

基于三维光学模型的彩色边缘场效应优化

李丹¹, 张宝龙^{1*}, 郭海成²

¹天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222;

²香港科技大学先进显示与光电子技术国家重点实验室, 香港 999077

摘要 研究了垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶(VA CF-LCoS)微显示器件,并利用其三维光学模型,改变液晶器件的预倾角、像素尺寸等参数,优化了微小像素中的边缘电场效应。为进一步优化器件的性能,建立了以圆偏振光作为入射光源的微显示器件的三维光学模型。研究表明:当以圆偏振光作为照明光源时,VA CF-LCoS微显示器件的光学反射效率可得到大幅提升。由于采用了三维光学模型的分析方法,得到了与利用二维光学模型进行分析时完全不同的结论:优化只能使得边缘场效应导致的亮态子像素内部黑线减小,而不能彻底消除它。

关键词 光学器件; 彩色滤光膜; 硅覆液晶; 垂直向列型; 光学建模; 圆偏振光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0703002

Optimization of Color Fringing Field Effect Based on Three-Dimensional Optical Model

Li Dan¹, Zhang Baolong^{1*}, Kwok Hoising²

¹College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

²State Key Laboratory of Advanced Displays and Optoelectronics Technologies, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

Abstract Herein, the vertical aligned nematic color filter liquid crystal on silicon (VA CF-LCoS) microdisplay was studied, and the fringing field effect in micro-pixels was optimized by changing the pre-tilt angle and pixel size. To further optimize device performance, a three-dimensional (3D) optical model of the VA CF-LCoS was established using circularly polarized light as the incident light source. Results reveal that the optical reflection efficiency of VA CF-LCoS can be considerably improved when a circularly polarized light is used as the illumination source. Herein, using 3D optical analysis, a completely different conclusion has been reported compared to those reported by former researchers who use two-dimensional optical analysis: the black lines in bright sub-pixels caused by the fringing field effect can only be reduced via optimization, and not completely eliminated.

Key words optical devices; color filter; liquid-crystal-on-silicon; vertical aligned nematic; optical modeling; circularly polarized light

OCIS codes 230.2090; 230.3720

1 引 言

彩色滤光膜硅覆液晶(CF-LCoS)微显示器是一种具有实际应用价值和市场需求的微显示器件。彩色滤光膜集成在传统的 LCoS 器件上,可使微显示器件本身具备全彩色显示的条件。之前的工作研究了扭曲向列型(TN)CF-LCoS微显示器件的制备方法、三维光学建模及性能优化,并通过实验对比验证

了该三维模型的准确性^[1-7]。在微显示器件中,微小彩色子像素之间的边缘场效应会严重影响器件的亮度、对比度以及色彩饱和度等显示参数。尽管通过改变彩色像素阵列的排列结构、旋转液晶取向层的摩擦结构以及优化液晶模式等方式,可以实现微显示器件色饱和度性能的优化,但边缘场效应的作用使得器件的亮度以及对比度等性能参数始终无法得到提升^[1, 3-5]。

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-03-10; 录用日期: 2019-03-27

* E-mail: eezbl@tust.edu.cn

与 TN 模式相比,垂直向列型(VAN)液晶模式是 CF-LCoS 微显示器件的一个新选择。VAN 模式的暗常态特性^[8]使得 CF-LCoS 微显示器件的对比度大幅提升。然而,之前的研究工作一般采用线偏振光(LP)作为 VAN 模式 CF-LCoS 微显示器件的入射光源,为了与本文的研究内容相区分,将这一微显示器件称为线偏振垂直向列型液晶模式(LP-VA)器件。与 TN 模式器件相比,LP-VA CF-LCoS 微显示器件的边缘场效应导致亮态彩色子像素内部黑线所占面积更大,使得器件的亮度进一步降低^[9-10]。另外,低响应速度也是这类器件的一大缺点^[11]。

近期,圆偏振光垂直向列型液晶模式(CP-VA)得到广泛研究。Iwamoto 等^[11-12]采用圆偏振片并利用边缘场效应实现了多畴垂直向列型液晶模式,并将这一液晶模式命名为 FEF-MVA-LCD。研究发现,当采用圆偏振光作为入射光后,垂直向列型液晶器件不仅能获得更高的对比度,而且能彻底消除边缘场效应导致的亮态子像素的内部黑线,提升液晶器件的光效率或亮度。吴诗聪课题组^[13]搭建了一个具有相似圆偏振光学架构的单色 LCoS 微显示系统,并采用二维光学模型研究了这一系统的光学特性。但由于只采用了二维光学模型,其研究结果与 Iwamoto 等的研究成果一样,一致认为 CP-VA 可以彻底消除边缘场效应导致的亮态子像素内部黑线。

