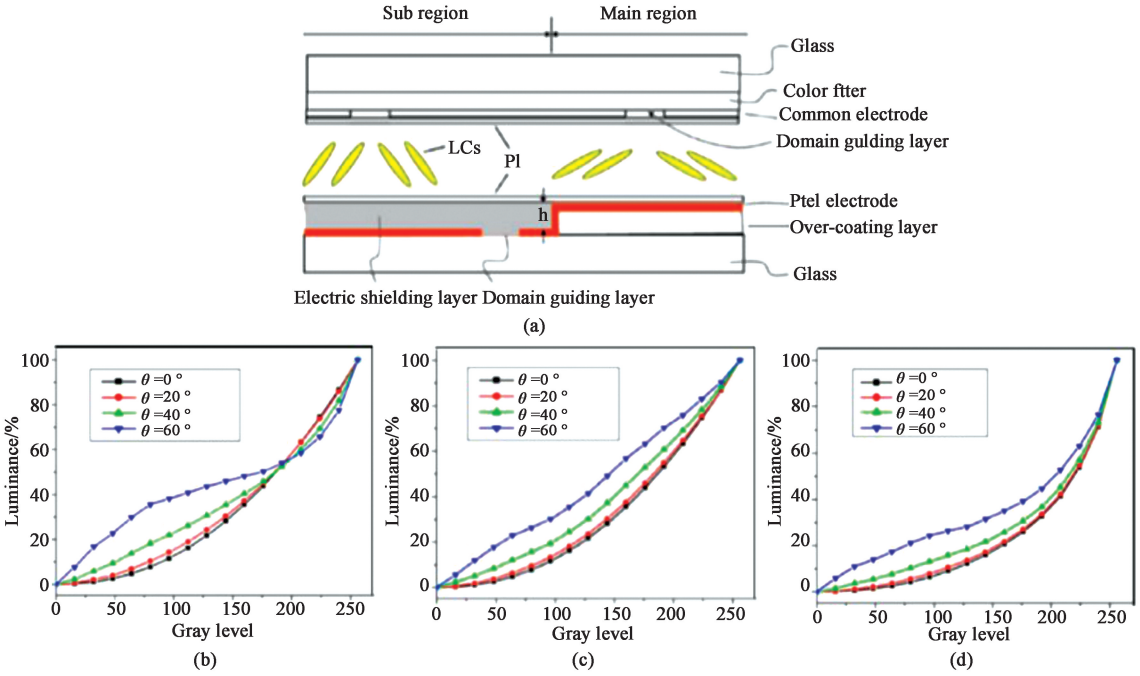


图 12　(a)双阈值电压 MVA 模式工作原理；(b)传统 MVA Gamma 曲线；(c)主副像素面积比 1∶1 双阈值电压 MVA Gamma 曲线；(d)主副像素面积比 1∶4 双阈值电压 MVA Gamma 曲线[16]。

Fig.12　(a) Working principle of the dual-threshold voltage MVA mode; (b) Gamma curves of traditional MVA; (c) Gamma curves of the dual-threshold voltage MVA when the area ratio of the main and sub pixel is 1∶1; (d) Gamma curves of the dual-threshold voltage MVA when the area ratio of the main and sub pixel is 1∶4[16].

2009 年，CHEN 等人提出了将一种特殊的单体添加到液晶混合物中，通过施加适当的电压使得液晶分子倾斜，在此基础上用适当剂量的紫外线照射，这种单体就在聚酰亚胺层上固化形成聚合物层，为液晶分子提供预倾角，制作流程如图 13(a)所示，通过这种方式可以降低液晶显示器的响应时间[17]。2010 年，LEE 等人进一步提出了一种用紫外线将活性聚芳酯单体与垂直取向材料

