

文章编号:1007-2780(2017)11-0886-09

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

刘一帆^{1*}, 蓝伊奋²

(1. 索雷博光电科技(上海)有限公司, 上海 200331;

2. 友達光电, 新竹 300)

摘要:以往研究发现平面内扭转(In-Plane Switching, IPS)模式蓝相液晶显示器件的图像显示对比度明显低于理论预期。本文对导致这一问题的物理原理进行理论分析和实验验证, 据此提出改进的菱形电极结构设计以解决这一问题。实验证明, 调整走向后的 IPS 电极结构能使蓝相液晶显示器件的暗态漏光减小 2/3, 使其显示对比度提升至 10 000 : 1 以上。基于这一实验发现, 本文提出了全新的菱形电极结构设计, 以求获得高对比度显示效果。除此以外, 采用 Techwiz 仿真分析改进后的菱形 IPS 电极蓝相液晶显示器件的电光特性, 发现其伽玛偏移和灰度反转可分别减小 3/4 和 2/3, 并且其驱动电压和透过率与传统 IPS 模式蓝相液晶显示器件相仿。可见, 基于改进的菱形 IPS 电极结构的蓝相液晶显示器件相较传统蓝相液晶显示器件具备更好的显示性能和市场竞争力。

关键词: 蓝相液晶; 漏光; 菱形电极; 平面内扭转

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20173211.0886

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

LIU Yi-fan^{1*}, LAN Yi-fen²

(1. Thorlabs China, Shanghai 200331, China;

2. AUOptronics, Hsinchu 300, China)

Abstract: Conventional In-Plane-Switching (IPS) mode blue phase liquid crystal (BPLC) display device demonstrates lower contrast ratio than expectation. This manuscript analyzes the physical mechanism behind it and proposes revised rhombus IPS electrode to solve the problem. Experiment result confirms that IPS electrode structure with rotated direction reduces light leakage by two thirds, rising the contrast ratio of the display device to $>10\,000 : 1$ accordingly. Based on this discovery, the rhombus IPS electrode design is proposed to pursue high contrast image in BPLC display system design. Besides, Techwiz simulation proves that “L” shape rhombus IPS BPLC device has similar voltage-transmission characteristics, 3/4 lower Gamma shift and 2/3 lower grey scale inversion than conventional IPS BPLC. This enables rhombus IPS BPLC display as a more competitive candidate for next

收稿日期: 2017-06-09; 修订日期: 2017-07-12.

* 通信联系人, E-mail: YLiu@thorlabs.com

generation display technology.

Key words: blue phase liquid crystal; light leakage; rhombus electrode; in-plane switching

1 引言

蓝相液晶材料是一种由液晶分子自组装形成的微观有序的光电材料:在无需传统配向层赋予液晶分子定向排列的情况下,由液晶分子自组装形成微观上的周期性双螺旋结构^[1]。得益于纳米级的相干长度,蓝相液晶在电场驱动下的响应速度可比传统向列相液晶提高一个量级以上,甚至可望媲美有机发光二极管(OLED)的响应速度^[2]。Kikuchi 等人提出的聚合物稳定技术(Polymer-stabilized Blue Phase Liquid Crystal, PS-BPLC)大大提升了蓝相液晶的稳定性,使之具备了制作商用液晶显示器件的可行性^[3-7]。其后,各项研究进展也进一步降低了驱动聚合物稳定蓝相液晶所需的电压^[8-9]。另外一些相关技术如量子点的进步也为蓝相液晶显示器件的显色性能改进提供了更广阔的空间^[10-11]。因此,蓝相液晶显示技术常被认为是下一代信息显示系统,如三维(3D)显示系统和虚拟现实(Virtual reality, VR)系统研制中的一大关键因素。

在不考虑旋光效应、无外加电场的前提下,蓝相液晶材料常被认为是一种各向同性的介质材料^[12]。随外加电场的增强,蓝相液晶材料呈现出场致双折射特性,其折射率变化规律遵循扩展克尔效应模型^[13]。根据这一特性,蓝相液晶显示器件可以使用平面内扭转(In-plane-switching, IPS)驱动模式或垂直电场(Vertical-field-switching, VFS)驱动模式。其中 VFS 模式具备驱动电压较低的突出优点,但其结构大异于传统液晶显示器件,且存在视角较小,暗态漏光较大,图像对比度较低等固有缺陷^[14-15]。相对而言,IPS 模式的基本器件结构继承自传统向列相液晶显示器件,具备生产技术成熟,可视角度较宽,对液晶盒厚不敏感(故而适用于触摸屏器件应用)等优势。其较高的驱动电压也可以用凸状电极结构予以弥补^[16-18]。然而,一系列研究显示,即使在补偿了蓝相液晶材料旋光特性导致的漏光后,IPS 模式的聚合物稳定蓝相液晶显示器件仍然存在较显著的暗态漏光。对蓝相液晶显示器件而言,这一问

