

文章编号:1007-2780(2017)07-0512-06

基于浮置电极的高透过率蓝相液晶显示器件设计

刘一帆*

(索雷博光电科技(上海)有限公司, 上海 200331)

摘要:传统平面内扭转(In-Plane Switching, IPS)模式的聚合物稳定蓝相液晶显示器件由于死区(Dead Zone)的存在,导致了透光率较低的问题。通过引入浮置电极(Floating Electrodes),增强死区上方的横向电场强度,可以解决这一问题,提高蓝相液晶显示器件的总体透过率。引入浮置电极的蓝相液晶显示器件的电光特性由 Techwiz3D 程序仿真予以分析。我们定量计算了电极尺寸、工作波长和电极错位对电光特性的影响。仿真结果表明,引入浮置电极的 IPS 模式蓝相液晶显示器件的透过率提高了约 15%,对显示应用中常见的 3 种可见光波长(450 nm, 550 nm, 650 nm)的总体透过率都达到了约 90%。该新型器件结构能够显著提升蓝相液晶显示器件的透过率,使之在新一代显示技术发展和竞争过程中获得更大的优势地位。

关键词:浮置电极;蓝相液晶;凸状电极;高透过率

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20173207.0512

High transmittance blue phase liquid crystal display with floating electrodes

LIU Yi-fan*

(Thorlabs China, Shanghai 200331, China)

Abstract: Polymer-stabilized blue-phase liquid crystal display (PSBP LCD) driven by conventional in-plane-switching (IPS) electrodes suffers from low transmittance due to the existence of dead zones. A floating electrode is introduced to enhance the lateral electric field on dead zone areas, so as to improve the peak transmittance of BP LCD device. The electro-optical properties of floating electrode enhanced protrusive IPS blue-phase LCD is analyzed by Techwiz3D simulation. The impact of electrode dimension, operation wavelength and misalignment of floating electrodes is investigated quantitatively. Our simulation results indicate that floating electrode increases the transmittance by 15% and the overall transmittance reaches ~90% for all three visible wavelengths (450 nm, 550 nm, 650 nm) employed for display applications. This makes blue-phase LCD a more competitive candidate for next generation display technology.

Key words: floating electrode; blue phase liquid crystal; protrusion electrode; high transmittance

收稿日期:2017-02-03;修订日期:2017-04-02.

* 通信联系人, E-mail: yliu@thorlabs.com

1 引言

聚合物稳定蓝相液晶(Polymer-stabilized blue phase liquid crystal, PS-BPLC)技术常被视为在新一代信息显示系统和光电子器件的开发过程中发挥关键作用、具有重要价值的一项技术。相比传统的向列相液晶,聚合物稳定蓝相液晶具备更高的响应速度^[1-6]。因此,基于蓝相液晶技术的液晶显示器件可以媲美有机发光二极管(OLED)的图像刷新速率。蓝相液晶材料研究和器件设计上的进步已经使得其驱动电压需求得到了显著降低^[7-8]。通过与其他相关技术,如量子点背光技术相结合,也使得新一代蓝相液晶显示器件的色饱和度等指标可以达到甚至超过有机发光二极管的水平。高响应速度的蓝相液晶显示器件也可促进时序色彩(color sequential)显示技术,三维(3D)图像显示技术和虚拟现实(VR)技术的进步,从而提高图像显示的发光效率和显示效果,降低显示设备的功耗。

蓝相液晶显示器件需要与之相匹配的新型驱动电极结构设计,而目前已经提出的一些设计方案都各有利弊。例如竖直电场驱动模式(Vertical Field Switching, VFS)可以实现很高的透过率和很低的驱动电压。但它的可视角度范围偏小的问题仍然亟待解决^[9-10]。另一方面,基于凸状电极的IPS模式(Protrusive IPS)可以提供相对较低的驱动电压,也能够通过光学补偿膜的设计实现所需的宽视角或窄视角^[11-13]。但受限于每个电极上方的死区,该驱动模式下的蓝相液晶显示器件最大透光率仅限于约70%的水平。皱褶状电极结构也能实现较低的驱动电压和较高的透光率,但其生产工艺过于复杂,难以走向实用化和商用化^[14]。