首先,本文利用三维光学模型优化了 VAN CF-LCoS 微显示器件的性能。其次,为进一步优化器件的性能,将器件入射光源的偏振状态从线偏振光转变为圆偏振光。最后,为了分析 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的光学性能,建立了这一新器件的三维光学模型,并对该器件进行光学分析。结果表明,边缘场效应导致的亮态子像素的内部黑线只能被减小,不能被完全消除。这一结论与之前研究者的结论相反。

2 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的性能优化

根据 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的三维光学模型^[1],利用计算机仿真可有针对性地定位器件亮态子像素的内部黑线,进而优化器件的边缘场效应。改变微显示器件的预倾角及像素尺寸,可以优化器

件的色饱和度、光学反射率等性能参数。

2.1 预倾角

预倾角是一个非常重要的参数,可直接影响 LP-VA CF-LCoS 的性能参数,如对比度、响应速度、色饱和度和光学反射率。预倾角对彩色像素阵列模拟空间光学反射率的影响如图 1 所示,其像素间距为 $15\ \mu\text{m}$,预倾角从 90° 逐渐减小到 80° (90° 、 88° 、 86° 、 84° 、 82° 、 80°)。当预倾角为 90° 时,单一子像素被分为 4 个对称的畴。在此条件下,无外加电场作用时,液晶分子指向矢垂直于器件表面;当施加外电压时,由于液晶分子没有更好的旋转方向,因此液晶指向矢在每个象限内具有对称的形状,进而将单个子像素的显示图像分割为 4 个相同的畴,分别标记为 d1、d2、d3 和 d4,如图 1(a) 所示。

当预倾角从 90° 逐渐减小到 80° 时,边缘场效应导致的亮态子像素的内部黑线的交点有向点亮子像素左下角移动的趋势,这是由于 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的硅衬底上的扭转角相对于水平方向为 -135° 。当预倾角小于 90° 时,液晶指向矢优先朝像素左下角旋转。因此,d1、d3 和 d4 会收缩到较小的尺寸,与之相反,d2 部分会被放大,如图 1(b) 所示。

当预倾角减小到 86° 时,d2 和 d3 两畴将合并,最终在一个子像素中得到 3 个畴,如图 1(c) 所示。随着预倾角进一步减小,d2 和 d3 的合并部分进一步增加,占据了点亮子像素更多的区域,进而增加了点亮子像素的光学反射率,如图 1(d)~(e) 所示。

当点亮子像素的光学反射率随着预倾角的减小而增大时,关断子像素的漏光也随之增加。由于预倾角引起了双折射现象,关断子像素的暗态性能被降低。这导致处于暗态的红色和蓝色子像素产生漏光现象。如图 1(f) 所示,当预倾角达到 80° 时,器件的颜色和对比度都有所下降。

图 2 所示为 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的峰值反射率、对比度随预倾角的变化。当预倾角从 90° 减小到 80° 时,一方面,绿色子像素的峰值反射率从 4.52% 增大到 8.43% ,红色子像素的峰值反射率从 3.79% 增大到 7.86% ,蓝色子像素的峰值反射率从 5.49% 增大到 8.62% 。另一方面,以绿色子像素为例,随着预倾角由 90° 减小为 88° ,对比度从 3×10^3 迅速减小到 1×10^3 ;预倾角继续减小至 84° 时,对比度持续减小到 2.5×10^2 ;当预倾角减小到 80° 时,对比度减小到 1.5×10^2 。