题制约了其显示对比度的提升和图像质量的改善。

本文对 IPS 模式下的蓝相液晶显示器件漏光原理提出分析,据此提出菱形电极结构的改进设计,并对菱形 IPS 电极结构的蓝相液晶显示器件的暗态漏光特性和相关各方面的电光特性进行实验验证和仿真计算。实验和仿真证明改进后的菱形电极结构能够大幅降低蓝相液晶显示器件的漏光量,相应提升显示器件的图像对比度,同时保持了 IPS 驱动模式的主要电光特性基本不受损失,甚至有所改善。

2 原理分析

在常用的蓝相 I 态(Blue Phase I, BP-I)液晶中,液晶分子以双螺旋结构有序排列,形成微观下的圆柱状结构。这些“圆柱体”又以体心立方结构(Body-center-cubic, BCC)堆积,如图 1 所示。大量的液晶分子指向矢量平均分布在各个方向上,因而在宏观上呈现出各向同性的没有双折射特性的蓝相液晶状态^[1]。

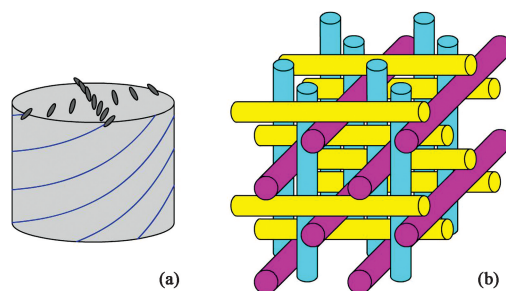


图 1 第一类蓝相液晶中的分子双螺旋排列和体心立方结构。(a)液晶分子在柱状结构中的双螺旋排列;(b)柱状结构的体心立方结构堆积,其中黄色、青色和玫红色圆柱体表示在空间中三个正交方向上排列的柱状结构

Fig.1 Double-twist alignment of LC molecules and body-center-cubic (BCC) structure in blue phase-I liquid crystal. (a) The double-twist cylinder alignment of LC molecules; (b) BCC structure of cylinders, whereas yellow, cyan & magenta colors represent cylinders aligned in three orthogonal directions

对正性液晶分子构成的蓝相液晶而言,在外加电场存在时,全体液晶分子的指向矢量受电场力作用而偏向电场方向,这种宏观有序的液晶分子排列方式使蓝相液晶呈现出场致双折射特性。因而在理论上,使用 IPS 驱动模式的蓝相液晶显示器件可使用如图 2 所示的设计结构,其中两片偏振片的透光轴相互垂直,将 IPS 蓝相液晶盒夹在当中。在液晶盒一侧内表面上制作的平直梳状 IPS 电极(以红蓝两色表示)延伸方向与偏振片透光轴方向呈 45° 夹角^[16-17]。图 2 中聚合物稳定蓝相液晶材料以灰色圆形表示,以示蓝相液晶在无外加电场时呈光学各向同性,无双折射现象。此时,透过第一片偏振片(起偏片)的显示器背光在通过蓝相液晶盒时不会改变其偏振方向,被第二片偏振片(检偏片)完全吸收,几乎不存在暗态漏光。因此理论上,这种蓝相液晶显示器件应当具有极低的暗态漏光量和极高的对比度。然而实验结果显示并非如此,种种原因导致了蓝相液晶显示器件的暗态漏光限制了对比度的提升。

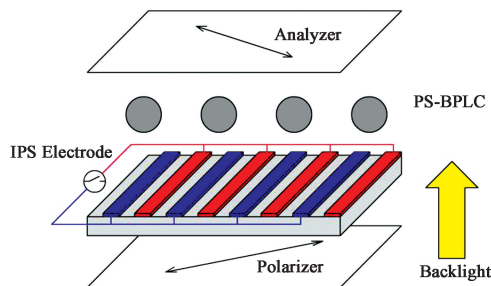


图 2 平面内扭转模式蓝相液晶显示器件结构简图
Fig.2 Sketched in-plane-switching display device structure based on blue phase liquid crystal

此前已有研究证明,蓝相液晶材料具有旋光特性。因此,显示器件为了获得更低的暗态漏光,图 2 中的上下偏振片透光轴角度应适当偏离 45° 。最佳偏离角度与蓝相液晶材料、液晶盒厚和背光波长均有关系^[12,19]。然而,在依据上述思路做出优化设计后,我们实验中观察到的蓝相液晶显示器件对比度(约 3 000~4 000:1)仍比偏振片本身的消光比(约 20 000:1)低一个数量级左右,表明仍有其他因素导致蓝相液晶显示器件中出现了额外漏光。

