

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: GUO Yuqiang, WANG Qionghua. Research Progress on Viewing Angle-related Performance of Liquid Crystal Display (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751413

郭玉强,王琼华. 液晶显示器视角相关性能的研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751413

液晶显示器视角相关性能的研究进展(特邀)

郭玉强,王琼华

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要:液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)是重要的显示技术,被广泛地应用于电视、电脑显示器、手机显示屏等领域,覆盖了大中小尺寸几乎所有的需求范围。LCD具有市场规模大、性价比高、寿命长等优点,但也存在一些瓶颈问题,突出表现在视角相关问题,例如倾斜视角下的对比度下降、灰阶偏移、色彩偏移等。此外,随着应用场景的具体化,市场上逐渐涌现出一些特殊的视角需求,例如窄视角、指定视角、视角可控等需求。针对以上问题,研究人员进行了大量的优化和改进,目前LCD的视角相关性能已经得到了明显提升。本文综述了部分有代表性的研究工作,首先,介绍了LCD的基本结构、显示原理、以及常见的显示模式;然后,介绍了与视角相关的性能参数,总结了能够改善视角相关问题的技术方法;最后,归纳了几种特殊的视角控制技术并进行了展望。

关键词:液晶显示器;视角;对比度;灰阶偏移;色彩偏移

中图分类号:TN141.9

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751413

0 引言

液晶是一种具有光学各向异性的光电子材料,被广泛地应用在显示成像、光电工程、生化传感等领域^[1-3]。液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)是基于液晶材料的显示装置,已经在全球形成了万亿级的市场规模。近年来,显示技术呈现出百花齐放的发展态势。从市场占有率来看,以LCD和有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)为主,微发光二极管、激光显示、类纸显示等技术并存发展^[4-6]。目前,各种显示技术发展迅猛,表现出激烈的竞争态势。为了在竞争中谋求生存和发展,各种显示技术必须不断地进行自我革新,凭借更为出色的显示性能来赢得市场的竞争优势。

对于LCD来说,机遇与挑战并存。LCD凭借着庞大的产业基础、高性价比、长寿命等优点,在显示领域中占据了较大的市场份额。近年来,LCD的部分显示性能已经得到了较大提升,但是目前仍存在一些尚待解决的问题,突出表现在视角相关问题^[7]。由于液晶材料具有光学各向异性,所以不同视角下的光程差存在差异,最终导致LCD的电光性能存在视角依赖性,例如亮度、对比度、灰阶、色彩、色域等性能。此外,并非所有的应用场景都需要宽视角显示技术,某些场景存在一些特殊的视角需求^[8-9]。例如,对于有防窥需求的自动柜员机而言,需要让LCD具有窄视角的显示特性,以保障用户的私密性。近年来,研究人员针对LCD的视角相关问题进行了大量的研究,提出了多种改善视角相关性能的技术方法,为未来的发展增添了巨大动力。

本文将对LCD视角相关性能的研究进展进行综述。首先,介绍LCD的基本结构、显示原理、以及几种常见的显示模式。然后,介绍几种与视角相关的性能参数,总结能够改善视角相关问题的技术方法,并分析不同方法的优缺点,归纳几种特殊的视角控制技术,如窄视角、指定视角、视角可控等技术。最后,对未来的研究工作进行展望。

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFB2802300),国家自然科学基金(No. 62105013)

第一作者:郭玉强(1992—),男,博士后,主要研究方向为液晶显示与液晶器件。Email: guoyuqiang@buaa.edu.cn

导师(通讯作者):王琼华(1969—),女,教授,博士,主要研究方向为显示与成像技术。Email: qionghua@buaa.edu.cn

收稿日期:2022-06-10;录用日期:2022-06-21

<http://www.photon.ac.cn>

1 LCD的结构与显示模式

1.1 LCD的结构与显示原理

LCD主要由液晶面板、背光源、驱动电路等部件构成。其中,液晶面板是LCD的重要组成部分,用于显示画面信息;背光源为LCD提供所需的光源,一般用于透射式或透反式显示领域;驱动电路为LCD提供电学信号,以驱动目标像素显示不同的画面^[10-11]。图1(a)展示了LCD的结构示意图,主要包括检偏器、彩色滤色膜(Color Filter, CF)基板、液晶层、薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)基板、起偏器、光学结构、背光源等。其中,检偏器和起偏器均为偏光片,靠近出光一侧的被称为检偏器,靠近背光源一侧的被称为起偏器。此外,可以根据具体需求,在背光源上方的光学结构中添加合适的棱镜膜、散射膜或量子点膜等,从而调整背光的出射角度、散射程度、光谱分布等参数^[12-13]。在LCD中,彩色滤色膜基板、液晶层、TFT基板组成了密封的盒状结构,因此通常被称为液晶盒。

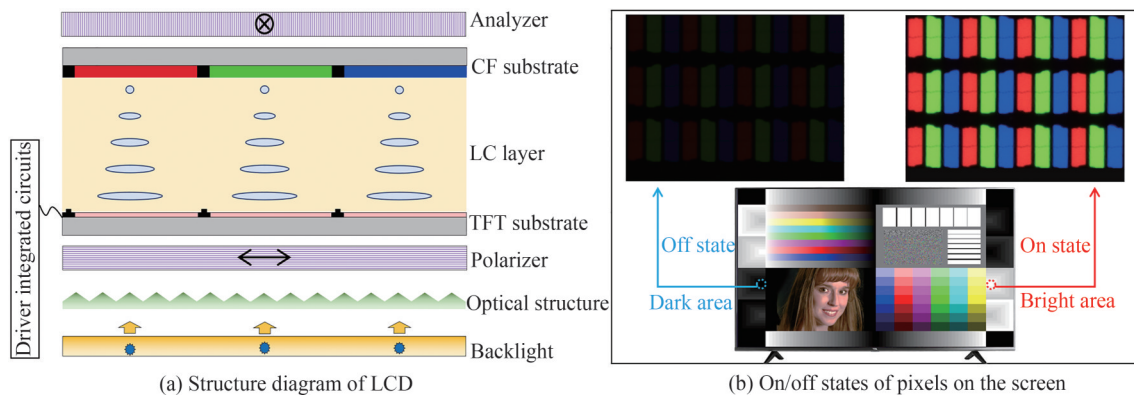


图1 LCD的结构示意图与显示屏上像素的开/关状态
Fig. 1 Structure diagram of LCD and the on/off states of pixels on the screen

液晶材料通常不发光,但是液晶可以调节光的偏振状态,因此在偏光片的共同作用下,可以实现对背光通断状态的调控。在LCD中,背光源产生的光经过起偏器后变为线偏振光。在TFT基板上施加合适的电信号后,液晶分子指向矢就会在电场的作用下重新排布,此时液晶层就会重新调制光的偏振态。当光的偏振态发生变化后,透过检偏器的光强就会发生变化,这样LCD就实现了对透光率的调节。图1(b)展示了彩色画面中像素的开关状态,对于彩色LCD来说,白光通过彩色滤色膜后会变为红、绿、蓝三基色,不同光强的三基色像素就可以构成绚丽多彩的画面。

1.2 LCD的显示模式

自LCD被发明以来,研究人员已经开发出了多种显示模式^[14-15]。根据不同的分类标准,可以将LCD分成不同的显示模式。若根据液晶所处的相态进行划分,则可以分为向列相、胆甾相、铁电相等模式;若根据液晶分子的排列方式,则可以分为均匀、展曲、扭曲、弯曲、混合等模式;若根据基板锚定能的强弱,则可以分为弱锚定、强锚定、双稳态锚定等模式;若根据电场的分布情况,则可以分为垂直场、横向场、边缘场等模式。液晶显示模式的种类繁多,不同显示模式的LCD具有不同的视角性能,适合于不同的应用场景。目前,市场上的LCD产品主要为扭曲向列相(Twisted Nematic, TN)、垂面排列(Vertical Alignment, VA)、共面转换(In-Plane Switching, IPS)、边缘场转换(Fringe-Field Switching, FFS)等显示模式,如图2所示。

1971年, SCHADT M 院士等提出了TN显示模式^[16],它由上下两个相对的电极构成,液晶取向方式为 90° 扭曲排列。未施加电压时,液晶分子呈均匀扭曲状态,在液晶的旋光作用下,线偏振光的振动方向旋转了 90° ,此时光不能通过检偏器,LCD处于关断状态。在像素电极上施加合适的电压后,液晶分子趋于电场方向排列,扭曲排列方式被打破,线偏振光可以透过检偏器,此时LCD处于开启状态。TN显示模式的优点是驱动电压低($\sim 3\text{ V}$)、透光率高、制造成本低,主要缺点是视角较差、陡度低、灰阶较少。目前,TN LCD主要应用中低端显示领域,例如计算器、家电设备、仪器仪表等。

1971年, SCHIEKEL M F 等提出了VA显示模式^[17],它由上下两个相对的电极构成,液晶取向方式为垂

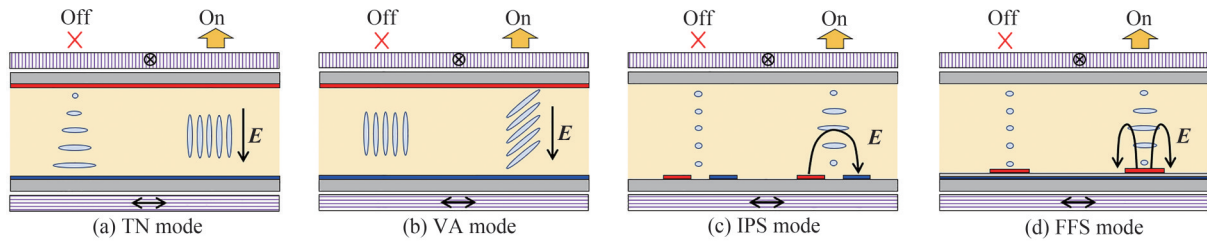


图2 几种常见的液晶显示模式

Fig. 2 Several common display modes of LCD

直于基板排列,液晶材料的介电各向异性为负($\Delta\epsilon < 0$)。未施加电压时,液晶分子垂直于基板排列,来自起偏器的线偏振光最终被正交的检偏器吸收,LCD处于关断状态。在像素电极上施加合适的电压后,负性液晶分子偏向与电场垂直的方向,在双折射效应的作用下,来自起偏器的线偏振光可以通过检偏器,此时LCD处于开启状态。VA显示模式的优点是正视对比度高、响应速度较快、制造成本低,主要缺点是透光率低、视角均匀性差、按压水纹。为了改善其视角均匀性,研究人员在传统VA显示模式的基础上开发出多畴垂面排列(Multidomain Vertical Alignment, MVA)、图案化垂面排列(Patterned Vertical Alignment, PVA)、紫外固化垂面排列(Ultraviolet Vertical Alignment, UV²A)等显示模式^[18-22]。目前,VA LCD主要应用在非触屏显示领域,例如电视机、监视器、显示器等领域。