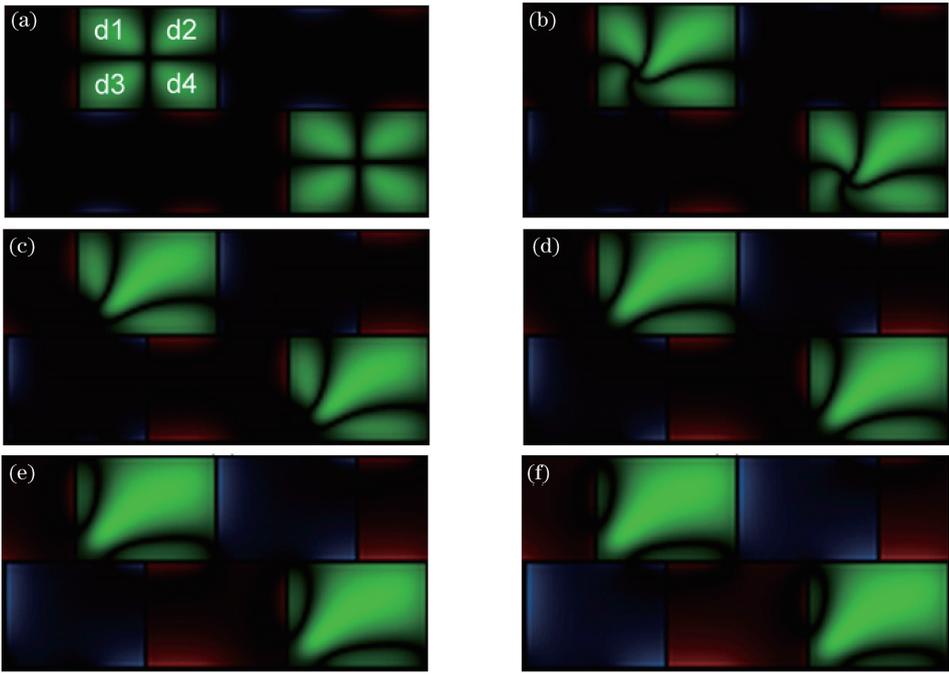


图 1 预倾角对彩色像素阵列模拟空间光学反射率的影响。(a) 90°; (b) 88°; (c) 86°; (d) 84°; (e) 82°; (f) 80°

Fig. 1 Effect of pre-tilt angle on optical reflectance of color pixel array in simulated spatial.

(a) 90°; (b) 88°; (c) 86°; (d) 84°; (e) 82°; (f) 80°

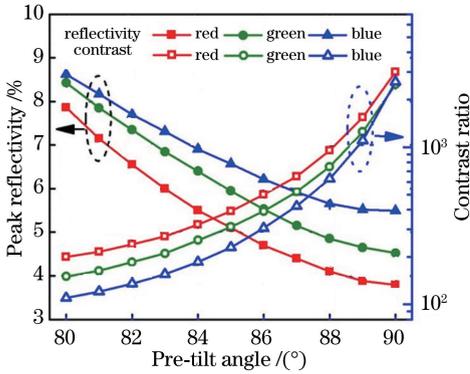


图 2 LP-VA CF-LCoS 微显示器器件峰值反射率、对比度随预倾角的变化

Fig. 2 Variations in optical reflectance and contrast of LP-VA CF-LCoS microdisplays with pre-tilt angle

随着预倾角减小,不仅器件的对比度会下降,器件的色饱和度也会相应降低。图 3 所示为 LP-VA CF-LCoS 微显示器在不同预倾角下的色饱和度变化趋势,其中 x 、 y 为色坐标轴,NTSC 为美国国家电视标准委员会制定的色彩标准,CIE frame 为国际照明委员会 1931 色彩空间色度图。可见,色饱和度由 90° 预倾角时的 66.8% NTSC 降低到 86° 时的 62.5% NTSC、84° 时的 58.4% NTSC 以及 80° 时的 46.8% NTSC。

对于 LP-VA CF-LCoS 微显示器,找到最佳的预倾角以获得最优的器件性能比较困难。较大的预

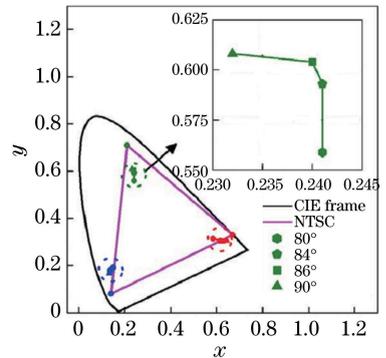


图 3 LP-VA CF-LCoS 微显示器在不同预倾角时的色饱和度变化趋势

Fig. 3 Variation in color saturation of LP-VA CF-LCoS microdisplays with pre-tilt angle

倾角有利于提升对比度,而较小的预倾角有利于提高光学反射率,因此在性能优化时必须作出妥协。显然,86° 预倾角可作为一个很好的选择。在该预倾角下,器件色饱和度可达到大于 60% NTSC 的水平,同时,其对比度也可以大于 400:1。在这一预倾角条件下,红色、绿色和蓝色图像的峰值反射率分别为 4.91%、5.52% 和 6.28%。