在分析 IPS 电极结构时,我们注意到,梳状的 IPS 电极通常使用光刻工艺制作。即首先在玻璃基板表面沉积一层均匀完整的钢锡氧化物

(Indium-Tin Oxide, ITO)透明导电膜层,其厚度通常在数十纳米至上百纳米。然后再以光刻技术刻蚀掉玻璃基板上部分区域内的 ITO 膜,留下梳状的 ITO 电极结构用于 IPS 显示模式。这一工艺流程导致 ITO 电极突出玻璃基板表面,且在电极边缘处存在较突兀的棱角,如图 3 所示。棱角尺度与 ITO 层的厚度和刻蚀工艺设计相关。在传统的向列相液晶显示器件当中,类似的 ITO 棱角并不影响液晶取向,因为在电极上方还沉积有一层介质“平坦层”将棱角填平。但蓝相液晶显示器件中并不使用类似工艺。因为蓝相液晶材料介电常数通常远大于向列相液晶。在电极与蓝相液晶之间插入介电常数较低的平坦层将导致相当一部分电压被平坦层“分担”,而降低了作用在蓝相液晶层的有效驱动电压^[20]。

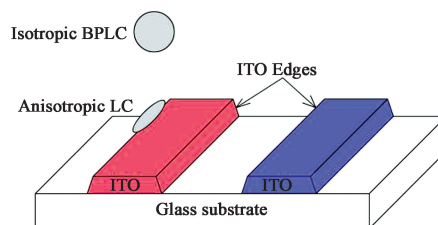


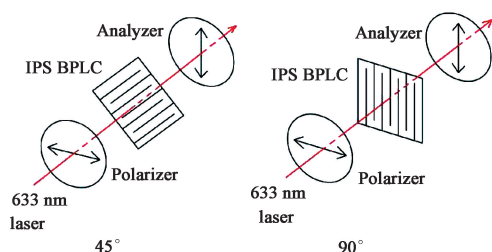
图 3 无外加电场时,蓝相液晶盒中靠近 ITO 电极边缘处的液晶双折射特性

Fig.3 Birefringence of liquid crystal near ITO electrodes of IPS mode blue phase liquid crystal cell when there is no electric field

在传统的基于向列相液晶的显示器件中,ITO 电极上方需要制备配向层如聚酰亚胺(Polyimide,PI)。通常以机械摩擦方式在配向层上加工出细密且平行的微小沟槽来诱导液晶分子有序排列,得到初始取向。沟槽尺寸在纳米至亚微米量级。因此,联想到 IPS 模式中的 ITO 电极边缘也属于尺度类似的“沟槽”,我们推测在蓝相液晶 IPS 器件中,贴近 ITO 边缘棱角处的液晶分子排列也有可能受到 ITO 电极边缘形状的扰动,存在倾向于棱角延伸方向的定向排列,而非典型的蓝相液晶各向同性排列,如图 3 所示。远离 ITO 表面的蓝相液晶不受影响,仍保持其光学各向同性,无双折射特性。但在靠近 ITO 边缘处,液晶分子排列受到电极边缘结构的微扰,在局部区域的排列更类似于向列相液晶而非蓝相液晶,存在近似平行于 ITO 电极延伸方向的分子定向排列。由

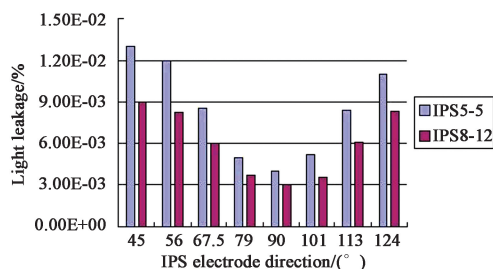
此产生了局部小范围内的具备宏观双折射特性的液晶“微畴”。因此,若上下偏振片透光方向与 ITO 电极走向呈 $+/-45^\circ$ 角,背光在经过双折射液晶微畴时将出现相位延迟和透射光偏振态变化,进而导致显示器件的暗态漏光。