1973年,SOREF R A提出了IPS显示模式^[23],在此基础上,OH-E M等于1995年又详细地报道了IPS显示模式的电光性能,推进了它的产品化进程^[24]。它的电极由位于同一基板的叉指型电极构成,液晶排列方式为均匀排列。未施加电压时,液晶分子沿着叉指电极的方向均匀排列,来自起偏器的偏振光最终被正交的检偏器吸收,LCD处于关断状态。在像素电极上施加合适的电压后,液晶分子在电场的作用下重新排列,基于双折射效应,部分光线可以通过检偏器,此时LCD处于开启状态。IPS显示模式的优点是视角均匀性较好、按压无水纹,主要缺点是电极正上方无法产生有效的光程差,所以整体透光率较低。目前,IPS LCD主要应用于大中型显示领域,例如电视机、电脑显示器、平板电脑等。

1998年,LEE S H等提出了FFS显示模式^[25],它的电极由叉指型电极及其下方的公共电极构成,液晶取向方式为均匀排列。FFS与IPS显示模式的显示原理相似,二者都是基于液晶的双折射效应来实现显示功能。它们的主要区别在于,IPS显示模式主要靠水平电场驱动液晶分子重新排列,而FFS显示模式中电极间隙较小,主要靠边缘电场驱动液晶分子。FFS显示模式的优点是透光率高、视角均匀性较好、按压无水纹,其主要缺点是TFT基板的制造流程较为复杂,成本相对较高(相较于TN、VA等显示模式)。目前,FFS LCD主要应用于中高端显示设备,例如智能手机、笔记本电脑、平板电脑等。

以上是较为常见的四种显示模式,它们的电极结构和液晶取向方式存在差别,显示性能有所不同,因此适合的应用场景也不尽相同。为了能够更加直观地进行比较,表1列出了四种显示模式的典型性能参数^[26]。虽然以上几种显示模式有几十年的发明历史,但是相关的改进和优化工作从未中断。相比早期的LCD而言,目前相关产品的性能参数已经实现了质的飞跃。

表1 四种显示模式的典型性能参数^[26]Table 1 Typical parameters of four display modes^[26]

Parameters	TN mode	VA mode	IPS mode	FFS mode
Dielectric anisotropy of LC	Positive	Negative	Positive/negative	Positive/negative
Overall transmittance	>95%	~75%	~75%	~90%
Contrast ratio	~1 000:1	~5 000:1	~2 000:1	~2 000:1
Response time	~5 ms	~5 ms	~10 ms	~10 ms
Viewing angle evaluation	Fair	Medium	Good	Good

2 视角相关性能的研究进展

对于LCD来说,一些性能参数存在视角依赖性^[27]。图3展示了某款LCD在不同视角下的拍摄图。不

难发现,该LCD在倾斜视角下不仅发生了图像畸变,其亮度、对比度、灰阶、色彩、色域等性能也发生了变化。一般地,将显示器的可视角度定义为对比度超过10:1所对应的视角。若仅以此为标准,目前大多数LCD产品的视角均能超过 85° (若考虑对称视角 $\pm 85^\circ$,则为 170°)。事实上,对于大尺寸、高性能的LCD来说,不能只考察可视角度这一项指标,其他与视角相关的性能都应纳入考察的范围。近年来,研究人员已经提出了一些能够改善LCD视角相关问题的方法。下面将详细介绍几种与视角相关的性能参数,并总结能够改善视角相关问题的技术方法。



图3 某款LCD在不同视角下的拍摄图(无环境光)

Fig. 3 Photographs of an LCD at different viewing angles (without ambient light)

2.1 亮度

亮度是表征显示器出射光强弱的物理量。在倾斜视角下,绝大多数显示技术均表现出亮度下降的趋势,而LCD的亮度具有更加明显的视角依赖性。与正视下的亮度相比, 30° 视角下LCD的亮度损失通常超过50%^[7,28]。为了提升LCD在倾斜视角下的亮度,并改善其亮度均匀性,研究人员提出了一些技术方法,例如定向背光源加前置扩散膜、不含增亮膜的背光源、量子点彩色滤色膜等方法。

定向背光源加前置扩散膜能够增大倾斜视角下的亮度,改善亮度均匀性。2012年,KÄLÄNTÄR K提出一种能够提高倾斜视角下亮度的方法,即定向背光源加前置扩散膜^[29],相关结果在图4中展示。为了提高倾斜视角下的亮度,需要在定向背光源上方添加特殊的导光板。结果表明,背光经过导光板后发散角变大,因此倾斜视角下的亮度可以提升2~6倍。此外,将原本在背光源处的扩散膜置于LCD的外表面,进一步改善了亮度均匀性。这种方法的优点是能够提升倾斜视角下的亮度、改善LCD的亮度均匀性,但是它存在正视亮度和分辨率降低、图像模糊等缺点。

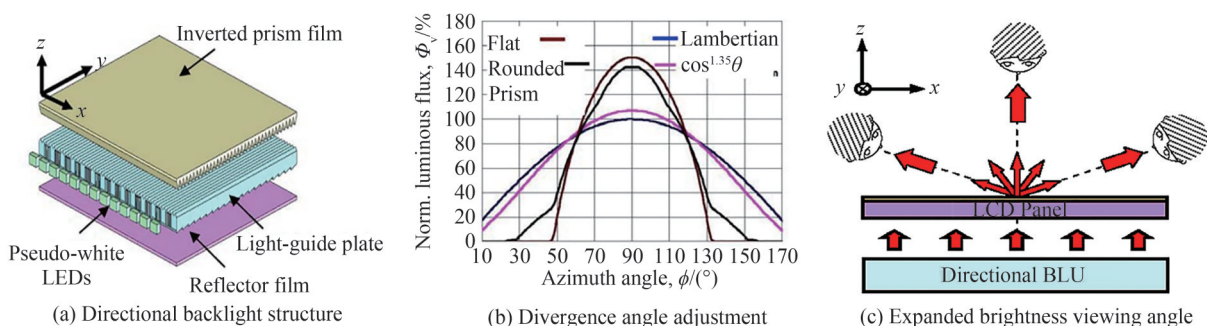


图4 使用定向背光源加前置扩散膜提高LCD的视角均匀性^[29]

Fig. 4 Improved viewing angle uniformity of LCD by using the directional backlight and front diffuser^[29]

不含增亮膜的背光源能够改善LCD的亮度均匀性。2016年,WU S T教授团队报道了一种移除背光源中的增亮膜,来改善LCD视角均匀性的方法^[30]。结果表明,未移除增亮膜前, 60° 视角下亮度损失为 $\sim 70\%$ 。移除增亮膜后, 60° 视角下亮度损失仅为 $\sim 35\%$,亮度损失被削减了一半左右。此外,若移除正交增亮膜,

LCD的整体光效率还将提升~37%。综合来看,移除背光源中的增亮膜是提升LCD亮度均匀性的有效方法,但其缺点是损失正视下的亮度。

使用量子点彩色滤色膜也可以提高倾斜视角下的亮度,改善LCD的亮度均匀性。2016年,CHEN H M教授团队提出使用红、绿、蓝三基色量子点膜来替代原有的彩色滤色膜,显著提高了倾斜视角下的亮度和对比度^[31],相关成果在图5中展示。当蓝色背光源到达三基色量子点滤色膜后,蓝色光就会变成红、绿、蓝三基色,进而实现彩色显示的效果。量子点膜对光具有一定的发散作用,所以可以提升倾斜视角下的亮度,并使亮度更为均匀。但是,使用这种方法前,应当充分计算好量子点的发光效率问题,合理设计三种量子点膜的厚度。此外,还要消除量子点被环境光激发的可能性^[32-34]。

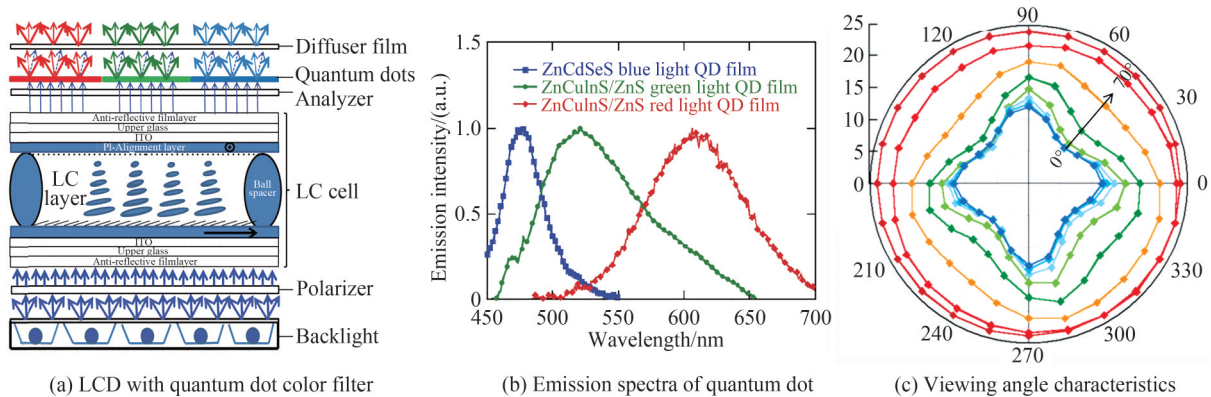


图5 基于量子点彩色滤色膜提升LCD的亮度均匀性^[31]

Fig. 5 Improved brightness uniformity of LCD based on quantum dot color filter^[31]

2.2 对比度

对比度(Contrast Ratio, CR)指的是显示器的亮态与暗态光强的比值($CR = I_{on}/I_{off}$),通常指的是在黑暗环境下测试的理想对比度。从显示模式的发展历程来看,不同LCD的对比度呈现出上升的态势。TN显示模式是最早被提出的,但其对比度较低,视角均匀性较差。VA显示模式具有较高的正视对比度,但倾斜视角下的对比度较低。相比之下,IPS与FFS显示模式在正视和倾斜视角下均具有较高的对比度,并且视角性能也更加均匀。需要说明的是,虽然某些显示模式具有较高的对比度,但是如果仅从显示模式入手,依然难以达到超高对比度的市场要求。下面介绍几种能够提升LCD对比度的方法,包括视角补偿膜、区域调光技术、双盒显示技术、表面减反射膜等。