本文中提出一种将凸状电极与浮置电极相结合的电极结构设计。以此实现更高的电场利用效率,减少了凸状电极上方的死区范围,提升了显示器件的最大透过率。仿真计算表明经过优化的浮置电极设计可以在不需要大幅提高驱动电压的前提下实现约90%的最大透过率,可以媲美典型的向列相液晶显示器件的最大透过率。

2 器件结构设计

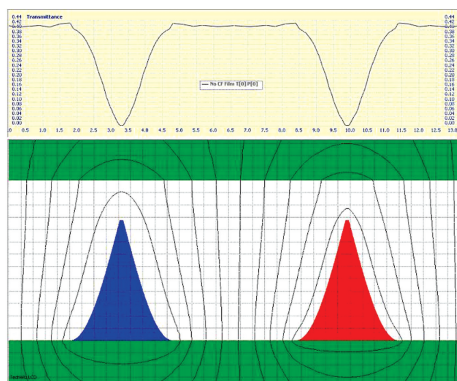
在IPS模式的蓝相液晶显示器件及其各种改进方案中,梳状电极之间建立的横向电场决定了蓝相液晶材料的场致双折射效应分布,以及由此产生的透射光相位延迟量和器件的透过率^[15-17]。然而,如前所述,每一个电极正上方的电场方向基本沿竖直方向分布,由此产生的场致双折射效应的光轴方向也沿同一个方向。因此,通过此处的透射光不会获得相对相位延迟量,经过垂直放置的检偏器后呈黑态。这个低透光区域就被称为“死区”,它降低了整个器件的平均透过率。为了减小死区范围,科研人员提出了双侧平面内扭转驱动模式^[16]。在液晶盒的上下两片基板上同时制作梳状电极结构。两基板上电极相互错位,上基板电极产生的横向电场分布恰好覆盖在下基板电极的死区上,反之亦然。通过这种设计,上下基板电极的死区相互补偿,提高了液晶盒的总体透过率。但这种设计的缺点在于需要在上下基板上分别制作薄膜晶体管(TFT)驱动电路。这不但增加了器件加工制作的成本,也降低了液晶像素中有效透光区域的占空比,牺牲了总体透过率。

尽管“双晶体管结构”比较复杂,但它指出的用上基板电极结构减少下基板电极死区的思路仍然是有意义的。问题在于,如何在不使用第二个TFT的前提下,减小死区范围,提高器件总体透过率。

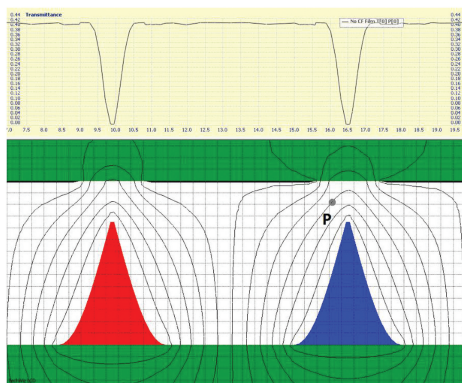
为解决这一问题,我们在此提出一种浮置电极设计。浮置电极并不需要接入任何特定的驱动电压信号。它的电位完全取决于周边电场分布。因此,浮置电极实际上相当于一个等电位导体,反过来影响和改变周围的电场分布。当下基板梳状电极被给定的电压信号驱动时,上基板浮置电极的电位也会随之改变。而这一变化并不依赖第二个TFT施加驱动信号。浮置电极生成的横向电场可以减少下基板电极上方的死区,提高整个像素的平均透过率。

图1给出了不带浮置电极(a)和带浮置电极(b)的IPS模式蓝相液晶显示器件的结构横截面对比,以及它们在相同电压驱动信号下的等电位线分布和透过率分布对比。这两种液晶显示器件的电光特性均由Techwiz程序仿真分析得出。