为验证这一推测,在两种 IPS 电极结构的液晶盒中灌注同种蓝相液晶材料(JCBP-01M)制成聚合物稳定蓝相液晶器件^[21]。其中一种液晶盒使用电极宽度 $5\ \mu\text{m}$ 、电极间距 $5\ \mu\text{m}$ 的 IPS 电极(后文称为 IPS5-5 结构),液晶盒厚 $5\ \mu\text{m}$ 。另一种使用电极宽度 $8\ \mu\text{m}$ 、电极间距 $12\ \mu\text{m}$ 的 IPS 电极(后文称 IPS8-12 结构),液晶盒厚 $10\ \mu\text{m}$ 。按图 2 所示结构配置偏振片和液晶盒方向,使用 $633\ \text{nm}$ 氦氖激光作为检测光,测定上述两种蓝相液晶盒的暗态漏光。首先适当调整检偏片方向以补偿蓝相液晶旋光特性导致的漏光。而后在不加电压驱动时,测定该液晶盒的最小漏光百分比。其次,绕入射光轴方向旋转 IPS 液晶盒,并测定暗态漏光变化。本实验光路图和对应的漏光百分比如图 4 所示。其中“ 45° ”代表 IPS 电极走向与偏振片透光轴方向夹角为 45° ，“ 90° ”代表 IPS 电极旋转到平行于检偏片透光轴方向。



(a) 实验光路图

(a) Experimental setup



(b) 漏光百分比对比

(b) Comparison of light leakage percentage

图 4 实验光路示意图与对应的液晶器件漏光百分比

Fig.4 Experimental setup sketch and corresponding light leakage percentage of each LC cell

实验结果表明,对两种不同的 IPS 电极尺寸,转动液晶盒方向到 90° (即平行于偏振片方向)均可降低约 $2/3$ 的暗态漏光,对应的显示器件对比度从 $(3\ 000\sim4\ 000):1$ 提升至 $(10\ 000\sim13\ 000):1$ (实验发现,转动液晶盒时,其亮态透光率几乎不变,约等于平行偏振片透光率, $\sim 40\%$),接近偏振片本身的消光比($\sim 20\ 000:1$)。实验中注意到 IPS5-5 器件的漏光明显高于 IPS8-12,推测是因为 IPS5-5 器件的电极更密集,对接近电极表面的液晶分子排列取向的影响更显著。由此实验结果证明,IPS 电极的分布走向确对蓝相液晶显示器件的暗态漏光 and 对比度存在明显的影响。

3 改进器件电光特性分析

上节使用实验验证了我们的理论推测,证明 ITO 电极边缘走向影响了蓝相液晶显示器件的暗态漏光。然而,在 IPS 器件中,仍需要 ITO 电极产生与偏振片透光轴夹角约 45° 的横向电场,以获得灰度显示所需的透光率。有鉴于此,我们提出了改进 IPS 电极结构的方案,如图 5 所示。使用一组相互交叠的菱形 ITO 构成的条带代替传统 IPS 电极结构中带状的 ITO 电极,使得 ITO 边缘走向平行/垂直于偏振片透光轴向。通过这一改进,使贴近 ITO 边缘的液晶微畴指向矢量平行/垂直于偏振片透光轴向,不再改变透过光的偏振态,亦即不产生暗态漏光。因此,基于这种菱形

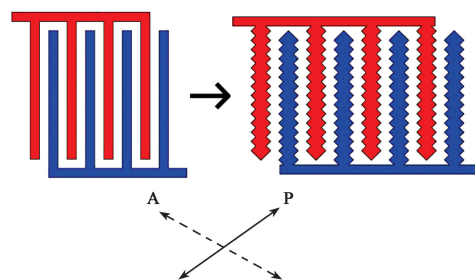


图 5 传统的带状 IPS 电极(左侧)改变为菱形结构拼接而成的 IPS 电极(右侧)。对应两种电极结构的起偏器“P”与检偏器“A”透光轴角度如图下方给出

Fig.5 Change from stripe electrodes in conventional IPS device (left) to rhombus electrodes in the proposed IPS device (right). The transmission axis directions of polarizer “P” and analyzer “A” in these designs are shown on the bottom

IPS 电极结构设计的蓝相液晶显示器件有望获得大幅提升的图像对比度。

3.1 电压-透过率曲线比较

根据扩展克尔效应模型,拟合上文所述 JCBP-01M 蓝相液晶材料的电光特性参数为 $\Delta n_s = 0.154$, $E_s = 4.15 \text{ V}/\mu\text{m}^{[13, 21]}$ 。依据这些参数,可通过 Techwiz3D 程序仿真计算获得菱形 IPS 电极结构的聚合物稳定蓝相液晶 (Polymer-Stabilized Blue Phase Liquid Crystal, PS-BPLC) 显示器件的电光响应特性。

在下文中仿真计算使用的菱形 IPS 电极结构由若干正方形 ITO 块拼接而成。因此,菱形 IPS 电极的基本尺寸参数,除了 IPS 电极的周期间距 (pitch, 即相邻两电极的中轴线间距) 之外,主要包括每个正方形 ITO 块的边长 (L) 和重叠宽度 (W),如图 6 所示。