视角补偿膜可以降低LCD的暗态漏光,进而可以提升其对比度。视角补偿膜通常由光学各向异性的有机透明材料组成,可以起到两个作用:1)纠正偏光片在倾斜视角下的偏光比;2)对离轴方向的相位差进行补偿。视角补偿膜的种类较多,包括单轴膜、双轴膜、倾斜膜等^[35],其中单轴膜的制备工艺较为简单,使用量也较大。对于不同种类的LCD而言,所需的补偿膜种类也不尽相同。对于初始液晶分子为水平排列的LCD来说,一般使用 $n_x > n_z > n_y$ 类型的单轴膜组或双轴补偿膜^[36-38],其中 n_x, n_y, n_z 为直角坐标系中折射率的三个分量;对于初始液晶分子为竖直排列的LCD来说,一般使用 $n_x > n_y > n_z$ 类型的单轴膜组或双轴补偿膜^[39-40]。为LCD添加合适的补偿膜后,可以明显改善LCD的暗态漏光,进而提升其对比度^[41]。目前,视角补偿膜的发展较为成熟,已经被广泛地应用于各类产品之中。

区域调光技术指的是基于微型发光二极管(Mini Light Emitting Diode, Mini LED),实现分区调节背光源亮度的技术。相比传统的面光源而言,区域调光技术可以按需点亮不同区域的背光源,且背光源的亮度是可调的。由于区域调光技术可以避免近邻像素的背光干扰,因此它能够提升LCD的对比度^[42-45]。2020年, HU Daobing等提出一种基于区域调光技术的大尺寸LCD,其动态对比度高达1 000 000:1^[46]。研究人员对比了不同LED数量对画面质量的影响,证明了LED数量与画面质量正相关。此外,他们通过缩小背光源的尺寸,缩减了背光源与像素的非重叠区域,改善了LCD的光晕现象,如图6所示。区域调光技术是提高LCD对比度的重要方法,但目前仍需解决好同步驱动、光晕现象、整体厚度等问题^[47-49]。

双盒显示技术指的是两个液晶盒叠加的显示技术,它是提高对比度的有效方法。2017年, WU S T教授

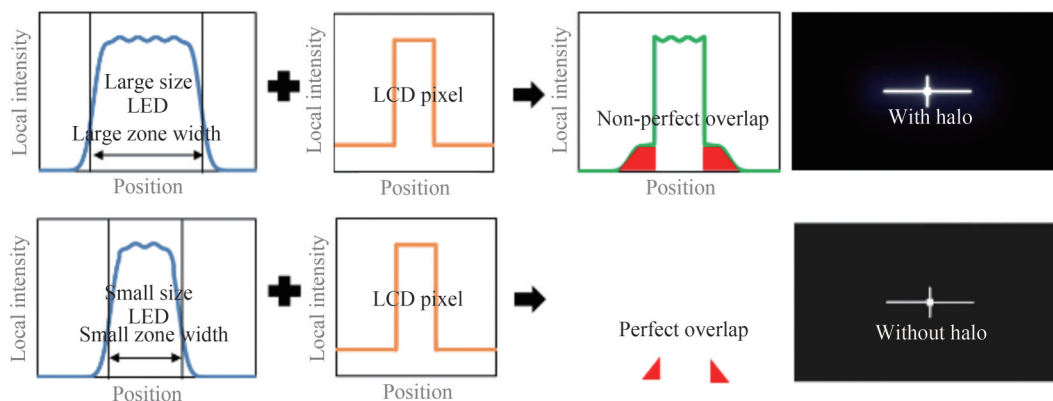


图6 基于区域调光技术的高对比度LCD^[46]
Fig. 6 High-contrast LCD based on local dimming technology^[46]

团队提出一种双盒显示技术,该LCD由TN与FFS两种液晶盒叠加而成^[50]。研究表明,该LCD的正视对比度高于1 000 000:1,60°视角内的对比度高于5 000:1,远远超过单盒TN或FFS LCD的对比度。2020年,XI Yanhui等报道了一款高分辨率、高对比度的双盒LCD,并在65英寸4K分辨率的LCD上进行了对比展示^[51]。结果显示,单盒LCD的对比度为1 636:1,而双盒LCD的对比度高达153 571:1,对比度提升了~97倍。双盒显示技术的优点是具有较高的对比度,但是需要解决双盒对准、同步驱动、消除摩尔纹等问题。

除了理想对比度之外,环境光下的实际对比度逐渐成为消费者更加关注的性能参数^[52]。一般地,LCD的对比度会受到环境光干扰,因此需要用环境对比度(Ambient Contrast Ratio, ACR)^[53]进行衡量,即

$$ACR = \frac{I_{on} + I_{ambient} R_L}{I_{off} + I_{ambient} R_L} \quad (1)$$

式中, I_{on} 与 I_{off} 是LCD的亮态与暗态光强, $I_{ambient}$ 是环境光强度。 R_L 是显示器的表面反射率,其表达式为

$$R_L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) S(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) S(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{I_{ambient}} \quad (2)$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别指可见光的最短和最长波长, $V(\lambda)$ 是人眼的感光函数, $S(\lambda)$ 是环境光的光谱, $R(\lambda)$ 是显示器的光谱反射率。

根据式(1)可知,降低环境光强度或表面反射率均能提升LCD的环境对比度。事实上,人为改变环境光的强度较为困难,所以通常采用降低表面反射率的方法来提升环境对比度。减反射膜是降低反射率的有效途径。一般地,通过控制减反射膜中的膜层厚度,实现反射光干涉相消,就可以实现较低的反射率。虽然减反射膜能够降低反射率,但是传统的减反射膜存在以下缺点:正视下的反射率较高、薄膜的平整度和厚度难以控制。为了解决这些问题,研究人员提出使用折射率渐变的减反射结构来降低表面反射率。2018年,RODRÍGUEZ I教授团队制备了一种基于蛾眼结构的减反射膜,它由亚微米尺度的凸起阵列构成^[54],相关成果在图7中展示。这种蛾眼结构的特征尺寸小于可见光波长,并且折射率自上而下连续变化,绝大部分入射

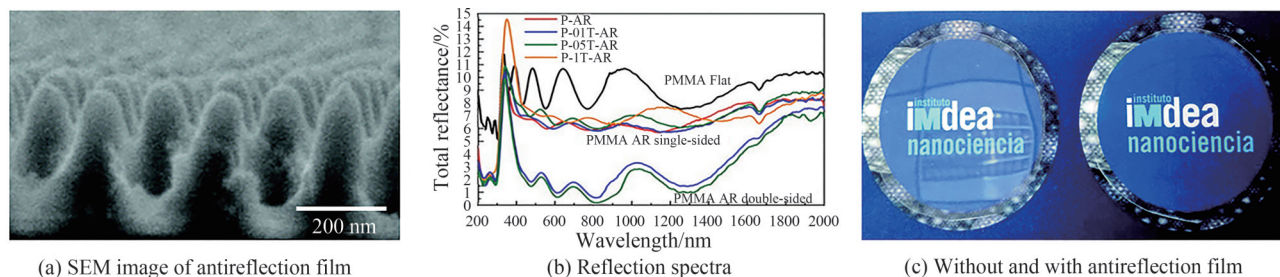


图7 蛾眼减反射膜及其使用前后的效果^[54]
Fig. 7 Moth-eye antireflection film and its effect before and after application^[54]

光不发生反射现象,所以它具有较低的反射率^[55-57]。测试结果表明,如果将该减反射膜贴于聚对苯二甲酸乙二醇酯(Poly(ethylene Terephthalate), PET)基底,则表面反射率可由9%降至0.6%。总的来说,折射率渐变的减反射膜具有较大的应用潜力,但仍需在大面积成膜、降低成本、抗划痕等方面进行优化。

2.3 灰阶与色彩

LCD在显示画面时并不是仅在亮、暗两个状态之间进行切换,它还存在许多中间灰度状态。一般用色深表示显示器的灰度级别,单位为bit。一款显示器所能显示的灰阶与色深呈2的幂指数关系,若色深为 x ,则灰阶数量为 2^x 。由于彩色LCD是由红、绿、蓝三基色子像素组成,所以理论上能够显示出 $2^x \times 2^x \times 2^x$ 种色彩。例如,对于10位色深的显示器,具有的灰阶为 $2^{10} = 1024$ 个,具有的色彩为 $2^{10} \times 2^{10} \times 2^{10}$ 种。

LCD的灰阶与色彩性能具有视角相关性,它们在倾斜视角下会发生不同程度的偏移现象,即灰阶偏移和色彩偏移。灰阶偏移指的是倾斜视角下,灰阶曲线发生分离的现象。灰阶偏移可以使用离轴图像失真指数 D ^[58]和方位角图像失真指数 D_A ^[59]进行量化评价,即

$$D(\theta, \phi) = \left\langle \frac{|\Delta B_{i,j(\text{on-axis})} - \Delta B_{i,j(\text{off-axis}, \theta, \phi)}|}{\Delta B_{i,j(\text{on-axis})}} \right\rangle_{i,j=0 \sim 1023} \quad (3)$$

$$D_A(\theta) = \left\langle \frac{|\Delta B_{i,j(\text{off-axis}, \theta)\text{min}} - \Delta B_{i,j(\text{off-axis}, \theta)\text{max}}|}{\Delta B_{i,j(\text{off-axis}, \theta)\text{min}}} \right\rangle_{i,j=0 \sim 1023} \quad (4)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示各个灰阶下的平均值, $\Delta B_{i,j}$ 表示第 i 与第 j 个灰度之间的透光率差,on-axis表示正视,off-axis表示倾斜视角,min与max代表负向偏移与正向偏移最严重的两条灰阶曲线。0~1023表示10位色深。当 $D < 0.2$ 时,人就不能分辨出由极角变化导致的灰阶偏移;当 $D_A < 0.2$ 时,人眼不能分辨出由方位角变化导致的灰阶偏移。