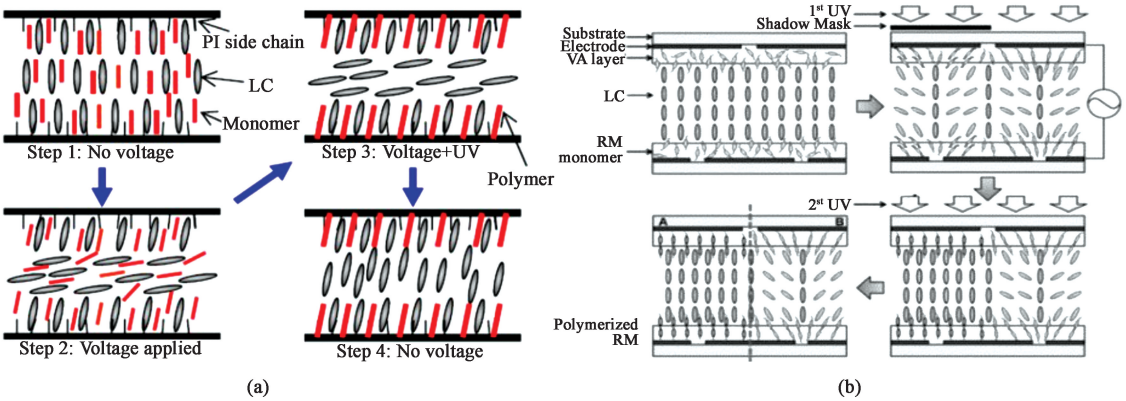


图 13　(a)添加聚合物层的制作流程[17]；(b)八畴 SC-PVA 制作过程[18]。

Fig.13　(a) Production process of adding polymer layer[17]; (b) Production process of eight-domains SC-PVA[18].

混合固化的表面控制 PVA(Surface Controlled PVA: SC-PVA)模式,在 SC-PVA 模式中,取向层中的活性聚芳酯单体在通电状态下被紫外线照射,沿 LC 导向器聚合,活性聚芳酯的定向聚合在液晶分子沿方位角方向转换期间产生了旋转优先,所以响应时间可以大幅减少。在紫外线照射期间,在像素的不同区域施加不同的电压,活性聚芳酯聚合物沿不同的角度固化,在像素中产生不同的预倾角,形成两个子像素,制作流程如图 13(b)所示,通过这样的方法也能形成八畴 S-PVA 结构,并且响应速度快[18]。

2012 年,CHOI 等人又提出了一种在其中一个子像素中添加聚合物层,另一个子像素中不添加的方法来实现双阈值电压,由于加聚合物层会提高液晶显示器的阈值电压,所以加电压时不同子像素的液晶分子的倾斜角度不同,进而将四畴结构分成八畴结构,工作原理如图 14 所示,这种方式制作过程比较简单[19]。

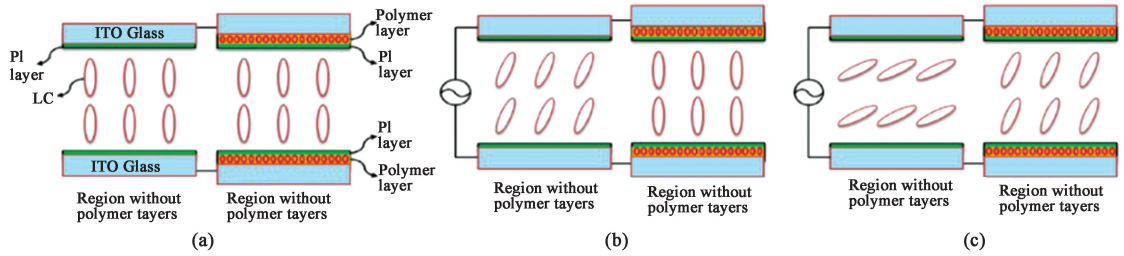


图 14 双阈值电压 VA 模式工作原理示意图。(a)关态;(b)施加高于不添加聚合物层子像素阈值电压,低于添加聚合物层子像素阈值电压的电压;(c)施加高于添加聚合物层子像素阈值电压的电压[19]。

Fig.14 Schematic diagram of the working principle of the dual threshold voltage VA mode.(a)Off state;(b)Apply a voltage higher than the threshold voltage of the sub-pixel without polymer layers and lower than the threshold voltage of the sub-pixel with the polymer layers;(c)Apply a voltage higher than the threshold voltage of the sub-pixel with the polymer layers[19].