在图 1 中,白色代表蓝相液晶层,绿色代表上下基板,红蓝色块表示下基板上的凸状电极(横截面)。图 1(b)中的黑色粗水平线表示上基板上的浮置电极。



(a) 不含浮置电极的结构
(a) Without floating electrode



(b) 含有浮置电极的结构
(b) With floating electrode

图 1 蓝相液晶显示器件结构、等电位线分布仿真和透光率分布对比

Fig.1 Device structure, simulated equal-potential lines, and transmittance

如图 1(a)所示,每个凸状电极上方都有透过率降低的死区,而在图 1(b)中,浮置电极会影响电场分布,有效降低死区范围,总体透过率也相应提高。在仿真中,设定条件为所有凸状电极等间距分布,各凸状电极形状对称,且浮置电极距两侧的凸状电极距离相等。因此,浮置电极的电位为两侧凸状电极电位的中间值。在浮置电极和凸状电极之间的局部区域内,横向电场强度得到了加强,并进而导致了蓝相液晶的场致双折射率增高。所以,尽管凸状电极上方的液晶有效厚度有所减

小,该位置处的透过率仍然提高了。

浮置电极设计付出的代价之一是提高了驱动电压,这是因为理想导体表面的电场方向会垂直于导体表面,如图 1(b)中所示:浮置电极下方的等电位线被弯折到水平方向,即此处的电场方向为近乎竖直方向。这导致了同等驱动电压下,凸状电极之间空隙区域的相位延迟量减小。亦即需要更高的驱动电压来实现半波相位延迟和最大透过率。下一节将就此问题展开定量分析计算。

3 仿真计算结果与分析

本文对蓝相液晶的电光特性仿真基于扩展克尔模型(Extended Kerr Model)^[18]:

$$\Delta n_s = \Delta n_s \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_s} \right)^2 \right] \right), \quad (1)$$

其中: Δn_s 为饱和场致双折射率, E_s 为对应的饱和电场强度。计算中所用的上述参数数值为 JC-BP01M 材料的对应参数^[7],其具体数值如表 1 所列。

表 1 JC-BP01M 蓝相液晶光电响应特性参数

Tab.1 EO parameters of JC-BP01M material

波长/nm	Δn_s	$E_s/(V/\mu m)$
450	0.141	
550	0.154	4.15
650	0.169	

凸状电极的尺寸和液晶盒厚也对器件特性有所影响。考虑到器件加工工艺难度,本文中選擇下列参数进行仿真:液晶盒厚 $4 \mu m$,凸状电极宽度为 $3 \mu m$,高度为 $3 \mu m$ 。以下分别讨论几个主要设计参数对器件电光特性的影响。

3.1 凸状电极形状因素

在图 1 中,凸状电极使用了正弦曲线状的侧边形状。根据 Yoon 等人此前的研究和分析,不同形状的凸状电极可获得不同的透过率特性^[12]。作为对照,图 2 中展示了同样的凸状电极 IPS 模式的蓝相液晶器件,只是将凸状电极形状改为椭圆形。

仿真计算表明,同样达到最大透过率对应的驱动电压时,在图 2 中凸状电极顶端附近的 P 点位置,横向电场强度仅相当于图 1(b)中凸状电极上方同一 P 点处横向电场强度的约 50%。除此以外,比较图 2 和图 1(b)中同样的 P 点位置,图

2 中 P 点处的蓝相液晶层厚度明显小于图 1 中的 P 点位置液晶厚度。故图 1 中 P 点的相位延迟量更大,透光率更高。由上面的仿真结果可知,较陡峭的凸状电极侧边,例如正弦曲线形状,有助于获得较高的透过率。

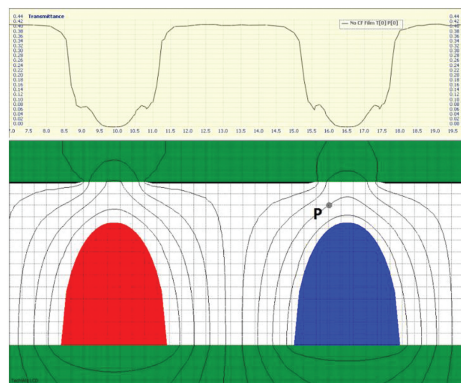


图 2 椭圆状侧边的凸状电极配合浮置电极的结构,等电位线和透光率仿真

Fig.2 Device structure, simulated equal-potential lines, and transmittance of elliptical protrusion with floating electrodes.