2.2 像素尺寸

像素尺寸是决定 LP-VA CF-LCoS 微显示器性能的另一个重要参数。利用三维光学模型还可分析光学反射率、色饱和度与像素尺寸之间的关系。

图 4 所示为彩色像素阵列图像,其像素间距分别为 12,15,18,21 μm 。在模拟中,设定预倾角为 86° ,液晶盒厚度为 3 μm 。

由图 4 可知,由于预倾角相同,不同像素尺寸的像素具有相似的显示图像。然而,在同一像素上明暗图像的百分比随着像素尺寸的增大而增加。其结果是,器件的色饱和度随着像素尺寸的增大而提高。模拟结果表明,绿色图像的颜色坐

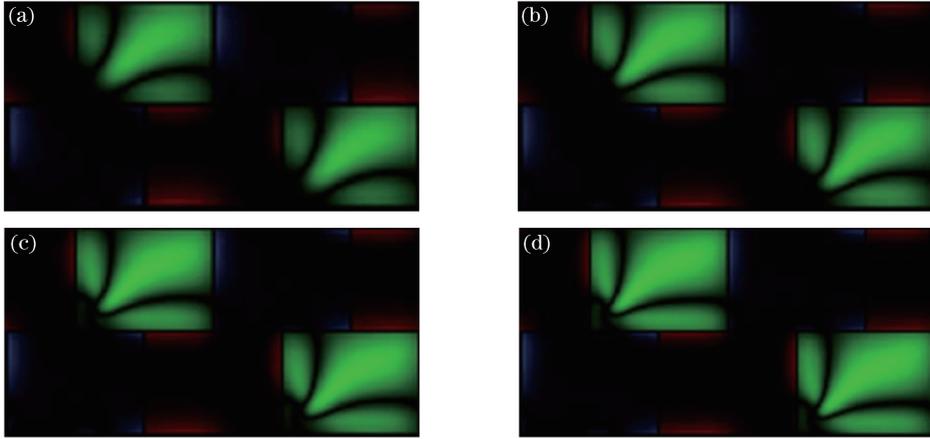


图 4 不同像素间距的彩色像素阵列图像。(a) 12 μm ;(b) 15 μm ;(c) 18 μm ;(d) 21 μm

Fig. 4 Color pixel array images with different pixel intervals. (a) 12 μm ; (b) 15 μm ; (c) 18 μm ; (d) 21 μm

同时,彩色图像的峰值反射率也随着像素尺寸的增大而增大。模拟结果表明,绿色图像的峰值反射率从 12 μm 像素的 4.45% 增大到 15 μm 的 5.52%、18 μm 的 6.37% 以及 21 μm 的 7.08%。同样,红色和蓝色图像的峰值反射率也从 12 μm 像素的 3.86% 和 5.18% 分别增大到 15 μm 的 4.91% 和 6.28%、18 μm 的 5.80% 和 7.11%、21 μm 的 6.56% 和 7.78%。值得注意的是,当微显示器件显示白色图像,即红绿蓝三个子像素同时点亮时,器件的整体亮度是相同的,即不随子像素尺寸的改变而变化。其原因是:在白色显示状态下,红色、绿色和蓝色子像素在相同的电压下点亮和关闭时,不存在边缘场效应作用的情况。因此,像素尺寸的增大只会增加器件单色显示时的色饱和度。

3 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的三维光学建模

为了进一步优化器件的性能,将 VAN CF-LCoS 微显示器件的入射光源的偏振状态从线偏振光变为圆偏振光,从而得到 CP-VA CF-LCoS 微显示器件。这一器件的光学架构如图 5 所示。其中,

标由像素尺寸为 12 μm 时的 (0.237,0.607) 提高到 15 μm 时的 (0.237,0.610)、18 μm 时的 (0.237,0.613) 及 21 μm 时的 (0.238,0.615)。同样,红色和蓝色饱和度也略有增加,分别从 12 μm 像素时的 (0.628,0.300) 和 (0.134,0.169) 增加到 15 μm 时的 (0.636,0.301) 和 (0.133,0.170)、18 μm 时的 (0.644,0.302) 和 (0.133,0.170) 及 21 μm 的 (0.650,0.303) 和 (0.132,0.171)。