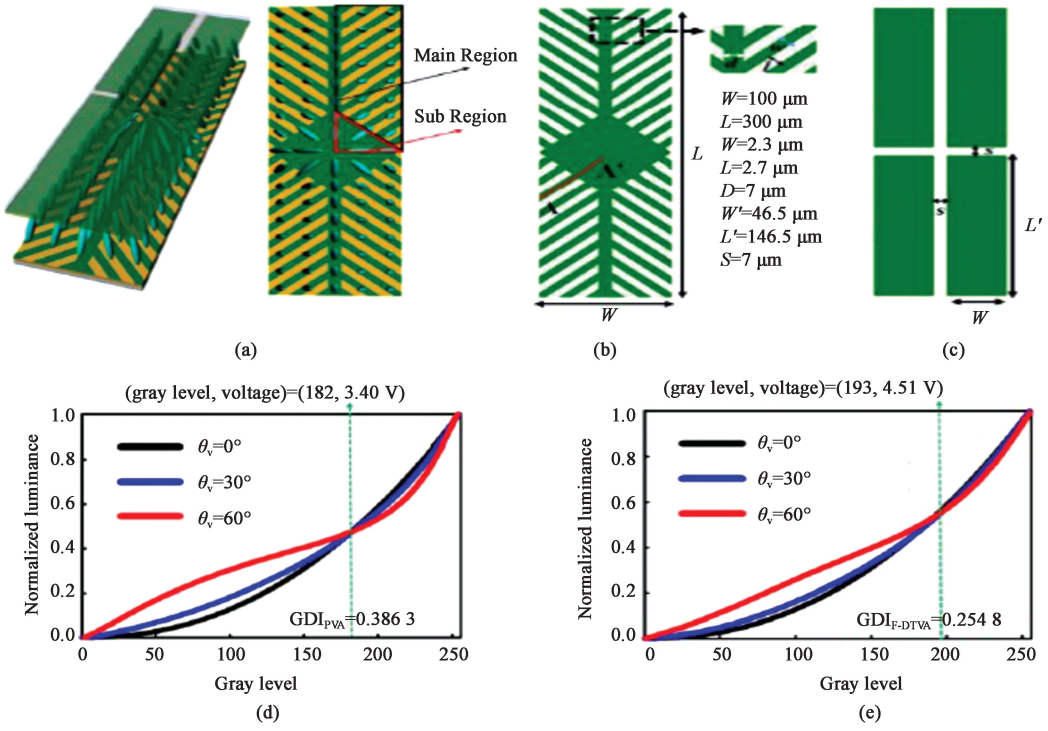


图 15 (a)鱼骨形结构;(b)像素电极;(c)公共电极及其尺寸;(d)PVA Gamma 曲线;(e)鱼骨形 PVA Gamma 曲线[20]。

Fig.15 (a)Fishbone structure;(b)Pixel electrode;(c)Common electrode and its size;(d)Gamma curves of PVA;(e)Gamma curves of fishbone PVA[20].

2018 年，SHIN 等人设计了一种鱼骨形的结构如图 15 所示，这种结构也是将每个像素分成两个子像素，由于像素电极图案的分布，在施加电压时，两个子像素区域的液晶分子倾斜角度不同，尤其是对于弱电场操作的低灰度级而言，通过这种图案电极的设计就可以直接形成八畴结构，从而降低 Gamma 偏移，如图 15(d)和 15(e)所示。通过改变主副像素的面积比，来影响对 Gamma 偏移和色偏移的改善程度，当主像素区域和子像素区域之间的相对面积比为 2 时，八畴 VA 模式能显著改善 Gamma 偏移和色偏移，改变主副像素的面积比能进一步改善 Gamma 偏移和色偏移[20]。这种方法的制作更加简单，也不会造成开口率降低等问题。

5.2　特殊的 VA 结构

2010 年，PARK 等人提出了一种电荷共享 S-PVA(Charge Shared S-PVA，CS-SPVA)技术，这种结构将每个像素分为 3 个子像素，通过如图 16(a)所示的结构向 3 个子像素分别施加如图 16(b)上半部分所示的电压，这种技术能将 Gamma 偏移和色偏移降低到人眼不可分辨的水平，且损失的部分透过率可以通过任意提高透过率的方法弥补[21]。由图 16(c)可以看出，两个子像素的 CS-SPVA 对 Gamma 偏移的作用与 TT-type S-PVA、CC-type S-PVA 相差无几，并且 3 个子像素的 CS-SPVA 结构比两个子像素更好，3 个子像素的 $D(60°)$ 值大约在 0.13～0.17 之间[21]。