色彩偏移指的是倾斜视角下,LCD的色坐标发生偏移的现象,它可以用色彩偏移量 Δuv ^[60]来评价,即

$$\Delta uv = \left[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

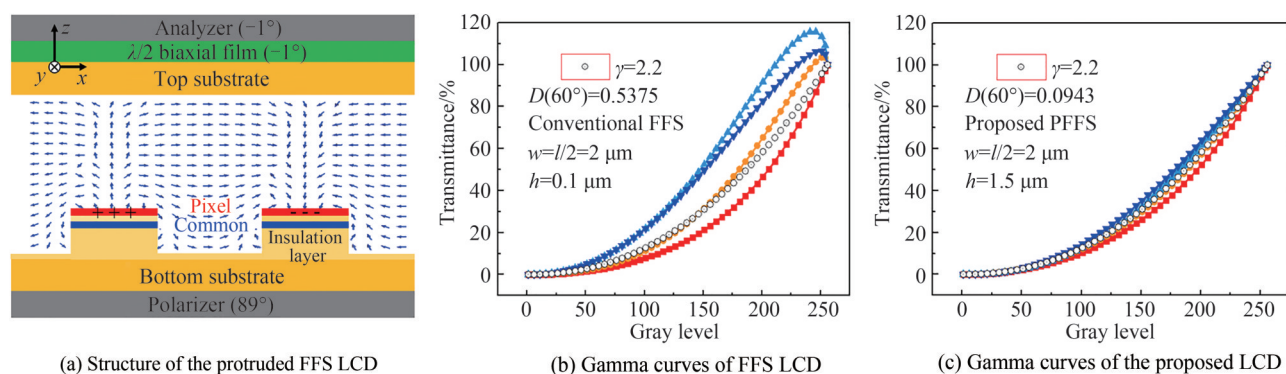
式中, (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 分别代表正视与倾斜视角下的色坐标,色坐标所围绕的面积就是显示器的实际色域。若 $\Delta uv < 0.02$,则人眼不能分辨出该视角下的色彩偏移。

事实上,LCD的色彩是由不同灰阶的三基色子像素混合而来的,能够降低灰阶偏移的方法同样也适合于降低色彩偏移。因此,本文将能够改善灰阶偏移与色彩偏移的相关方法一并进行讨论,这些方法主要包括使用光散射膜、优化电极结构、优化驱动技术等。

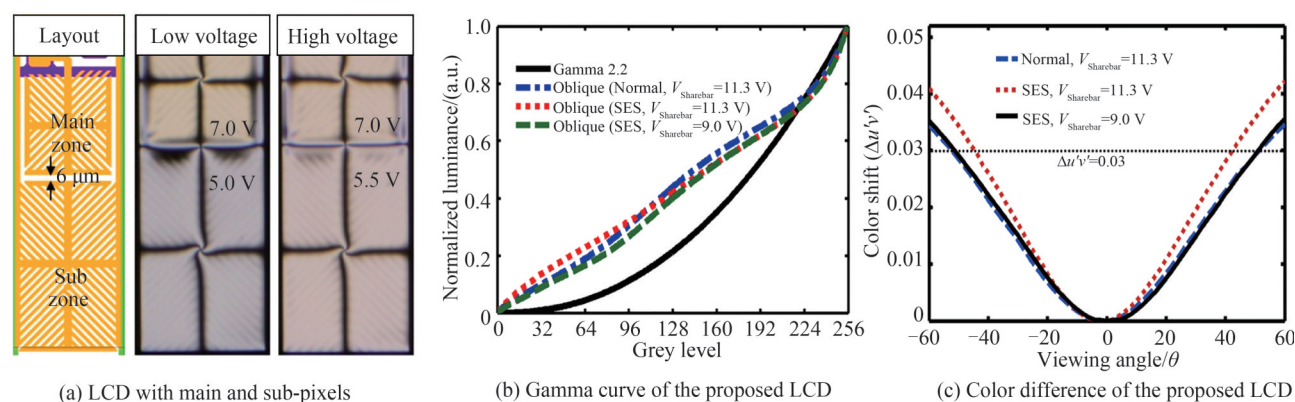
光散射膜是能够改善灰阶偏移和色彩偏移的方法。将光散射膜贴于LCD的外表面后,出射光将更加发散,各个视角下的光学性能也更加均匀,进而LCD的亮度、灰阶偏移、色彩偏移等性能将得到改善。一般地,为了精准地控制出射光的发散角,需要制备具有特定形貌的光散射膜,例如半球形、棱台形、三棱柱形等^[61-64]。这类光散射膜与普通的磨砂膜不同,需要根据具体视角需求来设计合适的微结构形貌和尺寸。光散射膜的优点为适用性强、操作简单、无需调整LCD的结构或液晶材料参数,它的缺点是损失透光率、降低分辨率等。

设计合适的电极结构也能够降低灰阶偏移与色彩偏移。一般地,多畴电极结构能够将不同视角下的电光特性进行互补混合,进而降低LCD的灰阶偏移,例如使用之字形、人字形、鱼骨形多畴电极结构^[65-72]。2020年,我们提出一种单畴凸起FFS LCD,证明了单畴电极结构也能达到低灰阶偏移的效果^[73]。如图8所示,该凸起FFS结构能够诱导出互补型液晶指向矢分布,使得大视角下的电光性能更加均匀,60°视角下的离轴图像失真指数仅为0.0943,实现了低灰阶偏移的目的。事实上,不论是多畴还是单畴电极结构,只要能够诱导出互补型液晶指向矢分布,均能降低灰阶偏移和色彩偏移^[74-76]。设计电极结构的优点是可以从根本上改善LCD的灰阶与色彩性能,但需要充分评估设计的可行性、工艺难度、LCD的综合性能等问题。

从驱动技术入手,也可以降低LCD的灰阶偏移与色彩偏移。2005年,KIM S S提出了主副像素驱动技术来降低LCD的灰阶偏移^[77],后来该方法成为了改善灰阶与色彩性能的常用方法^[78-82]。2021年,张盛东教授团队提出一种基于多畴电极结构的主副像素驱动技术^[83]。该LCD具有八畴电极结构,通过控制副像素上

图8 基于单畴电极结构的低灰阶偏移凸起FFS LCD^[73]Fig. 8 Low gamma shift protruded FFS LCD based on single-domain electrode structure^[73]

的驱动电压,可以将 60° 视角下的离轴图像失真指数降至0.2以下,色彩偏移量降至 ~ 0.04 ,如图9所示。此外,由于对TFT基板做了平坦化处理,所以该LCD还具有高透光率、高对比度等优点。2020年,我们提出一种能够实现低灰阶偏移的截断透光率技术^[84]。通过在电极上施加小于饱和电压的电压值,避免了倾斜视角下的灰阶反转,进而获得了较低的灰阶偏移和色彩偏移。截断透光率技术的操作简单、独立性强,适合于多种显示模式,但是缺点是会牺牲部分透光率。事实上,不论是主副像素驱动技术还是截断透光率技术,都可以与各种电极结构配合使用,从而达到相得益彰的效果。

图9 基于主副像素的低灰阶偏移和色彩偏移的LCD^[83]Fig. 9 Low gamma shift and color difference LCD based on main and sub-pixels^[83]

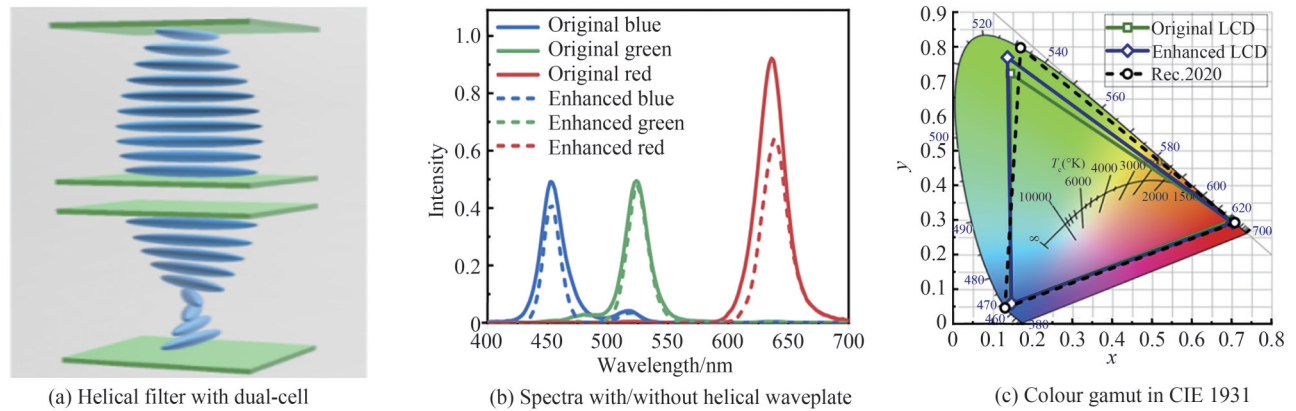
2.4 色域

色域指的是显示器能够表现的色彩范围,通常用三基色的色坐标在色度图中所占据的面积来量化。显示器的色域越宽,那么它能展现出的色彩范围就越广。对于LCD来说,倾斜视角下会存在色域变窄的现象,并且视角越大色域越窄。一般地,能够减小灰阶偏移、色彩偏移的方法都能在一定程度上改善色域变窄的问题。此外,研究人员还提出了一些能够提升LCD色域并改善其视角依赖性的方法,例如使用具有窄带宽的背光源、宽波段滤波片等。

使用具有窄带宽的背光源是实现宽色域LCD的重要途径。显示器的色域依赖于红、绿、蓝三基色的色坐标,所以三基色的半峰宽越窄,色彩就越纯净,对应的色域就越宽^[85]。因此,将传统的背光源换成窄带宽的背光源能够显著增宽LCD的色域,例如使用量子点背光源、激光背光源、三基色LED背光源等^[86-90]。除此之外,研究人员还会在背光源处或LCD外表面贴合具有一定发散角的散射膜,以此来改善倾斜视角下的色域变窄问题。

使用宽波段滤波片是提高LCD色域并改善其视角依赖性的有效方法。2021年,孙玉宝教授团队提出了一种双盒宽波段滤波片,它由两个叠加在一起的扭曲型液晶盒构成^[91]。将该滤波片置于平行偏光片之间时,背光光谱的半峰宽变得更窄,LCD的色域可以从86%提升到94%(Rec.2020标准),相关结果在图10中

展示。此外,该滤波片的延迟量几乎不依赖于入射角,60°视角下最大延迟量的偏移仅为-0.311%,因此在倾斜视角下依然具有良好的滤波特性。宽波段滤波片能够有效缩减光谱的半峰宽度,进而可以增加LCD色域^[92-94],但是它也存在一些缺点,例如白光漂移、透光率降低、器件厚度增加等。

图10 基于双盒滤波片的高色域LCD^[91]Fig. 10 High color gamut LCD based on the dual-cell helical filter^[91]

