

文章编号: 1007-2780(2011)06-0760-04

# 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

张宝龙<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 戴凤智<sup>1</sup>, 杨世凤<sup>1</sup>, 郭海成<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学 电子信息与自动化学院, 天津 300222, E-mail: eezbl@tust.edu.cn;

2. 香港科技大学 显示技术研究中心, 香港 九龙)

**摘要:** 应用彩色滤光膜硅覆液晶(Color Filter Liquid Crystal on Silicon, CF-LCoS)微显示器件的三维光学模型;研究了像素尺寸和彩色滤光膜厚度对彩色侧向场的影响。这两个参数可以影响微显示器件的色纯度、光反射率以及对比度等性能参数。对于特定的应用,需要考虑器件所有的性能参数要求,才能对像素尺寸和彩色滤光膜厚度进行优化。

**关键词:** 彩色滤光膜;硅覆液晶;微显示;三维;光学建模;优化

中图分类号: TN27

文献标识码: A

DOI: 10.3788/JYXS20112606.0760

## Influence of Pixel Size and Color Filter Thickness on Color Fringing Effect for Color Filter Liquid-Crystal-on-Silicon Microdisplays

ZHANG Bao-long<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, DAI Feng-zhi<sup>1</sup>, YANG Shi-feng<sup>1</sup>, KWOK Hoi-sing<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology,

Tianjin 300222, China, E-mail: eezbl@tust.edu.cn;

2. Center for Display Research, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

**Abstract:** The relation of color fringing field with the pixel size and thickness of color filters was researched in this paper, and the study was based on the three-dimensional (3D) optical modeling we established before. These two parameters may affect the color, reflectivity, contrast, and other properties of the CF-LCoS microdisplays. The optimization of pixel size and thickness of color filters should be compromised among these display properties for specific applications.

**Key words:** color filter; LCoS; microdisplay; three-dimensional; optical modeling; optimization

## 1 引言

彩色滤光膜硅覆液晶(Color Filter Liquid-Crystal-on-Silicon, CF-LCoS)微显示器是一种新型的微显示器件<sup>[1-2]</sup>。它将彩色滤光膜集成在传统的LCoS器件上,使微显示器件本身具备了全彩色显示的条件。为了在有限的区域中获得更高

的显示分辨率,像素尺寸需要尽可能减小。随着像素尺寸的减小,彩色侧向场效应便会凸显。它会降低单色显示时的色纯度以及亮度。我们可以通过减小彩色滤光膜厚度的方式降低彩色侧向场效应的影响。然而,随着滤光膜厚度的减小,其滤光能力将会下降,进而影响系统的对比度和色纯度。因此,如何合理选择像素尺寸以及彩色滤光

收稿日期: 2011-05-20; 修订日期: 2011-06-20

基金项目: 天津科技大学引进人才基金(No. 922610001001)

作者简介: 张宝龙(1976-),男,天津人,博士,教授,主要从事现代显示技术方面的研究。

膜厚度, 成为 CF-LCoS 器件性能优化的重点。这两个参数的合理选择将使器件在显示更多信息量的同时, 不会过多牺牲色纯度、对比度和单色显示亮度等性能参数。

在前期研究工作中, 我们建立了 CF-LCoS 微显示器件的三维光学模型, 并通过实验验证了该模型的正确性<sup>[3-4]</sup>。有了这个三维光学模型, 我们可以更有效地分析像素阵列中的彩色漏光现象, 并相应地优化彩色边缘电场效应。本文将以 CF-LCoS 微显示器件的三维光学模型为基础, 通过对像素尺寸和彩色滤光膜厚度的选取, 对 CF-LCoS 微显示器件的彩色漏光现象进行模拟及优化。

## 2 三维光学模型

三维模型的光学分析过程分为 3 个部分: 首先是液晶器件的机电特性分析, 在矩形网格中, 通过求解泊松方程:

$$\nabla[\epsilon(x, y, z) \nabla V(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

和边缘条件连续方程<sup>[5-6]</sup>

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{d}{d_j} \left[ \frac{\partial(F_s - F_c)}{\partial(\partial n_i / \partial j)} \right] - \frac{\partial(F_s - F_c)}{\partial n_i} \quad (2)$$

对液晶材料指向矢参数进行数值计算; 然后采用扩展琼斯矩阵<sup>[7]</sup> (extended Jones matrix):

$$\begin{bmatrix} E_{po} \\ E_{so} \end{bmatrix} = P_o \cdot M(-\theta, \phi, -\Delta\varphi) \cdot D_{CF \rightarrow LC} \cdot P_{CF} \cdot D_{LC \rightarrow CF} \cdot M(\theta, \phi, \Delta\varphi) \cdot P_i \cdot \begin{bmatrix} E_{pi} \\ E_{si} \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算彩色像素在可见光谱范围内的光反射率:

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

最后, 将得到的反射光谱转换为 CIE1931 彩色空间中的色坐标, 这样可以有效地考量器件的色纯度。并利用标准 RGB(sRGB)<sup>[8]</sup> 协议将像素阵列

$$\begin{bmatrix} G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.241 0 & -1.537 4 & -0.498 6 \\ -0.969 2 & 1.876 0 & 0.041 6 \\ 0.055 6 & -0.204 0 & 1.05 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65} \quad (5)$$

的光反射特性还原成彩色图像。这样就可以得到微型彩色像素中的彩色边缘效应图。图 1 所示为实验观察到的和模拟得到的彩色像素阵列图像。应用这种三维模型, 利用仿真模式对 CF-LCoS 微显示器件性能进行模拟及优化。

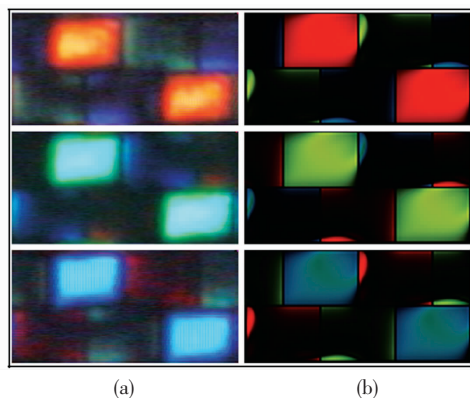


图 1 (a) 实验观察到的和 (b) 模拟得到的彩色像素阵列图像

Fig. 1 (a) The observed and (b) simulated color pixels of the CF-LCOS microdisplay

## 3 像素尺寸的影响

在 CF-LCoS 微显示器件中, 红、绿、蓝 3 个子像素排列成“品”字形组合成一个显示像素。其物理分辨率应为单色 LCoS 器件分辨率的 3 倍。为了在单位面积的显示器件中尽可能地获得高分辨率, 像素尺寸需要尽可能地减小。然而, 随着像素尺寸的减小, 彩色侧向场效应便会凸显。我们应用三维光学模型对不同像素尺寸的彩色侧向场效应进行分析, 在分析过程中均采用混合型扭曲向列相 (Mixed Twisted Nematic, MTN)<sup>[9]</sup> 液晶模式。图 2 所示为 CF-LCoS 微显示器件在像素尺寸分别为  $9 \mu\text{m}$ ,  $12 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$  时的空间反射率模拟图。

通过观察发现, 在不同像素尺寸中, 暗态子像素点中的彩色漏光程度大致相同。然而, 当像素尺寸较小时, 彩色漏光面积占像素总面积的百分比会上升。因此, 当仅有绿色像素被点亮时, 绿色的色坐标<sup>[10]</sup> 会由  $15 \mu\text{m}$  像素尺寸时的 (0.243, 0.601) 降低到  $12 \mu\text{m}$  像素尺寸时的 (0.233, 0.587) 和  $9 \mu\text{m}$  像素尺寸时的 (0.231, 0.577)。同理模拟了当红色或蓝色像素被单独点亮时, 不同像素尺寸时的显示色纯度。红色和蓝色的色坐标分别由  $15 \mu\text{m}$  像素尺寸时的 (0.641, 0.308) 和 (0.136, 0.182) 降低到  $12 \mu\text{m}$  时的 (0.615, 0.310) 和 (0.139, 0.175), 以及  $9 \mu\text{m}$  时的 (0.597, 0.309) 和 (0.141, 0.172)。

像素尺寸的减小不仅使 CF-LCoS 微显示器

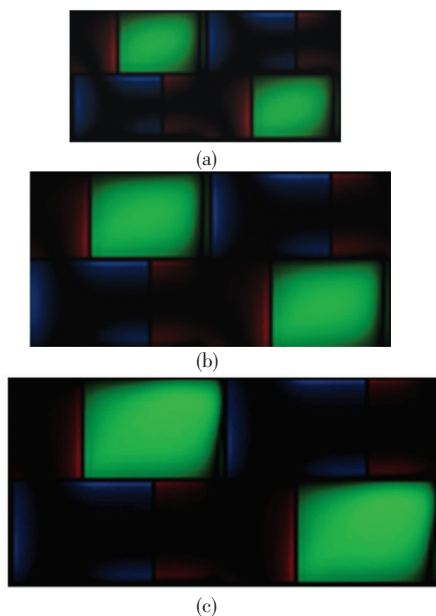


图 2 像素尺寸分别为 (a)  $9\ \mu\text{m}$ 、(b)  $12\ \mu\text{m}$  和 (c)  $15\ \mu\text{m}$  时的空间反射率模拟图。

Fig. 2 Simulated spatial optical reflectance of the microdisplay with pixel size of (a)  $9\ \mu\text{m}$ , (b)  $12\ \mu\text{m}$  and (c)  $15\ \mu\text{m}$ .