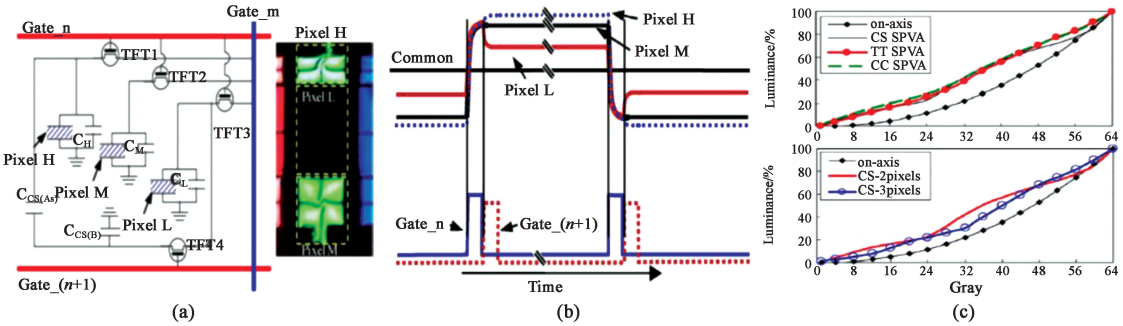


图 16　(a)3 个子像素 CS-SPVA 的像素等效电路以及一个像素的显微镜视图；(b)上半部分是 3 个子像素 CS-SPVA 模式每个像素上的电压，下半部分是 Gate_ n 和 Gate_(n+1)线的栅极信号示意图；(c)上半部分是两个子像素 CS-SPVA 和 TT-type S-PVA、CC-type S-PVA 的 Gamma 曲线，下半部分是两个子像素和 3 个子像素 CS-SPVA 的 Gamma 曲线[21]。

Fig.16　(a)Equivalent circuit of a pixel of three sub-pixels CS-SPVA and a microscope view of one pixel; (b) Upper part is the voltage on each pixel of the three sub-pixels CS-SPVA mode, the lower part is the gate signal schematic diagram of Gate_ n and Gate_(n+1) lines; (c) Upper part is the gamma curves of the two sub-pixels CS-SPVA and TT-type S-PVA, CC-type S-PVA, the lower part is the gamma curves of the two sub-pixels and three sub-pixels CS-SPVA[21].

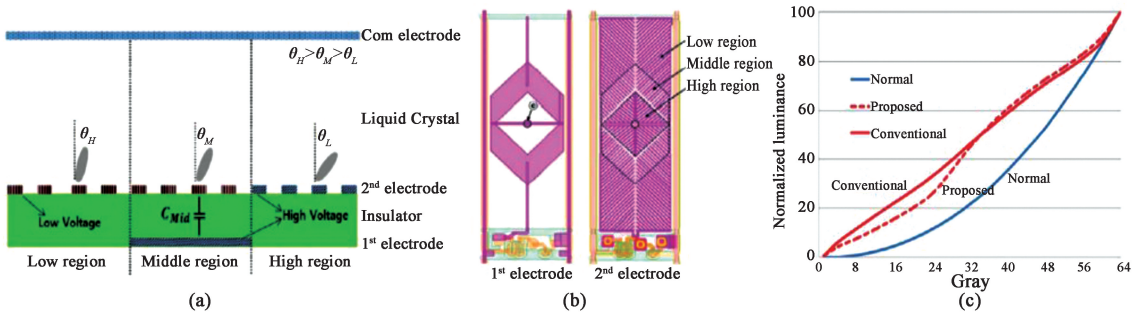


图 17　(a)12 畴结构工作原理和正视图；(b)12 畴结构平面图；(c)60°极角下八畴和 12 畴的 Gamma 曲线[22]。

Fig.17　(a) Working principle and front view of the 12-domains structure; (b) Plan view of the 12-domains structure; (c) Gamma curves of the eight-domains and 12-domains at 60° polar angle[22].

2016 年，KIM 等人提出将每个像素分成 3 个子像素，形成 12 畴结构，如图 17(a)和 17(b)所示，在高电压子像素像素电极和中间子像素下像素电极施加高电压，在低电压子像素像素电极和中间子像素上像素电极施加低电压，这样中间像素电极就能产生介于高电压和低电压之间的一个电压值，形成 3 种 Gamma 曲线，总的 Gamma 曲线是将这 3 种 Gamma 曲线积分。这种结构能改善八畴结构中间灰度级 Gamma 偏移和色彩偏移的情况，如图 17(c)所示，进一步降低 Gamma 偏移和色偏移。

2012 年，LIN 等人通过降低 LC 分子振荡频率，使用快速响应的材料，提出了一种利用振荡 LC 分子运动的时间平均效应的时间划分方法，也可以降低 Gamma 偏移和色偏移，如图 18 所示。与空间像素划分方法不同，时间平均方法不需要像素设计修改，因此不会发生光损耗，时间分割方法可以用作解决当前像素分割方法的替代技术[23]，但该方法在驱动控制方面有难度。