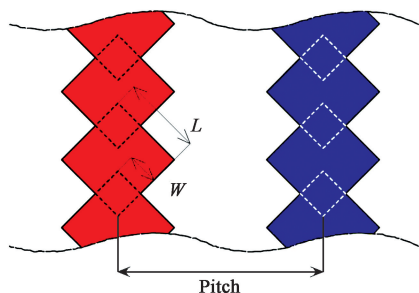


图 6 菱形 IPS 电极的主要尺寸参数: 电极周期间距 pitch, 正方形 ITO 块的边长 L 和重叠宽度 W

Fig. 6 Key dimensions of the rhombus IPS electrode: IPS electrode pitch, the edge length (L) of each ITO square and overlap edge width (W)

首先分析重叠宽度 W 对菱形 IPS 器件电光特性的影响。我们选择线宽 $3 \mu\text{m}$, 电极间距 $3 \mu\text{m}$ 的传统带状 IPS 电极结构 (IPS3-3) 作为参照。设定菱形 IPS 电极的周期间距 $\text{pitch} = 10 \mu\text{m}$, 边长 $L = 5 \mu\text{m}$, 选择重叠宽度 W 分别为 $4 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$ 。仿真所得该蓝相液晶显示器件的电压透过率 (V - T) 曲线, 如图 7 所示。

在图 7 中可见, 重叠宽度 W 越小, 最大透过率对应的驱动电压越高, 而相应的最大透过率也越高。其中 $W = 1 \mu\text{m}$ 的菱形 IPS 电极结构的最大透过率和对应的驱动电压均与作为参照的 IPS3-3 结构相仿。 W 对峰值透过率的影响可以由 IPS 电极上方的死区大小解释。在 IPS 电极上

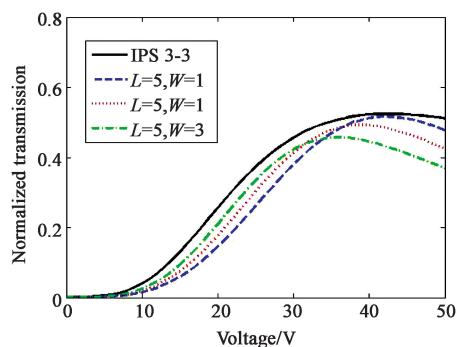


图 7 菱形 IPS 电极重叠宽度 W 对 V - T 曲线的影响
Fig. 7 Impact of overlap width W on the V - T curve of rhombus electrode IPS device

方, 电场方向接近竖直, 产生的蓝相液晶场致双折射效应不影响透过光的相位延迟和偏振态, 不贡献透过率。这一不透光区域称为死区。因此, IPS 电极占整个显示器件面积比例越大, 死区越大, IPS 器件的最大透过率就越低。而这正是 W 参数变大时的现象: 在 pitch 和 L 参数不变时, W 越大, IPS 电极面积占整个显示器件面积的比例越大, 因而死区面积也越大, 最大透过率相应越低。

其次分析菱形 IPS 电极中的正方形边长 L 对 V - T 曲线的影响。设定电极周期 $\text{pitch} = 10 \mu\text{m}$, 重叠宽度 $W = 1 \mu\text{m}$, 正方形边长 L 分别为 $4 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$ 。仿真所得该蓝相液晶器件的 V - T 曲线如图 8 所示。

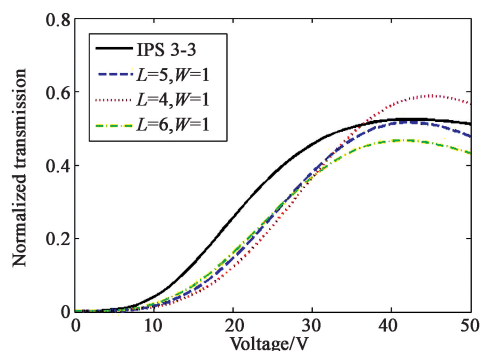


图 8 菱形 IPS 电极中正方形 ITO 边长 L 对 V - T 曲线的影响
Fig. 8 Impact of square ITO edge length L on the V - T curve of rhombus electrode IPS device

由图 8 中曲线可见, 正方形边长 L 越小, 器件的峰值透过率越高, 但同时驱动电压会随之升高, 尽管升高幅度不大。这是由于 L 的减小导致

了 IPS 正负电极之间的平均间距变大(尽管此时 pitch 不变),死区占比相对减小,因此液晶器件的峰值透过率更高,但同时需要更高的驱动电压来实现透光所需的电场强度。

总体而言,菱形 IPS 电极蓝相液晶显示器件的 V-T 特性与传统的带状 IPS 电极蓝相液晶器件特性相似,经过适当的电极尺寸优化后,采用菱形 IPS 电极结构并不会导致显示器件的峰值透过率降低或对应驱动电压升高。再结合菱形 IPS 电极对暗态漏光特性的改善,可见菱形 IPS 电极结构确能改善蓝相液晶显示器件的对比度特性。