件的色纯度有所降低,亮态子像素点的显示面积也会相应下降,导致单色显示时的峰值反射率相应下降。以绿色像素单独点亮为例,其峰值反射率由  $15\ \mu\text{m}$  像素尺寸时的  $11.9\%$  降低到  $12\ \mu\text{m}$  时的  $8.4\%$  和  $9\ \mu\text{m}$  时的  $6.1\%$ 。图 3 所示为不同像素尺寸的单色显示反射率模拟曲线图。随着像素尺寸的减小,红色和蓝色单独显示时的峰值反射率均有相同程度的降低。然而,值得注意的是,当像素阵列被完全点亮时,其白色画面亮度保持不变。这是因为当红、绿、蓝三色子像素被相同电

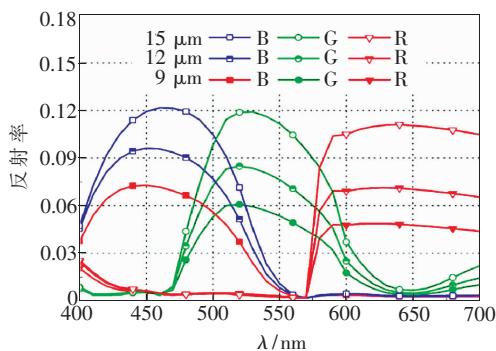


图 3 不同像素尺寸时的单色显示反射率模拟曲线图

Fig. 3 Simulated reflectivity of a single color image with different pixels size

压同时点亮时,彩色侧向场效应将不复存在,其对显示画面色纯度及亮度的影响也随之消失。因此,可以得出结论,像素尺寸的减小仅会影响单色显示时的亮度及色饱和度,而不会影响其白色画面的亮度。

#### 4 彩色滤光膜厚度的影响

像素尺寸的减小主要影响侧向电场和单色显示时的色纯度,但并不影响彩色滤光膜和液晶器件界面垂直方向的电场,因此,不会影响系统的对比度。然而,彩色滤光膜厚度的变化将对侧向和垂直方向电场都产生影响。彩色滤光膜厚度的减小,将使滤光膜的滤光能力降低,进而使系统的色纯度变差;但它可以降低彩色滤光膜上的电压,从而增加在液晶器件上的电压,最终使得显示器件的对比度提高。CF-LCoS 显示器件的色纯度主要取决于彩色漏光和对对比度,因此,必然存在一个最优的彩色滤光膜厚度,使 CF-LCoS 的色纯度和对比度两个性能参数得以兼顾,使器件性能达到最优。

CF-LCoS 微显示器件是反射式液晶器件,入射光线经过彩色滤光膜后,会由像素电极反射再次经过彩色滤光膜。因此,彩色滤光膜的厚度应为透射式液晶器件的一半。在之前的研究工作中,我们将彩色滤光膜的厚度设计为  $0.75\ \mu\text{m}$ ,研发出了该厚度下的 CF-LCoS 微显示器件制程<sup>[1-2]</sup>。在之前的所有三维光学模型的分析中,我们均设定彩色滤光膜厚度为  $0.75\ \mu\text{m}$ 。在本文的工作中,我们将彩色滤光膜的厚度假定为  $0.45, 0.6, 0.75, 0.9, 1.05\ \mu\text{m}$ ,并利用三维光学模型对 CF-LCoS 微显示器件的色纯度特性进行分析。

图 4 所示为 MTN 液晶模式的 CF-LCoS 微显示器件在不同彩色滤光膜厚度时的单色显示反射率模拟曲线图。从图中可以看出,反射率随着滤光膜厚度的增加而按比例下降。绿色图像的峰值反射率由  $0.45\ \mu\text{m}$  时的  $14.4\%$  降低到  $0.75\ \mu\text{m}$  时的  $13.0\%$  和  $1.05\ \mu\text{m}$  时的  $11.7\%$ 。

图 5 是 MTN 液晶模式的 CF-LCoS 微显示器件在不同彩色滤光膜厚度时器件色纯度的变化趋势图。通过分析得出,器件的色纯度由  $0.45\ \mu\text{m}$  时的  $36\%$  NTSC 增加到  $0.6\ \mu\text{m}$  时的  $46\%$  NTSC 和  $0.75\ \mu\text{m}$  时的  $51\%$  NTSC。然而,当我