2012 年，TIEN 等人提出了一种将 TT-type S-PVA 与 CS-SPVA 结合产生超多畴 PSA(聚合物稳定排列)的方式，结构示意图如图 19(a)所示，使用 TT-type 方式将每个像素分成主、副两个子像素，再使用 CS 方式将副子像素分成两个子像素，这样就形成了由 4 个排列方向×3 个倾斜角度的 12 畴结构。优化主副子像素和不同副子像素之间的面积比和电压关系，能更好地降低 Gamma 偏移和色偏移值。由于开口率相对传统八畴结构比较小，所以这种超多畴结构的缺点就是透过率比较低，不过可以通过提高透过率的方法来提高。

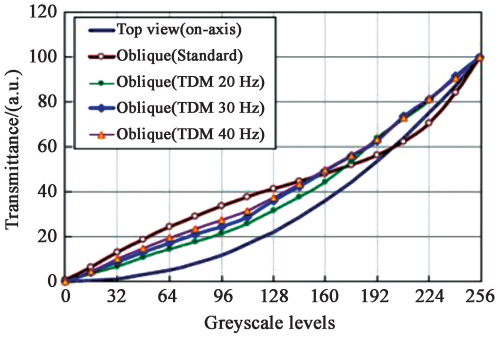


图 18 不同驱动信号下 Gamma 曲线[23]

Fig.18 Gamma curve under different driving signals[23]

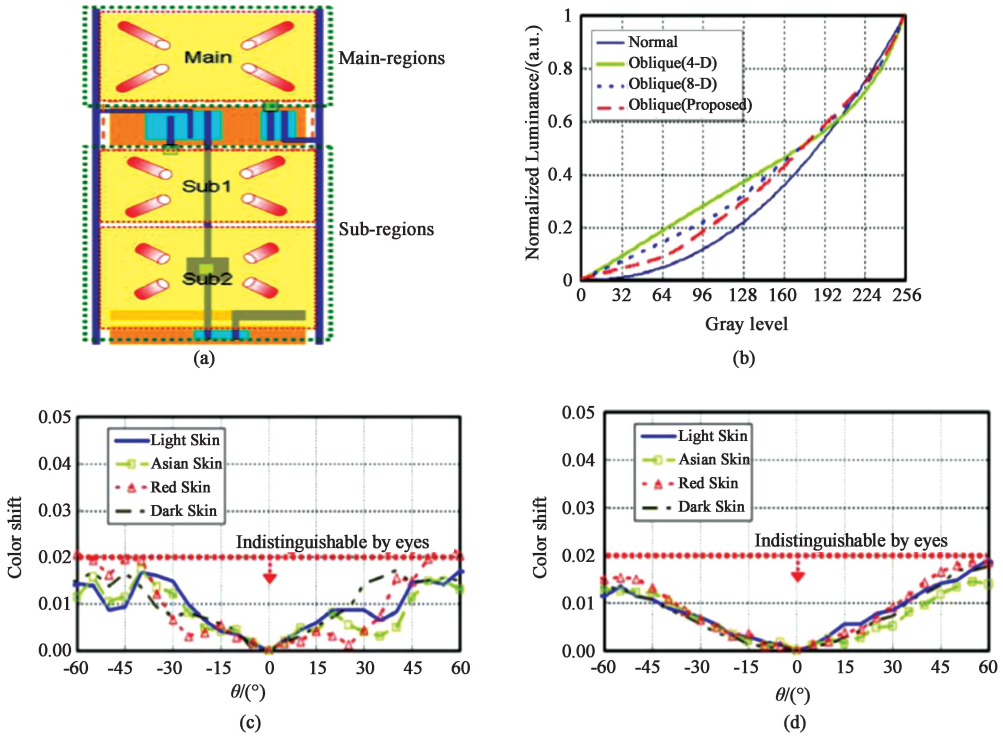


图 19 (a)超多畴 PSA 结构；(b)45°极角下的 Gamma 曲线、色偏移值；(c)超多畴 PSA 结构；(d)商业 IPS 结构[24]。

Fig.19 (a) Super multi-domain PSA structure; (b) Gamma curve at 45° polar angle, color shift value; (c) super multi-domain PSA structure; (d) commercial IPS structure[24].