3.2 器件尺寸因素

我们首先考察凸状电极之间的间距(G)和浮置电极宽度(W)对透光率的影响。图 3 中画出了仿真计算所得的液晶像素驱动电压-透光率(Voltage-Transmittance, V-T)曲线,其中所用波长为 550 nm。在图 3 中,所有黑色曲线代表 $G=2.4 \mu\text{m}$ 的情况,蓝线代表 $G=3.6 \mu\text{m}$,而红线对应 $G=4.8 \mu\text{m}$ 。曲线的线型表示浮置电极的尺寸。实线表示没有浮置电极的参考状况。虚线表示浮置电极宽 $W=2.4 \mu\text{m}$ 。点划线代表 $W=3.6 \mu\text{m}$,而点状线表示 $W=4.8 \mu\text{m}$ 。

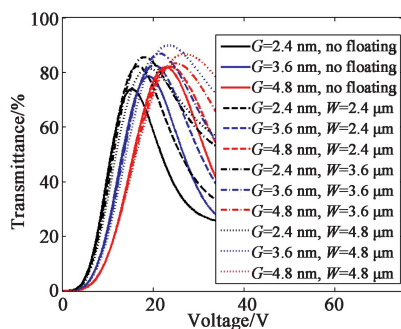


图 3 不同电极尺寸对应的电压透光率曲线

Fig.3 V-T curves of different protrusion gaps and floating widths

从图 3 中可以发现,当 $G=3.6 \mu\text{m}$, $W=4.8 \mu\text{m}$ 时,最大透光率达到 90%,比没有浮置电极时的透光率提高 15%。但相应的驱动电压从约 19 V 升高到约 23 V。

如果 G 减小到 $2.4 \mu\text{m}$,驱动电压可以相应降低。在这种情况下, $W=3.6 \mu\text{m}$ 是最优选择,对应的最大透光也能达到约 85%。另一方面,如果 G 增大到 $4.8 \mu\text{m}$,不带浮置电极的参考状况已经具备比较高的透光率(约 80%),浮置电极的作用就比较有限了。在这个情况下, $W=4.8 \mu\text{m}$ 是最优选择,可以将透光率提升到约 87%,但对应的驱动电压将上升到 27 V。

需要讨论的另一个重要因素是液晶盒厚。图 4 给出了不同液晶盒厚对应的电压-透过率曲线。在这一轮仿真计算中设定了凸状电极间距 $G=3.6 \mu\text{m}$,且浮置电极宽度 $W=4.8 \mu\text{m}$ 。

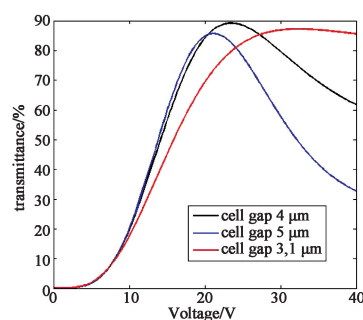


图 4 不同液晶盒厚对应的电压透光率曲线

Fig.4 V-T curves of different cell gaps

图 4 表明 $4 \mu\text{m}$ 是最优的盒厚。这是由于浮置电极的作用在于增强凸状电极顶部的横向电场。因此,当盒厚从 $4 \mu\text{m}$ 增大到 $5 \mu\text{m}$,浮置电极和凸状电极的间距相应增大,而它们之间的电势差保持不变。此时凸状电极顶部的横向电场反而减小了,相应的最大透光率也就降低了。另一方面,如果液晶盒厚减小到 $3.1 \mu\text{m}$,光在透过这样薄的液晶盒时就很难积累到最大透光所需要的半波相位延迟量。所以此时的最大透光率有所降低,对应的驱动电压则有所增加。