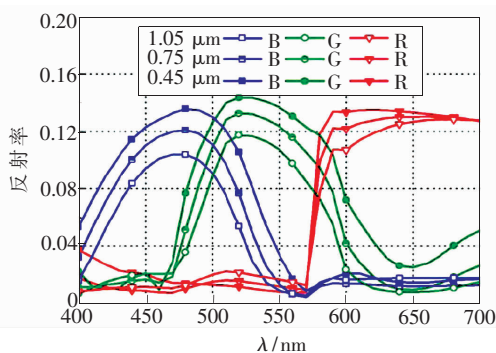


图 4 不同彩色滤光膜厚度时的单色显示反射率模拟曲线  
Fig. 4 Simulated reflectivity of a single color image with different thickness of color filters

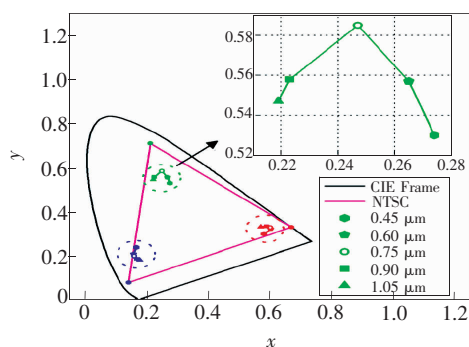


图 5 不同彩色滤光膜厚度时的器件色纯度变化趋势  
Fig. 5 Simulated color of a color pixel array in the CIE 1931 color space with different thickness of color filters

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Huang H C, Zhang B L, Kwok H S, *et al.* Color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [C]//*Proceedings of the 43rd SID*, Boston, USA; SID, 2005:880-885.
- [ 2 ] 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]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2006, 14(5):499-503.
- [ 3 ] Zhang B L, Peng H J, Huang H C, *et al.* Three-dimensional optical analyses of fringing effect in small color pixels [C]//*Proceedings of the 43rd SID*, Boston, USA; SID, 2005: 1302-1306.
- [ 4 ] Zhang B L, Kwok H S, Huang H C. Three-dimensional optical modeling and optimizations of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(12): 123103(1-9).
- [ 5 ] Anderson J E, Watson P E, Bos P J. *LC3D: Liquid Crystal Display 3-D Director Simulator Software* [M]. Norwood, MA: Artech House, 2001.
- [ 6 ] Lien A. Simulation of three - dimensional director structures in twisted nematic liquid crystal displays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(10): 1079-1081.
- [ 7 ] Gu C, Yeh P. Extended Jones matrix method. II [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, 10(5):966-973.
- [ 8 ] Stokes M, Anderson M, Chandrasekar S, *et al.* A standard default color space for the internet: sRGB [EB/OL]. [1996-11-05]. <http://www.color.org/sRGB.html>.
- [ 9 ] Wu S T, Wu C S. Mixed-mode twisted nematic liquid crystal cells for reflective displays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(14):1455-1457.
- [10] Wyszecki G, Stiles W S. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* [M]. New York: Wiley, 1982.

们进一步增加彩色滤光膜的厚度时,器件的色纯度由  $0.75 \mu\text{m}$  时的 51% NTSC 增加到  $0.9 \mu\text{m}$  时的 48% NTSC 和  $1.05 \mu\text{m}$  时的 43% NTSC。当彩色滤光膜厚度增加时,其与液晶器件的分压增大,使得液晶器件无法在正常的驱动范围内对入射光进行调制,进而降低了液晶器件的对比度。例如,当彩色滤光膜厚度为  $1.05 \mu\text{m}$  时,有 45% 的电压降落在彩色滤光膜上,这使得落在液晶器件上的电压不足以对入射光进行完全调制,从而使得液晶器件的对比度下降,系统的色纯度也随之下降。

## 5 结 论

利用三维光学模型进行模拟仿真,分析了像素尺寸和彩色滤光膜厚度与彩色侧向场之间的关系。当像素尺寸减小时,器件的单色色纯度会随之下降。当彩色滤光膜厚度增加时,色纯度会随之上升;但当彩色滤光膜厚度超过  $0.75 \mu\text{m}$  后,其色纯度会由于系统对比度的下降而降低。值得注意的是,当我们采用低漏光液晶模式时,器件在  $9 \mu\text{m}$  像素尺寸时的色纯度仍可维持在 54% NTSC,说明 CF-LCoS 微显示器具有高分辨率显示的能力。