6　总结与分析

本文综述了有关 LCD 色彩表现的相关进展，主要围绕大视角下的 Gamma 偏移与色偏移展开。降低 Gamma 偏移和色偏移的方法大体可分为两类，一类是在液晶盒的外部贴加散射膜，一类是改变液晶盒内部的电极结构和参数。

散射膜方法适用于所有模式的液晶显示器，制作过程与液晶盒分开，且能实现很好的效果，缺点是由于膜的增加会降低透过率和分辨率，也会增加制作膜的成本。而从显示模式上，IPS 与 VA 模式应用较为广泛，针对这两种液晶显示模式的研究相对较多。对于 IPS 模式的液晶显示器，主要通过加电时在液晶盒内部形成不同的液晶分子指向矢方向来形成自补偿，从而降低 Gamma 偏移和色偏移。但是复杂的多畴结构首先会使制作工艺更加复杂，并且还需要制作不同方向的取向层，其次可能会造成液晶分子排列混乱，最后也会损失透过率。对于 VA 模式来说，由于 VA 模式对视角的依赖比较严重，所以最少要形成四畴结构才能有效地降低 Gamma 偏移和色偏移，所以为了形成更多的畴，采取的方法主要是主副像素法，将每个像素分成两个或多个子像素，通过各种方法，在不同的子像素上施加不同的电压或设置不同的预倾角度，使不同子像素在加电时液晶分子的倾斜角度不同，就能形成不同的 Gamma 曲线，总的 Gamma 曲线是不同子像素 Gamma 曲线的积分，通过这种方式降低 Gamma 偏移和色偏移，透过率也会损失。

改善液晶显示器的 Gamma 偏移和色偏移，是高品质显示器的基本要求，也是大尺寸液晶显示器发展的难题之一，本文对各种常用液晶显示器中的改善方法进行了总结和分析，希望对人们较全面认识改善方法提供帮助。未来液晶显示器还会在保持其高性能的基础上，继续探索简便有效的方法来降低其 Gamma 偏移和色偏移，主要体现在简化制作工艺、节约成本，降低其他性能的损耗，或在两者之间找到比较好的平衡。

参　考　文　献：

[1] 廖燕平，宋志勇，邵喜斌，等.薄膜晶体管液晶显示器显示原理与设计[M].北京：电子工业出版社，2016：146-147.
LIAO Y P, SONG Z Y, SHAO X B, *et al*. *Thin Film Transistor Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 146-147.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] ZIMMERMAN S, BEESON K, MCFARLAND M, *et al*. Viewing-angle-enhancement system for LCDs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 1995, 3(4): 173-176.

[6] 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.

[7] 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.

[8] ARATANI S, KLAUSMANN H, OH-E M, *et al*. Complete suppression of color shift in in-plane switching mode liquid crystal displays with a multidomain structure obtained by unidirectional rubbing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36(1A/B): L27-L29.

[9] KIM H Y, JEON G R, SEO D S, *et al*. Dual domain effects on a homogeneously aligned nematic liquid crystal cell driven by a fringe-field [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(5A): 2944-2948.

[10] 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.

[11] KIM M S, JEONG Y H, SEEN S M, *et al*. Color shift free newly two-domain fringe-field switching mode [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(2A): 887-890.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] KIM S S. The world's largest (82-in.) TFT-LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1842-1847.

[16] 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.

[17] CHEN T S, HUANG C W, HSIEH C C, *et al*. Advanced MVA Ⅲ technology for high-quality LCD TVs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 776-779.

[18] 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(3R): 030209.

[19] CHOI S W, JIN H L, KIM K H, *et al*. Formation of dual threshold in a vertical alignment liquid crystal device [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(2): 170-173.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] TIEN K C, WU Y C, LIAO C H, *et al*. Premium picture quality by super-multi-domain polymer sustained alignment LCD technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, 43(1): 371-374.

作者简介：



黄晓丽(1995—)，女，河北衡水人，硕士研究生，2018 年于河北工业大学获得学士学位，主要从事液晶与液晶器件等方面的研究。E-mail：1963967465@qq.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，主要从事液晶器件物理和液晶的新型应用等方面的研究。E-mail：sun_yubao@163.com



马红梅(1975—)，女，河北邢台人，博士，教授，2018 年于河北工业大学获得博士学位，主要从事液晶物理与液晶器件物理等方面的研究。E-mail：mhmtj@163.com