3 特殊视角控制技术

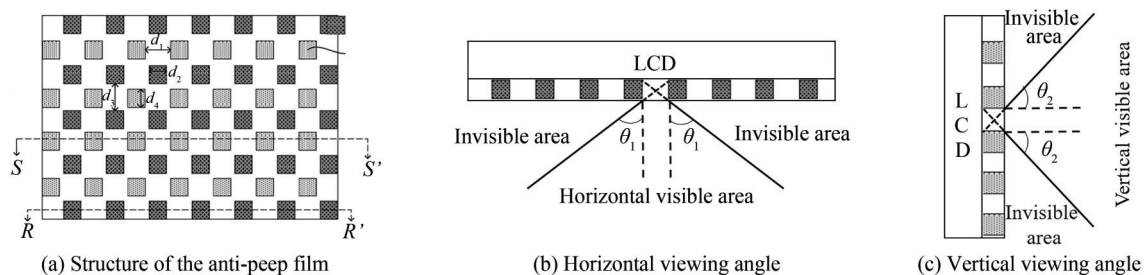
宽视角(Wide Viewing Angle, WVA)指的是LCD在一个较大的视角范围内具有良好的画面质量,包括亮度、对比度、灰阶、色彩、色域等性能。目前,宽视角技术已经被广泛地应用于多种显示场景,涵盖了大中小尺寸的各类显示领域。但是,宽视角技术不能满足一些特殊的应用场景,例如有防窥需求的商务手机、银行自动柜员机、密码器、航空显示等。为了满足上述场景的需求,研究人员提出了一些特殊的视角控制技术,如窄视角、指定视角、视角可控等技术。

3.1 窄视角技术

窄视角(Narrow Viewing Angle, NVA)指的是LCD仅在一个较窄的视角范围内有良好的画面质量。在一些使用场景中,观看者需要让自己看清画面信息,但又要避免近邻偷窥或被动监视,此时就需要窄视角技术。下面将介绍两种常用的窄视角技术:遮光型防窥膜、视角补偿膜。

遮光型防窥膜是能够实现窄视角显示的一种光学结构。2021年,陈霞等提出了一种二维防窥膜,如果将该防窥膜贴合显示器表面,则可以实现不同方位角下的窄视角控制技术^[95]。该防窥膜在一维超细百叶窗的基础上,使用了纵横交替的二维遮光矩阵,其结构在图11中展示。在水平方向上,光线仅能从两个遮光区域的间隙透过,所以存在水平可视区和不可视区。类似地,在竖直方向上,光线也仅能从两个遮光区域的间隙透过,所以存在竖直可视区和不可视区。当遮光区域在平面内交替出现时,从LCD出射的光线只能在一个较小的视角范围内被观看到,因此显示器就实现了窄视角特性。遮光型防窥膜的优点为独立性强、适用性广,但是防窥膜的遮光区域会损失一定的透光率。

除了遮光型防窥膜之外,视角补偿膜也是实现窄视角显示的重要技术方法^[96-97]。2016年,孙玉宝教授团队提出了一种基于+a/-c/-a补偿膜的窄视角蓝相LCD^[98],相关成果如图12所示。该LCD具有凸起型电

图11 具有窄视角特性的二维防窥膜^[95]Fig. 11 Two-dimensional anti-peep film for narrow viewing angle^[95]

极结构,所以在水平方向上形成了周期性的透光率分布。在液晶盒两侧添加+a与-c/-a补偿膜后,倾斜视角下将出现不同程度的暗态漏光,且暗态漏光程度与视角正相关。研究表明,该LCD具有良好的窄视角特性,且具有均匀的对比度分布。当视角大于 30° 时,对比度低于10:1,画面信息不可读; 30° 视角范围内的对比度高于10:1,画面信息基本可读; 10° 视角范围内的对比度高于1000:1,画面质量较好。需要注意的是,视角补偿膜通常与偏光片复合在一起形成补偿型偏光片,所以该LCD只能在窄视角显示场景中使用,例如银行自动柜员机、密码器、保密计算机等显示领域。

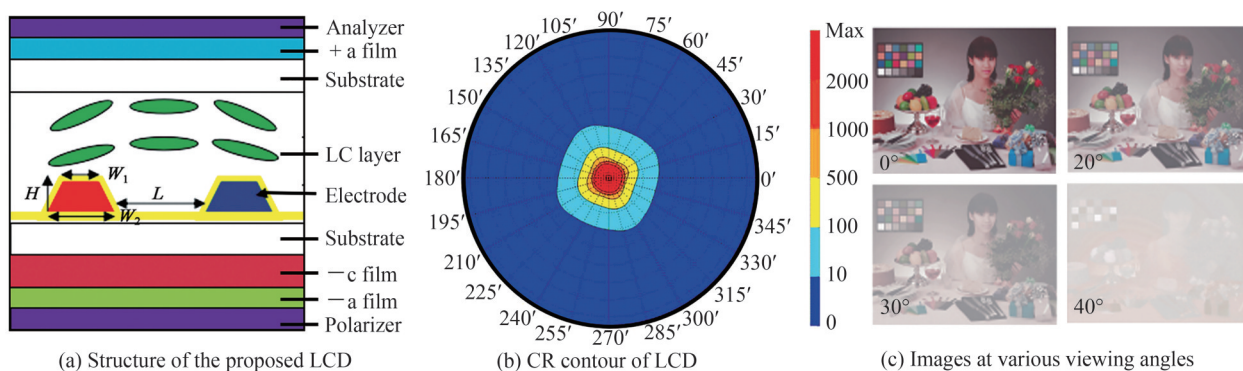


图12 基于+a/-c/-a补偿膜的窄视角蓝相LCD^[98]

Fig. 12 Narrow viewing angle blue-phase LCD based on +a/-c/-a compensation film^[98]

3.2 指定视角技术

窄视角技术通常能够保证正视下或较小视角内的图像质量,但是在一些特殊的应用场景中,需要让LCD在某个特定的视角下具有最佳的图像质量。例如,在航空显示或车载显示领域,应当保证驾驶员所在的位置具有最佳的图像质量,但是又要兼顾显示器的预留位置,此时就需要指定视角技术^[99]。

一般地,指定视角技术大多是通过视角偏转光学薄膜来实现的^[100-101]。2021年,吕国强教授团队提出了一种三棱柱形状的视角偏转膜^[102],其中有有机基底的厚度为 $190\ \mu\text{m}$,三棱柱的周期为 $\sim 25\ \mu\text{m}$,高为 $\sim 15\ \mu\text{m}$,相关结果在图13中展示。测试结果表明,在添加视角偏转膜前后,LCD的最佳视角发生了偏移,亮度峰值由 0° 视角偏转到 -16° 视角,且偏转后视角曲线未发生明显失真。视角偏转光学结构可以加工成膜后贴合在显示器表面,所以它的优点为独立性强、适用性广。但是,视角偏转膜会损失一定透光率,且偏转角度一旦确定就不可再次调节。在实际应用中,需要结合客户的具体视角需求,来定制合适的视角偏转膜。

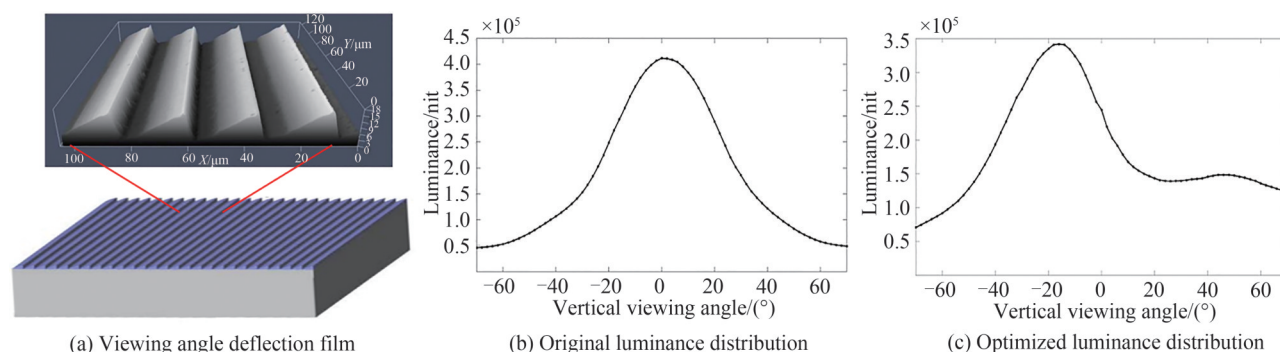


图13 基于视角偏转膜的指定视角技术^[102]

Fig. 13 Specified viewing angle control technology based on viewing angle deflection film^[102]

3.3 视角可控技术

除了窄视角和指定视角的需求之外,部分消费者还需要让LCD同时具备宽、窄两种视角特性^[103-104]。例如,某些时候需要让平板电脑或手机处于宽视角模式,以便与他人不同视角下共同分享画面信息;而某些时候需要让其处于窄视角模式,以保护画面信息的私密性。为了满足不同场景下的使用需求,需要让LCD在宽视角与窄视角之间自由切换,实现对视角的动态控制。在此背景下,研究人员提出了一些能够控制

LCD 视角的方法,例如双像素结构、双盒结构、偏压电极法等。

双像素结构是将子像素再分成主像素和副像素,其中占据较大面积的主像素用于显示画面,占据较小面积的副像素用于控制视角^[105-106]。2010年,LEE S H与WU S T教授团队提出了一种视角可控的双像素结构,其中主像素采用叉指型电极结构,副像素采用上下电极结构,液晶盒中填充聚合物稳定蓝相液晶^[107],相关结果在图 14 中展示。研究表明,仅当主像素工作时,该 LCD 具有宽视角特性,此时 50° 视角下仅存在较小的色彩偏移,40° 视角内具有良好的画面质量。为副像素施加一定的电压后,会诱导出一定程度的暗态漏光,此时 LCD 在较窄的视角内仍具有良好的画面质量,但 40° 视角之外的区域不再可读。这种方法适用于多种显示模式,且无须额外的光学结构,但是双像素结构需要设计双 TFT 驱动电路来分别驱动主像素和副像素。