3.2 可视角度特性比较

一般而言,基于向列相液晶的 IPS 模式显示器件具备较宽的可视角度。但单畴的 IPS 显示器件在较大斜视角下仍然存在伽玛偏移和灰度反转的问题,导致了不同视角下的图像显示色差。之字形弯折的梳状 IPS 电极可产生多畴 IPS 结构,不但进一步提高显示器件的可视角度,而且改善大视角下的伽玛偏移和灰度反转问题^[22-24]。在蓝相液晶显示器件中,尤其是菱形电极 IPS 显示器件中是否存在类似的视角问题,以及能否类似的使用之字形 IPS 电极设计予以改善,在本节中也由 Techwiz3D 仿真分析。

图 9 中绘制了从直线型 IPS 电极到之字形 IPS 电极的改进。对蓝相液晶显示器件,为尽可能提升之字形 IPS 显示器件的最大透过率,使多畴 IPS 结构中每个局部区域的蓝相液晶都能在同一驱动电压下达到最大透过率,IPS 电极的弯折角度应保持为 90° ,如图 9b、d 中所示,即保持电极走向与偏振片光轴方向始终为 45° 夹角。为便于区分,将图 9 中 4 种电极结构分别称之为直线型带状 IPS 电极(图 9a),之字形带状 IPS 电极(图 9b),直线型菱形 IPS 电极(图 9c)与之字形菱形 IPS 电极(图 9d)。

将图 9b 与图 9d 中之字形 IPS 电极结构导入 Techwiz3D 进行仿真计算,保持其余参数不变,分别与已有的图 9a、图 9c 中的直线型 IPS 器件仿真结果做对比,即可对比发现之字形设计对带状 IPS 结构和菱形 IPS 电极结构各自的电光性能影响。

仿真结果显示,无论带状 IPS 电极或是菱形 IPS 电极,在由直线型结构改为之字形结构之后,

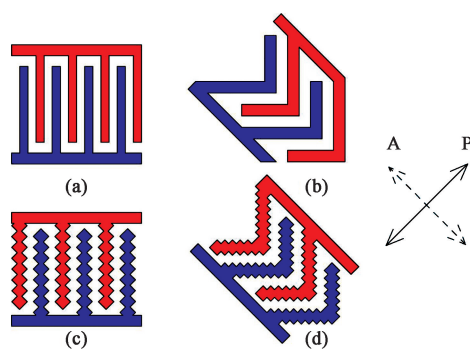


图 9 直线型与之字形 IPS 电极形状示意图。(a)直线型带状 IPS 电极;(b)之字形带状 IPS 电极;(c)直线型菱形 IPS 电极;(d)之字形菱形 IPS 电极。对应四种电极结构的起偏器“P”与检偏器“A”透光轴角度如图右侧给出

Fig.9 Straight vs. “L” shape IPS electrodes. (a) Straight IPS stripe electrodes; (b) “L” shape IPS stripe electrode; (c) Straight rhombus IPS electrode; (d) “L” shape rhombus IPS electrode. The transmission axis directions of polarizer “P” and analyzer “A” in these designs are shown on the right

其电压透过率曲线和对比度视角均保持不变。图 9b 和图 9d 中之字形 IPS 电极蓝相液晶显示器件的对比度视角圆图几乎完全相同(如图 10 所示),且与相应的直线型 IPS 电极对应的对比度视角圆图(图略)无区别。这一结果表明改进后的之字形电极结构对蓝相液晶显示器件的对比度视角无影响。这一结果符合我们的预期,因为直线型 IPS 电极结构本身为四边中心对称形状,其由此产生的电场分布和可视角度也为四边中心对称分布。因此,在不考虑折角处局部小范围的电场分布的前提下,改为直角之字形的多畴 IPS 结构时,其中各畴的可视角度完全相同。所以整个 IPS 蓝相液晶显示器件总体平均的对比度视角与各畴的视角完全相同。

但另一方面,仿真结果显示,折线型电极结构可大大减小 IPS 显示器件在斜视角下的伽玛偏移和灰度反转问题。图 11 绘制了对应图 9 中 4 种电极结构的灰度伽玛曲线。图 11 中的每一分图中,所有灰度伽玛曲线均对应 60° 斜角(polar angle, 图中以 θ 表示),从 0° 极角(azimuthal angle, 图中以 ϕ 表示)至 345° 极角,间距 15° 极角,共 24 条曲线。这些曲线间的纵向