3.3 波长因素

在本节中,我们沿用上一节分析所得的最优化电极尺寸参数,即 $3.6 \mu\text{m}$ 凸状电极间距, $4.8 \mu\text{m}$ 浮置电极宽度,以及 $4 \mu\text{m}$ 液晶盒厚,然后讨论蓝相液晶材料色散特性对器件透光特性的

影响。

对同样的电极尺寸,3 种不同波长(450 nm, 550 nm 和 650 nm)对应的电压透过率曲线计算结果绘制在图 5 中。同样尺寸的凸状电极不带浮置电极时的电压透过率特性如图中虚线所示作为参照。

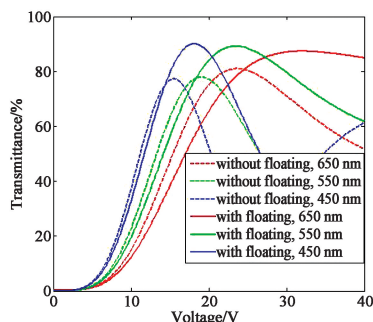


图 5 同种器件尺寸下不同波长对应的电压透过率曲线

Fig. 5 V-T curves of protrusion IPS with and without floating electrode at RGB wavelengths

在图 5 中可见,应用浮置电极后器件透过率的提升幅度和对应的光波长有关。短波光长得到的透过率提升更大,长波长相应的改善较少。另外,当我们对比带浮置电极和不带浮置电极的器件特性时还可以发现,650 nm 下的最大透光电压上升最多,而 450 nm 对应的最大透光电压上升幅度较小。

上述两项发现可以用同一个机理解释:如前所述,浮置电极引入两种相互竞争的效应。第一种有利的效应是增强凸状电极上方的横向电场强度,因而提高了死区的透过率。第二种不利的效应是减小了凸状电极之间(即浮置电极下方)的横向电场强度,以及此处的透过率。所以,总的透光率变化应当是这两种效应相叠加的结果。

蓝光的波长较短,且其对应蓝相液晶的双折射率也较大。所以,即使浮置电极削弱了其下方,两凸状电极之间的横向电场强度,从此处透过的蓝光仍然可以积累到足够的半波相位延迟量,从而达到较高透光。而红光则相反,一方面是波长较长,另一方面是蓝相液晶对应该波长的双折射率较小。于是,当浮置电极削弱了其下方的横向电场强度后,红光通过此处时就难以积累到所需

的半波相位延迟量了。因此,对波长较长的情况,需要更高的电压来驱动液晶器件,而其所能达到的最大透过率,尽管较没有浮置电极的情况而言仍有提高,比波长较短的器件透过率提升幅度更小。

3.4 上下基板错位因素

不难发现,浮置电极和凸状电极需要分别制作在液晶盒的顶板和底板上,因此上下两板压合时候的横向错位也将影响到浮置电极的工作状况。在本节中,我们讨论 3 种不同的错位情况。第一种是理想的无错位对齐。第二种上下两板间有 $1\ \mu\text{m}$ 的错位,第三种情况下的错位有 $2\ \mu\text{m}$ 。3 种情况下的电极尺寸都沿用上一节的参数,对应工作波长均为 550 nm。

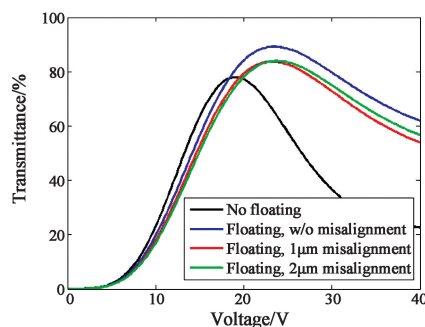


图 6 不同基板错位量对应的电压透过率曲线

Fig. 6 V-T curves of different misalignment

图 6 中可见,当出现 $1\ \mu\text{m}$ 或 $2\ \mu\text{m}$ 的错位时,最大透光率下降幅度相仿,均跌落到约 84%,但仍然比不带浮置电极的凸状电极结构的最大透光率更高。另外,错位出现时的峰值驱动电压基本不变。