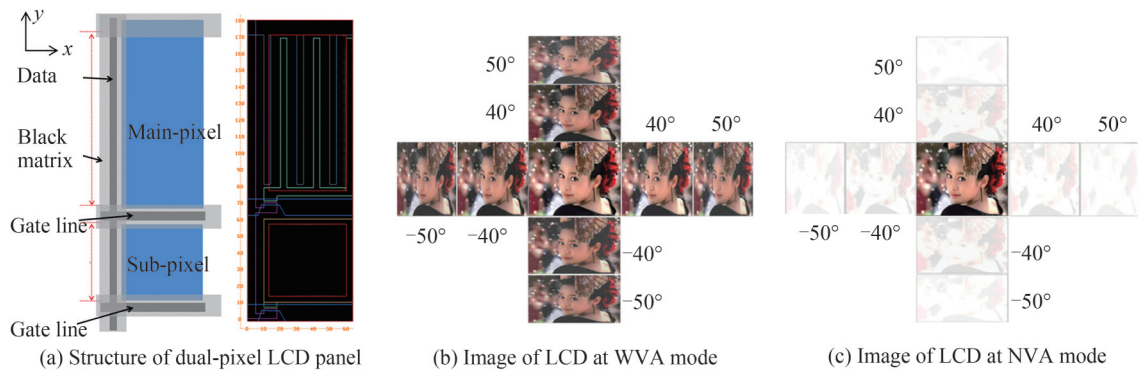


图 14 基于双像素结构的视角可控 LCD^[107]

Fig. 14 Viewing angle controllable technology based on dual-pixel structure^[107]

双盒结构是在现有的 LCD 中叠加新的液晶盒,其中原有的液晶盒用于显示画面,新添加的液晶盒用于控制视角。2009年,KIM J C 教授团队提出了一种基于宾主型液晶盒的双盒液晶结构,来实现对 LCD 视角的控制^[108],如图 15(a)~(c)所示。未施加电压时,宾主型液晶盒中的二色性染料将吸收沿着吸光轴方向的偏振光,此时 LCD 处于窄视角模式。为宾主型液晶盒施加合适的电压后,二色性染料的吸光轴与周围的液晶分子均趋于电场方向排列,染料对光的吸收作用最弱且几乎不区分方向,此时 LCD 切换为宽视角模式。

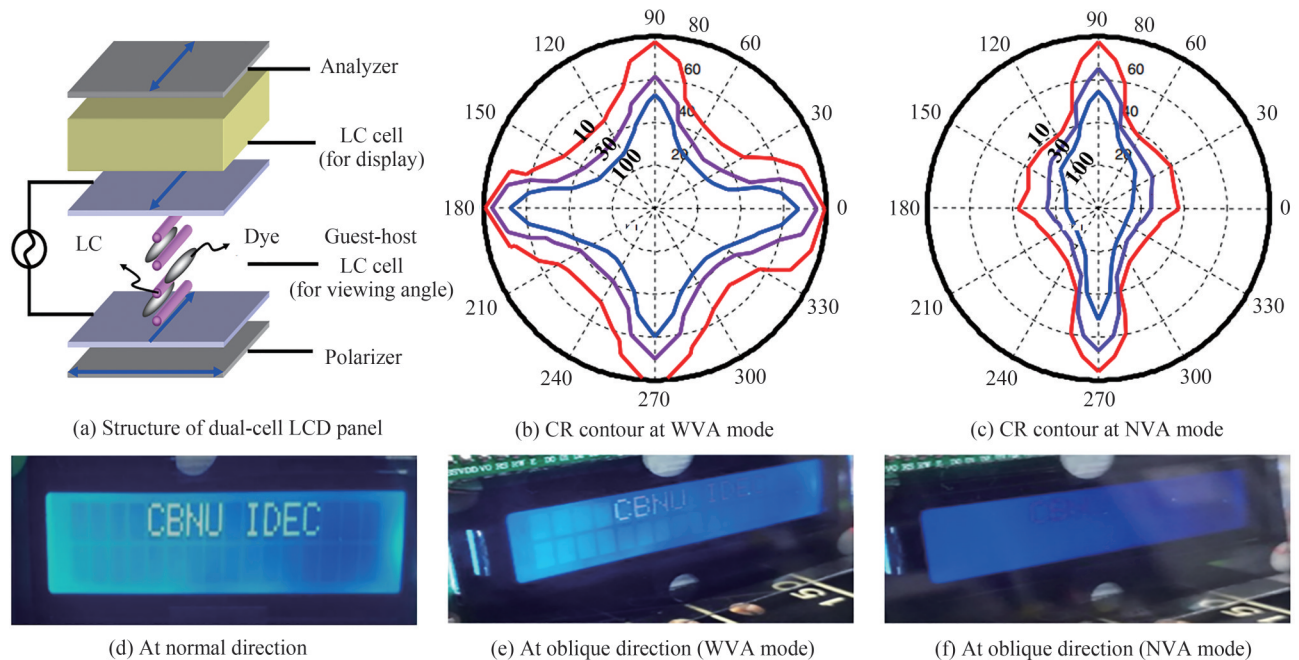


图 15 基于双盒结构的视角可控技术^[108-109]

Fig. 15 Viewing angle controllable technology based on dual-cell structure^[108-109]

2019年,LEE J H教授团队对该设计进行了实验验证,当使用质量分数为5%的二色性染料液晶盒后,中等灰阶下水平视角的可控范围为 30° 左右^[109],如图15(d)~(f)所示。类似地,向LCD中添加向列相液晶盒、蓝相液晶盒、聚合物液晶盒所形成的双盒结构,均能构成视角可控的LCD^[110-113]。需要注意的是,这种方法的缺点是增加LCD的整体厚度、损失透光率,需要两套独立的驱动电路。

电极偏压法是在原有的液晶盒中引入公共电极,通过控制公共电极的偏置电压,来调节LCD的暗态漏光程度,从而实现对视角的控制^[114]。2013年,王琼华教授团队提出了一种基于偏压电极法的视角连续可控技术,所提出的液晶盒中设计了上公共电极^[115],相关成果如图16所示。当上公共电极无偏置电压时,该LCD处于宽视角模式,此时 60° 视角内的对比度均高于10:1, 20° 视角内的对比度高于1000:1。为上公共电极施加合适的偏置电压后,该LCD切换为窄视角模式。结果显示,在窄视角模式下,对比度高于10:1的范围缩小至 40° 视角内。通过调整偏置电压,还可以扩大或缩小窄视角所在的范围。类似地,通过向VA、FFS等多种显示模式中添加公共电极,并适当调节公共电极上的偏置电压,均能实现对视角的控制^[116-120]。双像素结构、双盒结构、偏压电极法均能实现视角切换功能,也都无需特殊的视角控制膜或光学补偿膜。但是,它们存在以下共性问题:损失一定的透光率,需要重新设计和加工电极结构,需要增加驱动电路。

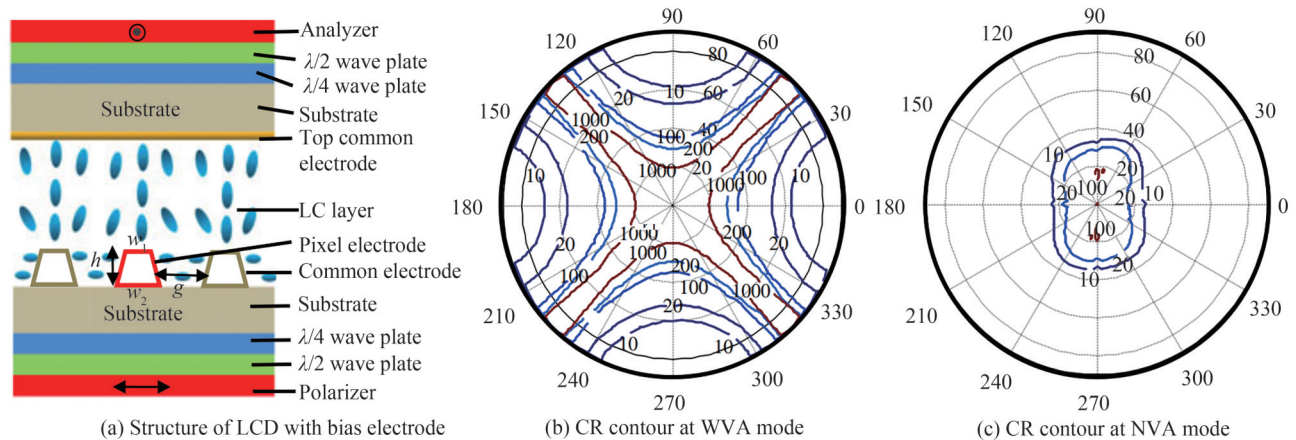


图16 基于电极偏压法的视角可控LCD^[115]

Fig. 16 Viewing angle controllable technology based on electrode bias method^[115]

4 总结与展望

本文总结了LCD的视角相关性能和视角控制技术的研究进展。首先,介绍了LCD的基本结构和显示原理,阐述了四种常见的液晶显示模式,包括TN、VA、IPS、FFS显示模式。其后,介绍了几种与视角相关的性能参数,包括亮度、对比度、灰阶与色彩、色域。针对这些性能参数,综述了几种有代表性的改善方法,并分析了不同方法的优缺点。最后,归纳了几种特殊的视角控制技术,包括窄视角、指定视角、视角可控等技术。限于篇幅,不能详尽叙述各种视角相关性能的研究工作,因此只对部分有代表性的研究进行了综述。

事实上,LCD的性能参数较多,其中部分性能参数还具有联动性,它们之间相互影响,甚至可能存在制约关系。在市场竞争的驱动下,消费者越来越重视显示器的综合性能,所以不能单纯地为了提升某个性能参数,而牺牲其他的性能参数。在此背景下,如何实现“多参数联动优化”成为改善LCD性能的重要任务,这也给未来的研究工作提出了巨大的挑战。此外,相关研究人员应当结合具体需求,充分评估不同技术方法的优缺点,选择合适的技术方案来解决LCD的瓶颈问题。

目前,显示技术呈现出百花齐放的发展态势。由于不同的显示技术适合于不同的应用场景,所以未来一段时间将继续保持多种显示技术并存的状态。LCD是能满足大中小尺寸显示需求的重要显示技术,基于Mini LED背光和区域调光的LCD具有百万级的动态对比度、2000 nits的峰值亮度、超高的色域等优点,整体显示性能优越,它也在2021年迎来了规模化商用显示的元年,是未来重要的液晶显示技术。本文介绍的部分技术方法可以在Mini LED LCD上得到应用,以进一步提升其视角相关性能。