圆偏振片可以看作是线偏振片与 1/4 波片相叠加的组合物,且这一线偏振片的偏振方向与 1/4 波片的快轴成 45° 夹角。

为了分析这一器件的性能,对这一器件进行三维光学建模。CP-VA CF-LCoS 微显示器件的三维光学建模过程主要分为三个部分。

首先,对液晶器件的机电特性进行分析。在矩形网格中,通过求解泊松方程和边缘条件连续方程,对液晶材料指向矢参数进行数值计算。

$$\nabla[\boldsymbol{\varepsilon}(x, y, z) \nabla \mathbf{V}(x, y, z)] = 0, \quad (1)$$

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{d}{dj} \left[\frac{\partial(F_s - F_e)}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j} \right)} \right] - \frac{\partial(F_s - F_e)}{\partial n_i}, \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}(x, y, z)$ 为液晶器件的介电常数张量; $\mathbf{V}(x, y, z)$ 为空间电势函数; γ 为旋转黏度系数; n_i 为液晶指向矢投影到 i 轴上的分量; t 为时间; F_s 和 F_e 分别为弹性和静电能量密度函数; i 和 j 分别为 x 、 y 和 z 轴中的任意两个。模拟结构的驱动俯视图如图 6(a) 所示,红色子像素 R 和蓝色子像素 B 均为关断状态,其驱动电压均为 4 V;绿色子像素 G 为点亮状态,其驱动电压为 0 V。图 6(b) 所示为模拟得到的液晶指向矢分布剖面图。

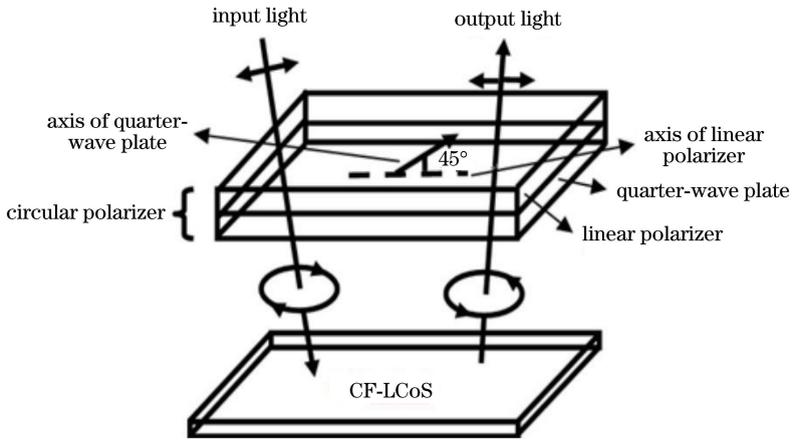


图 5 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的光学架构

Fig. 5 Structure of CP-VA CF-LCoS microdisplay

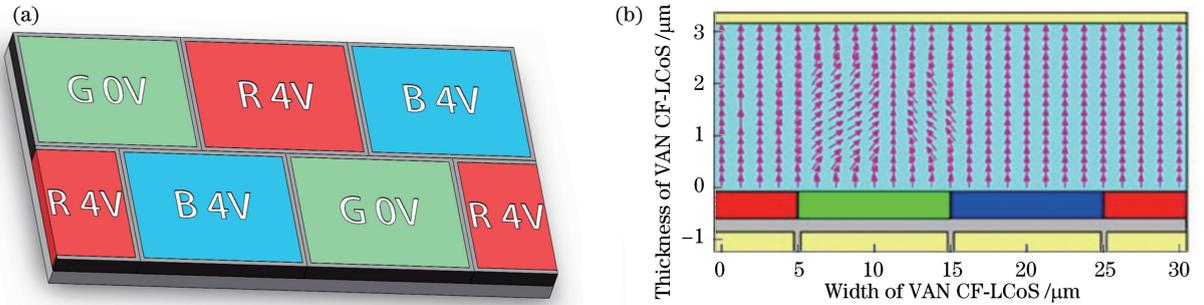


图 6 VAN CF-LCoS 模拟结构。(a)驱动俯视图;(b)液晶指向矢分布剖面图

Fig. 6 Simulated structures of VAN CF-LCoS. (a) Top view of driving; (b) cross section view of director distribution of liquid crystal

其次,根据 CF-LCoS 微显示器件光反射率分析模型(图 7)和 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的光学