4 结 论

通过在典型 IPS 模式的蓝相液晶显示器件中添加浮置电极,可将蓝相液晶器件的平均最大透过率提升到 90% 水平。这一方案让 IPS 模式的透过率得以比肩 VFS 模式蓝相液晶器件,乃至传统的向列相液晶显示器件。同时,这一设计又保留了平面内扭转驱动模式的传统优势,如宽视角,较简单的视角补偿膜设计,以及无须定向背光的特点。而这一设计方案有待解决的难点仍在于凸状电极和浮置电极的加工制造。

参 考 文 献:

- [1] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [2] CHOIS W, YAMAMOTO S I, HASEBA Y, *et al.* Optically isotropic-nanostructured liquid crystal composite with high Kerr constant [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 043119.
- [3] 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.
- [4] GE Z B, RAO L H, GAUZA S, *et al.* Modeling of blue phase liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(7): 250-256.
- [5] CHEN K M, GAUZA S, XIANYU H Q, *et al.* Submillisecond gray-level response time of a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(2): 49-51.
- [6] RAO L H, GE Z B, GAUZA S, *et al.* Emerging liquid crystal displays based on the Kerr effect [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2010, 527(1): 30-42.
- [7] RAO L H, YAN J, WU S T, *et al.* A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 081109.
- [8] 李伟欢, 孙晓扬, 李泳锐, 等. 基于多重掺杂的高科尔常数聚合物稳定蓝相液晶 [J]. *液晶与显示*, 2015, 30(4): 576-580.
- LI W H, SUN X Y, LEE Y J, *et al.* Polymer-stabilized blue phase liquid crystal of large Kerr constant based on multiple dopants [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 576-580. (in Chinese)
- [9] CHENG H C, YAN J, ISHINABE T, *et al.* Vertical field switching for blue-phase liquid crystal devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(26): 261102.
- [10] CHENG H C, YAN J, ISHINABE T, *et al.* Blue-phase liquid crystal displays with vertical field switching [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(2): 98-103.
- [11] RAO L H, GE Z B, WU S T, *et al.* Low voltage blue-phase liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(23): 231101.
- [12] YOON S, KIM M, KIM M S, *et al.* Optimisation of electrode structure to improve the electro-optic characteristics of liquid crystal display based on the Kerr effect [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(2): 201-208.
- [13] 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.
- LIU J L, MA H M, SUN Y B. Blue phase liquid crystal display for narrow viewing angle [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9): 847-852. (in Chinese)
- [14] JIAO M Z, LI Y, WU S T. Low voltage and high transmittance blue-phase liquid crystal displays with corrugated electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(1): 011102.
- [15] RAO L H, CHENG H C, WU S T. Low voltage blue-phase LCDs with double-penetrating fringe fields [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(8): 287-289.
- [16] LI Y, WU S T. Transmissive and transreflective blue-phase LCDs with enhanced protrusion electrodes [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(7): 359-361.
- [17] CHEN Y Q, SUN Y B, YANG G Q. Low voltage and high transmittance blue-phase LCDs with double-side in-plane switching electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2011, 38(5): 555-559.
- [18] YAN J, CHENG H C, GAUZA S, *et al.* Extended Kerr effect of polymer-stabilized blue-phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(7): 071105.

作者简介: 刘一帆(1985—), 男, 陕西西安人, 博士, 工程师, 2007年于清华大学获得学士学位, 2009年于俄亥俄州立大学获得硕士学位, 2014年于中佛罗里达大学获得博士学位, 主要从事液晶光学器件研发。E-mail: yliu@thorlabs.com