参考文献

- [1] ZHENG Z, HU H, ZHANG Z, et al. Digital photoprogramming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 226-234.
- [2] YIN K, HSIANG E L, ZOU J, et al. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 161.
- [3] CHEN P, MA L L, HU W, et al. Chirality invertible superstructure mediated active planar optics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2518.
- [4] JIA H. Who will win the future of display technologies[J]. *National Science Review*, 2018, 5(3): 427-431.
- [5] YAN Ziwen, YAN Qun, LI Dianlun, et al. Research progress of high integration density μ LED display technology [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1309-1317.
严子雯, 严群, 李典伦, 等. 高度集成的 μ LED显示技术研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1309-1317.
- [6] WANG Yukun, ZHENG Zhongming, LONG Hao, et al. Development and challenges of nitride vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251203.
王玉坤, 郑重明, 龙浩, 等. 氮化物垂直腔面发射激光器的发展与挑战[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251203.
- [7] HSIANG E L, YANG Z, YANG Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(6): 446-465.
- [8] LEE S C, KIM T, PARK W S. Liquid crystal displays with variable viewing angles using electric-field-driven liquid crystal lenses as diffusers[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 667.
- [9] ZHONG Dezhen, LIU Rui, JIANG Limei. Viewing angle controllable liquid crystal display technology with micro structure [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 687-693.
钟德镇, 刘瑞, 姜丽梅. 微结构用于视角可控的液晶显示技术[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(5): 687-693.
- [10] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of liquid crystal devices*[M]. 2nd edition. USA: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [11] KHOO I C. *Liquid crystals*[M]. 3rd edition. USA: John Wiley & Sons Ltd, 2022.
- [12] 廖燕平, 宋勇志, 邵喜斌, 等. 薄膜晶体管液晶显示器显示原理与设计[M]. 中国: 电子工业出版社, 2016.
- [13] 范志新. 液晶器件工艺基础[M]. 中国: 北京邮电大学出版社, 2000.
- [14] GE Z, WU S T. *Transflective liquid crystal displays*[M]. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2010.
- [15] 马群刚. TFT-LCD原理与设计[M]. 中国: 电子工业出版社, 2011.
- [16] SCHADT M, HELFRICH W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(4): 127-128.
- [17] SCHIEKEL M F, FAHRENSCHON K. Deformation of nematic liquid crystals with vertical orientation in electrical fields [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(10): 391-393.
- [18] OHMURO K, KATAOKA S, SASAKI T, et al. Development of super-high image quality vertical alignment mode LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 1997, 28(1): 845-848.
- [19] TAKEDA A, KATAOKA S, SASAKI T, et al. 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.
- [20] KIM K H, LEE K H, PARK S B, et al. Domain divided vertical alignment mode with optimized fringe field effect[C]. 18th International Display Research Conference (Asia Display), 1998, 98: 383-386.
- [21] KIM S S. The world's largest (82-in) TFT LCD[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1842-1847.
- [22] 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.
- [23] SOREF R A. Transverse field effects in nematic liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 22(4): 165-166.
- [24] 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.
- [25] LEE S H, LEE S L, KIM H I. 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.
- [26] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: Present status and future viewing angles[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 17168.
- [27] GUO Yuqiang, SUN Yubao. Progress in improving the gray scale image quality of LCD under the large viewing angle[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 710-724.
郭玉强, 孙玉宝. 改善大视角下LCD灰阶图像质量的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(7): 710-724.
- [28] Flagship OLED and LCD TV display technology shoot-out[EB/OL]. [2022-06-01]. http://www.displaymate.com/TV_OLED_LCD_ShootOut_1.htm
- [29] KÄLÄNTÄR K. A directional backlight with narrow angular luminance distribution for widening the viewing angle for an LCD with a front-surface light-scattering film[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(3): 133-1142.

- [30] CHEN H, ZHU R, KÄLÄNTÄR K, et al. Quantum dot-enhanced LCDs with wide color gamut and broad angular luminance distribution[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 1413-1416.
- [31] YANG J P, HSIANG E L, CHEN H M P. Wide viewing angle TN LCD enhanced by printed quantum-dots film[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 21-24.
- [32] 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.
- [33] KO Y H, PRABHAKARAN P, CHOI S, et al. Environmentally friendly quantum-dot color filters for ultra-high-definition liquid crystal displays[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 15817.
- [34] KO Y H, JALALAH M, LEE S J, et al. Super ultra-high resolution liquid-crystal-display using perovskite quantum-dot functional color-filters[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12881.
- [35] ZHU X, GE Z, WU S T. Analytical solutions for uniaxial film-compensated wide-view liquid crystal displays[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(1): 2-20.
- [36] SAITOH Y, KIMURA S, KUSAFUKA K, et al. Optimum film compensation of viewing angle of contrast in in-plane-switching-mode liquid crystal display[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1998, 37(9A): 4822-4828.
- [37] ANDERSON J E, BOS P J. Methods and concerns of compensating in-plane switching liquid crystal displays [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(11): 6388-6392.
- [38] CHU F, TIAN L L, DOU H, et al. Simulation study of single-cell-gap transreflective liquid crystal display with nonuniform potential[J]. Journal Society for Information Display, 2020, 28(2): 148-156.
- [39] CHEN J, KIM K H, JYU J J, et al. Optimum film compensation modes for TN and VA LCDs[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 1998, 29(1): 315-318.
- [40] WANG Q H, CHU F, DOU H, et al. A single-cell-gap transreflective liquid crystal display with a vertically aligned cell [J]. Liquid Crystals, 2019, 46(8): 1183-1190.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] CHO H, KWON O K. A local dimming algorithm for low power LCD TVs using edge-type LED backlight[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2054-2060.
- [44] TAN G, HUANG Y, LI M C, et al. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [45] GUAN E, CHENG X, ZHANG X, et al. A novel pixel-level local dimming backlight system for HDR display based on Mini-LED[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 48(1): 231-234.
- [46] HU D, XIAO J, XU H, et al. AM MiniLED local dimming backlight achieving high dynamic contrast for 8K displays[C]. International Conference on Display Technology, 2020, 52(S1): 290-291.
- [47] GAO Z, NING H, YAO R, et al. Mini-LED backlight technology progress for liquid crystal display[J]. Crystals, 2022, 12(3): 313.
- [48] JI Honglei, CHEN Naijun, WANG Daiqing, et al. Development and challenges in application of Mini-LED backlight technology in TV products[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(7): 983-992.
季洪雷, 陈乃军, 王代青. Mini-LED 背光技术在电视产品应用中的进展和挑战[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 983-992.
- [49] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.
- [50] CHEN H, ZHU R, 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.
- [51] XI Y, SUN Y, SHI T, et al. A high precision and high contrast algorithm based on dual-cell LCDs[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 48(1): 1960-1962.
- [52] CHEN H, TAN G, WU S T. Ambient contrast ratio of LCDs and OLED displays[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33643-33656.
- [53] SINGHA R, UNNI K N N, SOLANKI A, et al. Improving the contrast ratio of OLED displays: An analysis of various techniques[J]. Optical Materials, 2012, 34(4): 716-723.
- [54] NAVARRO-BAENA I, JACOBO-MARTÍN A, HERNÁNDEZ J J, et al. Single-imprint moth-eye anti-reflective and self-cleaning film with enhanced resistance[J]. Nanoscale, 2018, 10(33): 15496-15504.
- [55] BURGHORN M, ROOSEN-MELSEN D, RIET J, et al. Single layer broadband anti-reflective coatings for plastic substrates produced by full wafer and roll-to-roll step-and-flash nano-imprint lithography[J]. Materials, 2013, 6(9): 3710-3726.

- [56] SHEN L, DU H, YANG J, et al. Optimized broad band and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with moth-eye structures by low cost replica molding[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 325: 100-104.
- [57] CONTRACTOR R, D'AGUANNO G, MENYUK C. Ultra-broadband, polarization-independent, wide-angle absorption in impedance-matched metamaterials with anti-reflective moth-eye surfaces[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24031-24043.
- [58] 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.
- [59] GUO Y, WANG Y, 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.
- [60] LU R, HONG Q, GE Z, et al. Color shift reduction of a multi-domain IPS-LCD using RGB-LED backlight[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6243-6252.
- [61] 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.
- [62] GAO Y, LUO Z, ZHU R, et al. A high performance single domain LCD with wide luminance distribution[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(4): 315-324.
- [63] 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.
- [64] YAN J, XU D, 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.
- [65] RAO L, GE Z, WU S T, et al. Zigzag electrodes for suppressing the colour shift of Kerr effect-based liquid crystal displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(4): 115-120.
- [66] 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.
- [67] LEE G S, KIM J C, YOON T H, et al. Electrode structure for colour shift reduction in fringe-field switching mode[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5405-5415.
- [68] GUO Y, LI X, 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.
- [69] LU R, WU S T, GE Z, 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.
- [70] GE Z, 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.
- [71] GUO Y, WANG Y, ZHANG C, et al. Blue-phase liquid crystal display with insulating protrusion[J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(11): 1585-1593.
- [72] 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.
- [73] GUO Y, LI X, LI W, 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.
- [74] GUO Y, LI X, MU Q, et al. Single electro-optic curve for RGB colours in blue-phase liquid crystal display[J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(6): 835-845.
- [75] LAN S, CHEN X, WEI H, et al. Self-alignment of liquid crystal for multi-domain liquid-crystal display [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 453-454.
- [76] GUO Y, LI X, YANG Y, et al. Low-gamma shift asymmetrical double-side blue-phase liquid crystal display[J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 199-210.
- [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] 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.
- [79] 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.
- [80] MUN B J, JIN T Y, LEE G D, et al. Optical approach to improve the gamma curve in a vertical-alignment liquid-crystal cell[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 799-801.
- [81] 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.
- [82] 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.