架构,通过扩展琼斯矩阵的分析方法,可得到

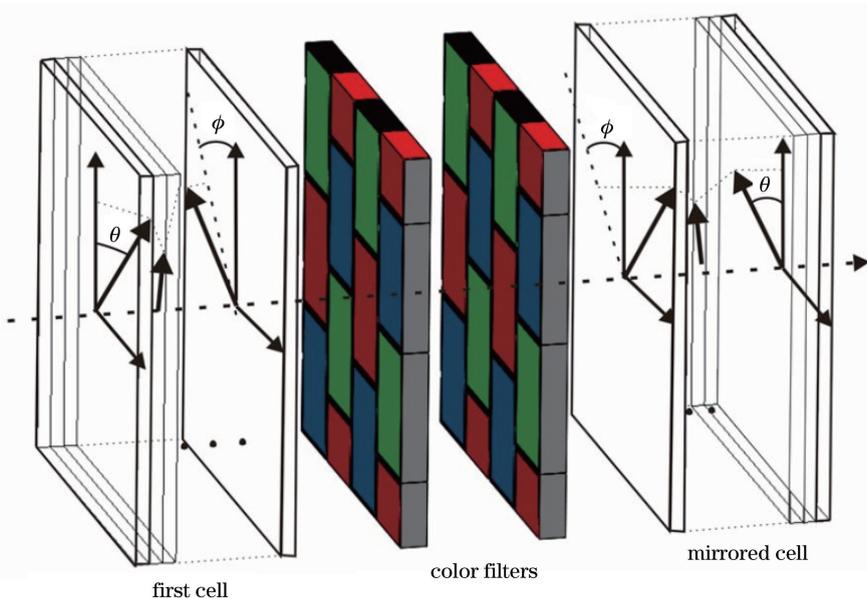


图 7 CF-LCoS 微显示器件的光反射率分析模型

Fig. 7 Optical reflectance analysis model of CF-LCoS microdisplays

$$\begin{bmatrix} E_{po} \\ E_{so} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_o \cdot \mathbf{M}(-\theta, \phi, -\Delta\varphi) \cdot \mathbf{D}_{CF \rightarrow LC} \cdot \mathbf{P}_{CF} \cdot \mathbf{D}_{LC \rightarrow CF} \cdot \mathbf{M}(\theta, \phi, \Delta\varphi) \cdot \mathbf{P}_i \cdot \begin{bmatrix} E_{pi} \\ E_{si} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: E_{si} 和 E_{pi} 分别为输入 s(垂直)和 p(平行)方向的电场强度; E_{so} 和 E_{po} 分别为输出 s 和 p 方向的电场强度; $\mathbf{M}(-\theta, \phi, -\Delta\varphi)$ 和 $\mathbf{M}(\theta, \phi, \Delta\varphi)$ 分别为透射式液晶器件以及与之镜像的透射式液晶器件的传输矩阵; \mathbf{P}_{CF} 为光线在彩色滤光膜材料中的传输特性; $\mathbf{D}_{CF \rightarrow LC}$ 和 $\mathbf{D}_{LC \rightarrow CF}$ 分别为彩色滤光膜与液晶器件之间的界面矩阵及液晶器件和彩色滤光膜之间的界面矩阵; $\mathbf{P}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{P}_o = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}$ 为圆偏振起偏器与检偏器的矩阵表达形式; θ 为液晶指向矢的倾角; ϕ 为液晶指向矢的方位角; $\Delta\varphi$ 为方位角的变化量。

进而, 可以计算出彩色像素在可见光谱范围内的光反射率:

$$R = \frac{|E_{so}|^2 + |E_{po}|^2}{|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2}. \quad (4)$$

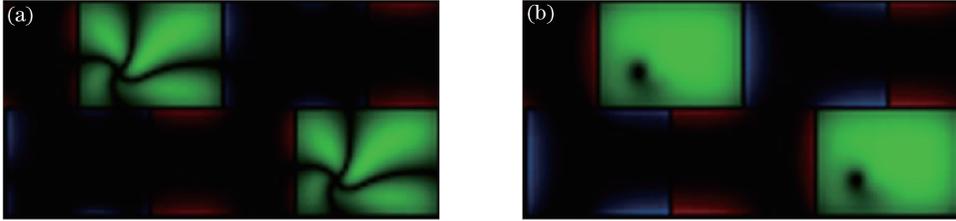


图 8 模拟得到的 CF-LCoS 微显示器件的彩色像素阵列图像(绿色子像素点亮)。 (a) LP-VA CF-LCoS; (b) CP-VA CF-LCoS
Fig. 8 Simulated color pixel array images of CF-LCoS microdisplays (green pixels is lighted).