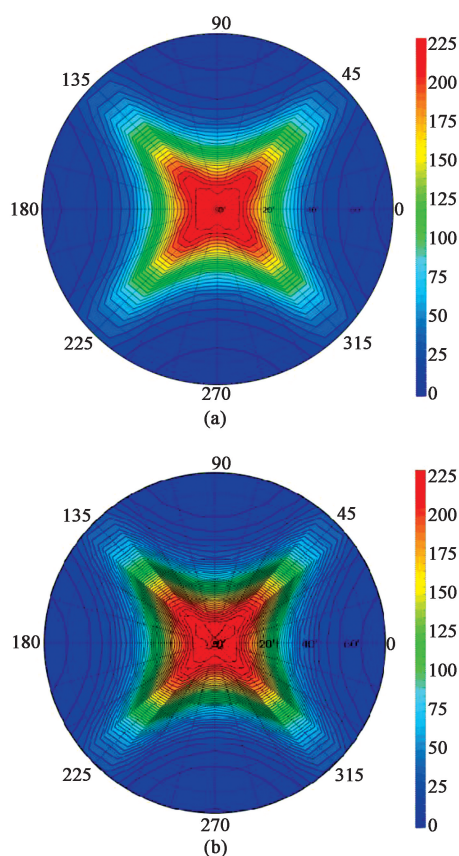


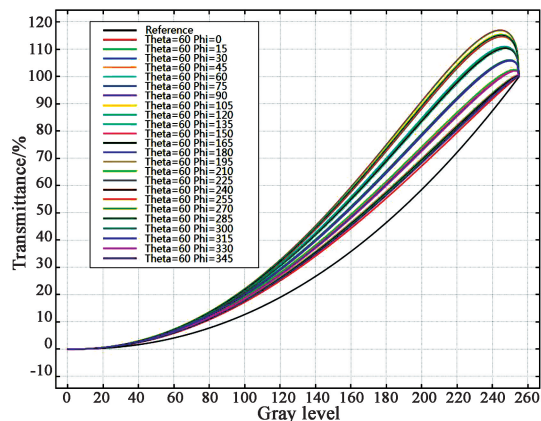
图 10 (a)之字型带状 IPS 蓝相液晶显示器件的对比度圆图(b)之字型菱形 IPS 蓝相液晶显示器件的对比度圆图

Fig.10 (a) Contrast ratio contour map of “L” shape IPS stripe electrode BPLC display device (b) Contrast ratio contour map of “L” shape rhombus IPS electrode BPLC display device

间距越大,表明不同斜视角下的伽玛偏移越大,显色差异就越大,图像质量相应越差。

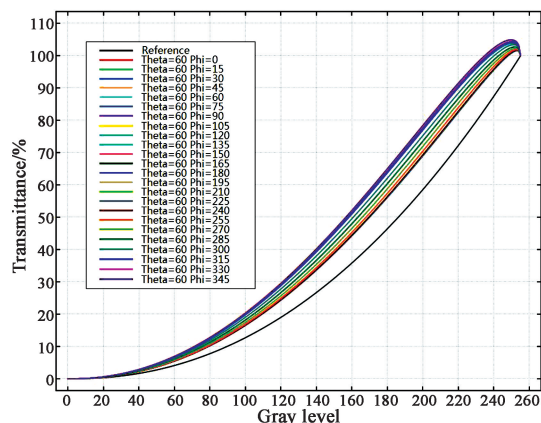
其中图 11a、c 显示,直线型 IPS 电极结构对应的伽玛偏移最大可达 27% (图 11a) 和 30% (图 11c),灰度反转(该器件的最大透过率与最大灰度下透过率的差值)约 16%。表明直线型 IPS 电极的蓝相液晶显示器件在不同斜视角下的图像显色差异显著,严重影响图像质量和观看体验。相对的,在图 11b、d 中,之字型 IPS 电极结构对应的伽玛偏移分别减小至 10% (图 11b) 和 7% (图 11d),灰度反转相应缩小至 5%。表明之字型 IPS 电极结构蓝相液晶显示器件在斜视角下的图像显色差异大大减小,且菱形 IPS 电极结构(图 11d)比传统带状 IPS 电极结构(图 11b)的伽玛偏移更小一点。这是由于菱形电极