- [83] XIAO J, LIU J, UM Y, et al. High-transmittance vertical-alignment liquid crystal display with subpixel electrode shielding electric field design[J]. *Displays*, 2021, 68: 102004.
- [84] 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.
- [85] 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: e17043.
- [86] KANG H, LEE K N, UNITHRATTIL S, et al. Narrow-band SrMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺, Mn²⁺ green phosphors for wide-color-gamut backlight for LCD displays[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(31): 19516-19524.
- [87] XIE R J, HIROSAKI N, TAKEDA T. Wide color gamut backlight for liquid crystal displays using three-band phosphor-converted white light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Express*, 2009, 2(2): 022401.
- [88] KOMURA S, OKUDA K, ONODA K, et al. Seventeen-inch laser backlight in-plane switching liquid crystal display with 8K, 120-Hz driving, and BT.2020 color gamut[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(1): 17-28.
- [89] DAVID W, CHEN H, WU S T. Wide-color-gamut LCDs with vivid color LED technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 47(1): 992-995.
- [90] KANG Y, SONG Z, JIANG X, et al. Quantum dots for wide color gamut displays from photoluminescence to electroluminescence[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 154.
- [91] ZHANG C, NIU R, SHA P, et al. Inner helical waveplate with angle-insensitive retardation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28924-28934.
- [92] NIU R, ZHANG C, LI X, et al. Wide viewing angle polarization interference filter using double liquid crystal layers with opposite twisted direction[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40310-40322.
- [93] SUN Y, ZHANG C, YANG Y, et al. Improving the color gamut of a liquid-crystal display by using a bandpass filter[J]. *Current Optics and Photonics*, 2019, 3(6): 590-596.
- [94] ZHANG C, NIU R, LI X, et al. Twisted nematic liquid crystal polymer-based multi-layer composite polarizer with low azimuthal transmittance variation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43720-43730.
- [95] 陈霞, 池彦菲, 鲁俊祥, 等. 防窥膜及显示装置: 中国, CN110161677B[P]. 20210525.
- [96] SUN Y, ZHANG Z, MA H. Novel mode of liquid crystal display with narrow viewing angle [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(6A): 3878-3879.
- [97] RYU J W, LIM Y J, JEONG Y H, et al. A fringe-field driven hybrid aligned nematic liquid crystal display for narrow viewing angle display[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(9A): 5951-5953.
- [98] LIU Jianlong, MA Hongmei, SUN Yubao. Blue phase liquid crystal display for narrow viewing angle[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9): 847-852.
刘建龙, 马红梅, 孙玉宝. 窄视角蓝相液晶显示器[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(9): 847-852.
- [99] KIM J, LEE D H, LEE J H, et al. Optimization of the display viewing angle for automotive application[J]. *Journal of Information Display*, 2022, 23(1): 87-95.
- [100] CHEN B T, PAN J W. High-efficiency directional backlight design for an automotive display[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4386-4395.
- [101] FENG Qibin, YIN Huijuan, CHENG Xin, et al. Design of optical film with microstructure for viewing angle deflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1009-1014.
冯奇斌, 尹慧娟, 程鑫, 等. 用于视角偏转的光学膜表面微结构设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1009-1014.
- [102] FENG Qibin, LI Dehua, XIAO Huili, et al. Surface microstructure design of viewing angle deflection film based on extended light source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1329-1336.
冯奇斌, 李德华, 肖慧丽, 等. 基于扩展光源的视角偏转膜表面微结构设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1329-1336.
- [103] JEONG E, CHIN M H, LIM Y J, et al. Switching of off-axis viewing quality in twisted nematic liquid crystal display by controlling phase retardation of additional liquid crystal layers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(3): 033108.
- [104] GWAG J S, LEE Y J, KIM M E, et al. Viewing angle control mode using nematic bistability [J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2663-2669.
- [105] LIM Y J, KIM J H, HER J H, et al. Viewing angle controllable liquid crystal display with high transmittance[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6824-6830.
- [106] ZHONG Dezhen, LIU Xianhe, JIANG Limei. Four-ways viewing angle switchable liquid crystal display technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1278-1283.
钟德镇, 刘显贺, 姜丽梅. 四向宽窄视角可切换的液晶显示技术[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(12): 1278-1283.
- [107] KIM M S, LIM Y J, YOON S, et al. A controllable viewing angle LCD with an optically isotropic liquid crystal[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(14): 145502.

- [108] CHEN C P, KIM K H, YOON T H, et al. A viewing angle switching panel using guest–host liquid crystal[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(6): 062401.
- [109] CHOI H J, LEE H, LIM S, et al. Dependence of the viewing angle control property of a guest–host liquid crystal cell on the extinction coefficient of the mixture[J]. Applied Optics, 2019, 58(22): 6105–6111.
- [110] JEONG E, LIM Y J, RHEE J M, et al. Viewing angle switching of vertical alignment liquid crystal displays by controlling birefringence of homogeneously aligned liquid crystal layer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(5): 051116.
- [111] RAO L, GE Z, WU S T. Viewing angle controllable displays with a blue–phase liquid crystal cell[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 3143–3148.
- [112] HE Z, SHEN W, YU P, et al. Viewing–angle–switching film based on polymer dispersed liquid crystals for smart anti–peeping liquid crystal display[J]. Liquid Crystals, 2022, 49(1): 59–65.
- [113] DOU H, CHEN M, LI D, et al. A controllable viewing angle optical film using micro prisms filled with liquid crystal[J]. Liquid Crystals, 2021, 48(10): 1373–1381.
- [114] SUN Y, LI Y, ZHAO Y, et al. A low voltage and continuous viewing angle controllable blue phase liquid crystal display [J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(6): 484–487.
- [115] YUAN L, CUI J P, LI D H, et al. Viewing angle switchable blue–phase liquid crystal display with low voltage and high transmittance[J]. Journal of the Society for Information Display 2013, (12): 692–696.
- [116] LI P, SUN Y B, WANG Q H. A transfective and viewing angle controllable blue phase liquid crystal display[J]. Liquid Crystals, 2013, 40(8): 1024–1027.
- [117] YU Y, DOU H, MA H, et al. Continuous viewing angle controllable patterned vertical alignment liquid crystal display [J]. Liquid Crystals, 2014, 41(11): 1595–1599.
- [118] LIU L W, WANG Q H, CUI J P. A continuous viewing angle controllable liquid crystal display using a blue–phase liquid crystal[J]. Journal of the Society for Information Display, 2011, 19(8): 547–550.
- [119] CHU F, DOU H, TIAN L L, et al. A simple transfective liquid crystal display with composite dielectric layer [J]. Liquid Crystals, 2019, 46(12): 1790–1798.
- [120] ZHU Mengqing, LU Jiangang. New viewing angle controllable with FFS–LCD[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(3): 182–187.
朱梦青, 陆建钢. 基于 FFS 架构实现宽窄视角切换[J]. 液晶与显示, 2018, 33(3): 182–187.

Research Progress on Viewing Angle–related Performance of Liquid Crystal Display (Invited)

GUO Yuqiang, WANG Qionghua

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: At present, Liquid Crystal Display (LCD) has become an important display technology, especially in the large–size display field. Since the liquid crystal is optically anisotropic materials, LCD has inherent viewing angle–related problems, which is increasingly becoming a bottleneck restricting its further development. In this case, LCD needs to constantly innovate to cope with the fierce competition with other display technologies and the increasing performance demands from consumers. In recent years, some technologies that can improve the LCD’s viewing angle problem have been proposed. In order to make the researchers quickly find out the relevant technical progress, we summarize some research on improving the viewing angle–related performance in recent years. This overview can be divided into the following three parts: LCD structure and display mode, the research progress of viewing angle–related performance, and special viewing angle control technology. 1) LCD structure and display mode. The basic structure and display principle of LCD are first introduced, and four common display modes, including twisted nematic, vertical alignment, in–plane switching, and fringe–field switching, are described in the order in which they were proposed. We then describe the spatial positions of the electrode structures and the initial liquid crystal orientation in the four display modes. Besides, the specific display principles of the different display modes are explained in detail. Then, the advantages and disadvantages of the different display modes and their suitable applicable fields are briefly introduced. As we know, the viewing angle problems of different display modes are different, and thus the corresponding improvement measures are also different.

2) Research progress of viewing angle-related performance. Among the many display performances, some performances have the dependence on viewing angle. Here, we introduce the properties related to viewing angle, such as brightness, contrast, grayscale, color, and color gamut. Representative improvement methods are pointed out at these performances, and the advantages and disadvantages of different methods are analyzed. In terms of brightness, several methods that can improve the brightness at the full viewing angle are introduced, such as high brightness backlight, narrow electrode technology, and field sequential color technology. We introduce the wide viewing angle compensation film, regional dimming technology, dual-cell display technology, and surface anti-reflection structure to improve the contrast. In terms of the grayscale and color performance, we introduce the use of light scattering films, single-domain and multi-domain electrode structures, and optimized driving methods to reduce the gamma shift and color difference. In addition, the methods to improve the color gamut of LCD are pointed out, such as high color gamut backlights and broadband optical filters. Each of the above methods has an important reference value for improving the viewing angle-related performance of LCD, but each approach focuses on a different viewing angle problem, and each method has its advantages and disadvantages. Therefore, researchers need to choose the appropriate methods to solve their specific problems. 3) Special viewing angle control technology. In some special application fields, the wide viewing angle technology is no longer applicable, such as business mobile phones, bank automated teller machines, ciphers, and aviation display that require privacy protection. In order to address the needs of the above fields, several special viewing angle control technologies are introduced, including narrow viewing angle, specified viewing angle, and viewing angle controllable technologies. In the aspect of narrow viewing angle technology, two commonly used methods of shading privacy film and viewing angle compensation film are introduced. In terms of the more special non-face-to-view display field, the specified viewing angle display technology based on the viewing angle deflection film is introduced. Besides, several viewing angle controllable technologies are introduced, such as dual-pixel structure, dual-cell device structure, electrode bias method. These methods can make LCD exhibit the viewing angle performance different from the common LCD with wide viewing angle, and they have the application value for some application fields with special viewing angle requirements. In different practical situations, relevant researchers should select out the appropriate technical solutions according to the actual needs, so as to solve the specific viewing angle problems in the design and manufacturing processes.

Due to the limited space of this overview, the research on the various viewing angle performances cannot be summed up in all. And thus, only some representative research works are reviewed. It should be noted that, in addition to the viewing angle-related performance introduced in this overview, LCD needs to be continuously optimized in terms of flexible display, reducing the motion picture response time, and reducing the power consumption, etc. Driven by market competition, consumers pay more attention to the comprehensive performances of display technology, thus we should not sacrifice other performances just to improve one performance of LCD. In fact, how to realize the “multi-parameter linkage optimization” has become an important task to improve the comprehensive performance of LCD, which also poses a greater challenge to future research works. At present, LCD is still a relatively important display technology. From the perspective of development trends, the overall display performance of LCD based on the Mini LED backlight and regional dimming is excellent. It has the advantages of a million-level dynamic contrast ratio, more than 2 000 nits peak brightness, and ultra-high color gamut. Therefore, Mini LED LCD is an important display technology in the future, the methods mentioned in the paper are also effective in improving the viewing angle-related performance of LCD.

Key words: Liquid crystal display; Viewing angle; Contrast ratio; Gamma shift; Color difference

OCIS Codes: 230.3720; 160.3710; 120.2040