(a) LP-VA CF-LCoS; (b) CP-VA CF-LCoS

由于液晶指向矢水平方位角的分布特性恰恰与线性偏振片的透射轴相吻合, 因此 LP-VA CF-LCoS 微显示器件中所观察到的黑色区域如图 8(a) 所示^[1,3]。当采用圆偏振光作为入射光源时, 边缘场效应导致的亮态子像素的内部黑线趋于消失, 只剩下黑线的交点, 如图 8(b) 所示。很明显, 边缘场效应导致的黑色区域大幅减小, 相应地, CF-LCoS 微显示器件的光效率和亮度都大幅提升。

通过观察还发现, 在 CP-VA CF-LCoS 微显示器件中, 边缘场效应导致的黑点位于整个像素的左下方, 这是因为液晶材料指向矢的预倾角指向了像素的左下方^[13]。为了进一步解释这一黑点产生的原因, 将液晶盒中间层液晶指向矢的水平分布状态绘制成图 9。黑点所产生的位置正是液晶指向矢方向变化最为剧烈的位置, 即边缘场效应最为强烈的

最后, 将得到的反射光谱转换为国际照明委员会(CIE)1931 色彩空间中的色坐标(X, Y, Z), 以有效地量化器件的色饱和度($R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$)

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65}. \quad (5)$$

利用标准 RGB(sRGB) 协议将像素阵列的光反射特性还原成彩色图像, 最终得到微型彩色像素中的彩色边缘效应图。

4 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的分析与优化

在 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的分析模拟过程中, 选用德国 Merck 公司的液晶材料 MLC-6608 (快轴折射率 $n_e = 1.5578$, 慢轴折射率 $n_o = 1.4748$, 介电常数 $\Delta\epsilon = -4.2$)。液晶盒厚度为 $3 \mu\text{m}$, 预倾角为 88° 。图 8 所示为模拟得到的 LP-VA CF-LCoS 和 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的彩色像素阵列图像(绿色子像素点亮)。

地方。当器件通电时, 黑点区域以外的液晶指向矢在边缘场效应作用下均在该平面内发生旋转。液晶指向矢的这种旋转不会对圆偏振光的状态产生任何影响, 因此, 这些区域表现为亮态。在黑点区域, 液晶指向矢在边缘场效应的作用下产生了垂直于中间平面的变化, 进而产生了在垂直方向上的分量。在这一垂直方向分量的作用下, 圆偏振光发生相位的变化, 进而无法通过检偏器, 因此该区域表现为暗态。

CP-VA CF-LCoS 微显示器件的亮态子像素具有较少的黑色区域, 因此该微显示器件具有更高的光学反射率。模拟得到的 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的光学反射率为 11.4% , 此值是 LP-VA CF-LCoS 微显示器的 2 倍^[1,7]。同时, 暗态子像素在 CP-VA 模式下也具有较小的彩色漏光。因此, CP-VA CF-LCoS 微显示器件在对比度、色饱和度等参

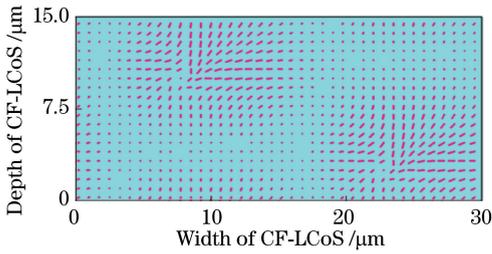


图9 液晶盒中间层液晶指向矢的水平分布图

Fig. 9 Horizontal distribution of liquid crystal director in middle of simulation structure

数上均保持适宜的数值。模拟得到的 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的绿色图像色坐标值为(0.237, 0.594),此值与 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的绿色图像色坐标值(0.237, 0.610)非常接近。