结构可以产生比带状电极更复杂的多畴双折射率分布,使得整个 IPS 显示器件在斜视角下的图像灰度被更好地平均,因此不同视角下的显色差异更小。



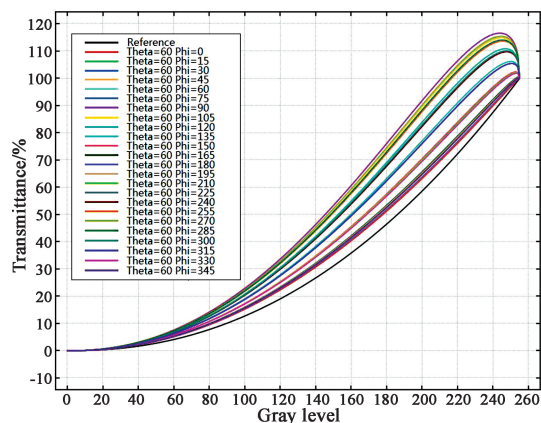
(a) 直线型带状 IPS 电极

(a) Straight IPS stripe electrodes



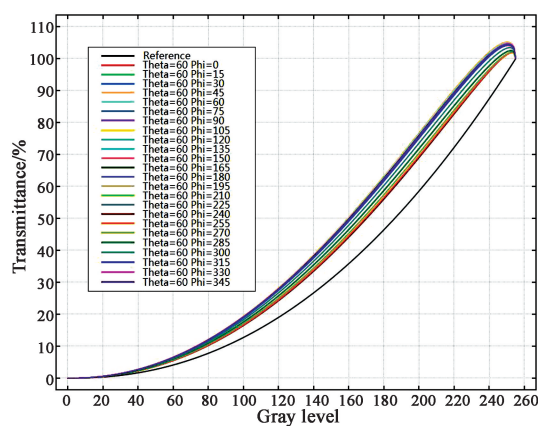
(b) 之字形带状 IPS 电极

(b) “L” shape IPS stripe electrode



(c) 直线型菱形 IPS 电极

(c) Straight IPS rhombus electrode



(d)之字形菱形 IPS 电极

(d)“L” shape IPS rhombus electrode

图 11 不同 IPS 电极在 60°斜角下的伽玛偏移和灰度反转

Fig.11 Gamma shift and grey scale inversion of different IPS electrode designs, simulated for 60° polar angle.

5 结 论

我们在实验中观察到蓝相液晶 IPS 显示器件的暗态漏光明显高于预期,推测是由于靠近 IPS 电极边缘处的局部液晶存在类似向列相的有序排列现象,产生了无外加电场时的液晶双折射特性。通过实验改变 IPS 电极与偏振片的相对角度,使之与偏振片透光轴平行或垂直,可降低约 2/3 的暗态漏光,将显示对比度提升至不低于 10 000 : 1,从而证明了上述推测。因此,我们设计了菱形 IPS 电极结构以改善暗态漏光,提高对比度。其驱动电压和最大透过率以及视角特性均可媲美典型的传统 IPS 模式蓝相液晶显示器件。此外,我们提出了使用之字型电极改善可视角度的菱形 IPS 电极设计,使 60°斜视角下的伽玛偏移和灰度反转均降低到 10% 以下。图像显示质量由此得到进一步提升,改善了蓝相液晶显示器件的总体性能,增强了该技术的市场竞争力。

参 考 文 献:

- [1] MEIBOOM S, SETHNA J P, ANDERSON WP, *et al.* Theory of the blue phase of cholesteric liquid crystals [J]. *Physics Review Letters*, 1981, 46(18): 1216-1219.
- [2] CHEN K M, GAUZA S, XIANYU H, *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.
- [3] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [4] CHOI S W, YAMAMOTO S I, HASEBA Y, *et al.* Optically isotropic-nanostructured liquid crystal composite with high Kerr constant [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(2): 043119.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] RAO L, GE Z, GAUZA S, *et al.* Emerging liquid crystal displays based on the Kerr effect [J]. *Molecular Crystal and Liquid Crystal*, 2010, 527(1): 30-42.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LI W H, SUN X Y, LEE Y R, *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)
- [11] LUO Z Y, WU S T. A Spatiotemporal four-primary color LCD with quantum dots [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(5): 367-372.
- [12] LUO Z Y, XU D M, WU S T. Emerging quantum-dots-enhanced LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(7): 526-539.
- [13] LIU Y F, LAN Y F, ZHANG H X, *et al.* Optical rotatory power of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131102.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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)
- [19] LIU Y F, LAN Y F, HONG Q, *et al.* Compensation film designs for high contrast wide-view blue phase liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(1): 3-6.
- [20] YAN J, CHEN Y, WU S T, *et al.* Figure of merit of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(1): 24-29.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] LU R B, WU S T, HONG Q, *et al.* Wide viewing angle multi-domain in-plane-switching LCD [J]. *Molecular Crystal and Liquid Crystal*, 2006, 453(1): 379-392.
- [24] 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.

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@thor-labs.com

蓝伊奋(1982—), 男, 台湾新竹人, 博士, 工程师, 2010 年于台湾大学获得博士学位, 主要从事聚合物稳定蓝相液晶显示器件开发以及微型 LED 显示器件研究。E-mail: even.yf.lan@auo.com