CP-VA CF-LCoS 微显示器件具有光反射率高的优点,如何将它应用于投影系统是一个新课题。现有的 CF-LCoS 投影系统一般采用单面板加偏振分光棱镜(PBS)的光学架构。PBS 的作用是将入射自然光分解成线偏振光进入单面板投影系统。如果要采用 CP-VA CF-LCoS 微显示器件作为显示面板,那么单面板投影系统结构中的 PBS 就要被分光棱镜(BS)所取代。BS 的作用是将入射自然光分解为两束相互垂直的自然光,并且两个圆偏振片应该分别放置于 BS 的入射面和出射面,作为系统的起偏器和检偏器。在这种架构中,由于一半的入射光没有经过 BS 而进入显示面板,最终导致系统的效率会降低一半。因此,尽管 CP-VA CF-LCoS 微显示器件具有光反射率高的优点,但还需要进一步研究出相应的投影系统架构,以利用这一优点。

5 结 论

利用三维光学模型,通过 LP-VA CF-LCoS 微显示器件的预倾角和像素尺寸等参数,对该器件的性能进行优化。同时,建立了 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的三维光学模型,以分析边缘场效应对该器件光学性能的影响。利用此三维光学分析工具分析并优化了 CP-VA CF-LCoS 微显示器件的光学性能。分析结果表明:该微显示器件具有光反射率高、色饱和度和高等优点,但还需要进一步研究出相应的投影系统架构,以利用这一优点,提高投影系统的整体效率。本文采用三维光学模型的分析方法,得到了与利用二维光学模型进行分析时不同的结论:优化只能使得边缘场效应导致的亮态子像素内部黑线减小,而不能彻底消除。

- [1] Li D, Zhang B L, Kwok H S. Three-dimensional optical modeling of vertical alignment mode color filter liquid-crystal-on-silicon micro displays[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(14): 140701.
李丹, 张宝龙, 郭海成. 垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模[J]. 物理学报, 2015, 64(14): 140701.
- [2] Yakovlev D A, Chigrinov V G, Kwok H S. Modeling and optimization of LCD optical performance [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [3] Zhang B L, Li D, Dai F Z, *et al.* Three-dimensional optical modeling of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(4): 040701.
张宝龙, 李丹, 戴凤智, 等. 彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 040701.
- [4] Zhang B L, Li D, Dai F Z, *et al.* Optimization of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays based on three-dimensional optical modeling[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1226001.
张宝龙, 李丹, 戴凤智, 等. 基于三维光学模型的彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的性能优化[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1226001.
- [5] Zhang B L, Li D, Dai F Z, *et al.* Influence of pixel size and color filter thickness on color fringing effect for color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2011, 26(6): 760-763.
张宝龙, 李丹, 戴凤智, 等. 彩色滤光膜硅覆液晶微显示器中像素尺寸及滤光膜厚度对彩色侧向场效应的影响[J]. 液晶与显示, 2011, 26(6): 760-763.
- [6] Huang H C, Zhang B L, Peng H J, *et al.* Processes, characterizations, and system applications of color-filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [J]. Journal of the Society for Information Display, 2006, 14(5): 499-508.
- [7] Zhang B L, Kwok H S, Huang H C. Three-dimensional optical modeling and optimizations of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(12): 123103.
- [8] Wen C H, Gauza S, Wu S T. High-contrast vertical alignment of lateral difluoro-terphenyl liquid crystals [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(19): 191909.
- [9] Zhang B L, Kwok H S, Huang H C, *et al.* Optical analysis of vertical aligned mode on color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplay [C] // International

- Conference of Society for Information Display, May 22-27, Boston, Massachusetts, USA. [S.l.:s.n.], 2005: 1435-1438.
- [10] Zhang S, Lu M, Yang K H. Direct observation of disclination evolution in vertically aligned liquid crystal light valves [C] // International Conference of Society for Information Display, May 16-18, Long Beach, California, USA. [S.l.: s.n.], 2000: 898-901.
- [11] Iwamoto Y, Iimura Y. Transmittance enhancement for randomly aligned liquid crystal displays with circular polarizers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(Part 2, No. 12A): L1383-L1385.
- [12] Iwamoto Y, Iimura Y. Transmitted light enhancement of electric-field-controlled multidomain vertically aligned liquid crystal displays using circular polarizers and a cholesteric liquid crystal film [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(Part 2, No. 1A/B): L51-L53.
- [13] Fan Chiang K H, Zhu X Y, Wu S T, *et al.* Eliminating fringing field effects of vertically aligned liquid-crystal-on-silicon by using circularly polarized light [C] // International Conference of Society for Information Display, May 22-27, Boston, Massachusetts, USA. [S.l.: s.n.], 2005: 1435-1438.