

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

张宝龙¹ 李 丹¹ 戴凤智¹ 杨世凤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(CF-LCoS)微显示器件的三维光学模型对 CF-LCoS 的性能进行优化。通过改变像素排列结构、液晶取向层的摩擦结构以及液晶器件模式等条件优化侧向电场效应,抑制彩色漏光现象。通过优化,像素尺寸为 15 μm 的 CF-LCoS 微显示器件,其色纯度可以达到美国国家电视系统委员会(NTSC)色域范围的 63%。结果表明,基于三维光学模型的 CF-LCoS 微显示器件的性能优化可以有效抑制侧向电场效应诱导产生的彩色漏光现象,大幅提升器件的色纯度参数。

关键词 视觉光学;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 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1226001

Optimization of Color Filter Liquid-Crystal-on-Silicon Microdisplays Based on Three-Dimensional Optical Modeling

Zhang Baolong¹ Li Dan¹ Dai Fengzhi¹ Yang Shifeng¹ Kwok Hoising²

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

² Center for Display Research, the Hong Kong University of Science and Technology,
Kowloon, Hong Kong, China

Abstract With the three-dimensional (3D) optical analysis as a tool, the optimization of the fringing field effect in the color filter liquid-crystal-on-silicon (CF-LCoS) microdisplays is obtained by changing pixel arrangement, rubbing direction, and liquid crystal (LC) mode. The color purity of the CF-LCoS microdisplays could attain 63% national television system committee (NTSC) level for a typical pixel size of 15 μm . With the optimization, the color fringing effect of CF-LCoS is minimized and the color purity of the device is increased.

Key words visual optics; color filter; liquid-crystal-on-silicon; microdisplay; three-dimensional; optical modeling; optimization

OCIS codes 260.1440; 260.5430; 330.1690

1 引 言

彩色滤光膜硅覆液晶(CF-LCoS)微显示器是一种新型的微显示器件^[1,2]。它将彩色滤光膜集成在传统的 LCoS 器件上,使微显示器件本身就具备了全彩色显示的条件。在以前的研究工作中,本文建立了 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^[3,4]。基于此三维光学

模型,可以更为有效地分析像素阵列中的彩色漏光现象,并对彩色边缘电场效应进行相应的优化。影响彩色边缘电场效应的因素有很多,包括彩色像素阵列的排列结构、液晶取向层的摩擦结构以及液晶器件模式。当彩色像素阵列排列不同时(例如,排列成条形或者“品”字形),它会对彩色边缘电场效应的扩散产生不同程度的影响。当改变液晶取向层的摩

收稿日期: 2011-05-12; 收到修改稿日期: 2011-07-02

基金项目: 天津科技大学引进人才基金(922610001001)资助课题。

作者简介: 张宝龙(1976—),男,博士,教授,主要从事现代显示技术方面的研究。E-mail: eezbl@tust.edu.cn

擦结构时,彩色漏光现象可以围绕像素的中心轴线产生旋转,因此,一个适当的摩擦结构也可以优化彩色边缘电场效应。适当选取液晶器件模式是优化彩色边缘电场效应的最有效途径,通过选取适当的液晶器件模式,可以有效地抑制侧向电场效应诱导产生的彩色漏光现象。

本文将以 CF-LCoS 微显示器件的三维光学模型为基础,通过对彩色像素阵列的排列结构、液晶取向层的摩擦结构以及液晶器件模式的选取,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三个部分。首先是液晶器件的机电特性分析,它在矩形网格中,通过求解泊松方程

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

和边缘条件连续方程^[5,6]

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

对液晶材料指向矢参数进行数值计算,其中 $\boldsymbol{\epsilon}(x, y, z)$ 是液晶器件介电常数张量, $V(x, y, z)$ 是电势分布, γ 是旋转粘度系数, F_s 和 F_e 分别是弹性和静电能量密度函数, n_i 和 n_j 分别是液晶指向矢 n 投影到 i 轴和 j 轴上的分量;然后采用扩展琼斯矩阵^[7]

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

计算彩色像素在可见光谱范围内的光反射率

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

其中 $P_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 和 $P_o = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 分别是起偏器和检偏器的矩阵表达式; E_{si} 和 E_{pi} 分别是是输入 s 和 p 向量的电场幅度; E_{so} 和 E_{po} 分别是输出 s 和 p 向量的电场幅度; $M(-\theta, \phi, -\Delta\varphi)$ 和 $M(\theta, \phi, \Delta\varphi)$ 分别是光线在液晶器件和镜像液晶器件中的传输矩阵, P_{CF} 是光线在彩色滤光膜材料中的传输特性矩阵, $D_{CF \rightarrow LC}$ 和 $D_{LC \rightarrow CF}$ 分别是彩色滤光膜与液晶器件之间的各向同性介质界面矩阵和液晶器件与彩色滤光膜之间的各向同性介质界面矩阵。最后,将得到的反射光谱转换为 CIE(国际照明委员会)1931 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)^[8]

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

协议将像素阵列的光反射特性还原成彩色图像,进而得到微型彩色像素中的彩色边缘效应图。图 1 所示是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,可以利用仿真模式对 CF-LCoS 微显示器件进行性能模拟及优化。

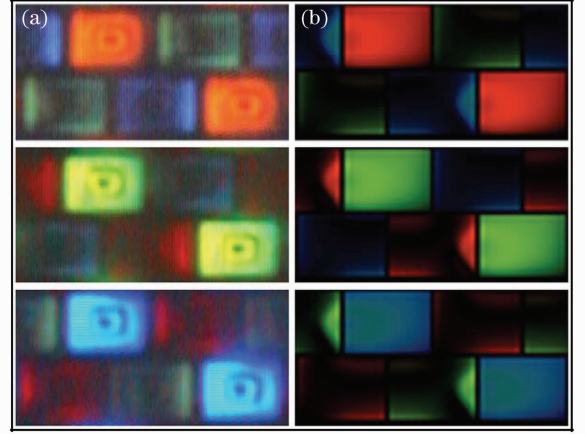


图 1 (a)实验观察到的和(b)模拟得到的彩色像素阵列图像

Fig. 1 (a) Observed and (b) simulated color pixels of the mixed twisted nematic (MTN) CF-LCoS microdisplay

3 CF-LCoS 微显示器件的性能优化

3.1 彩色像素阵列的排列结构

将彩色像素阵列分别排列成条形和“品”字形结构,并且应用三维光学模型分别对这两种结构进行模拟分析。这两种像素结构的 CF-LCoS 器件的像素尺寸都是 $15 \mu\text{m}$,且都采用混合型扭曲向列相(MTN)^[9]液晶模式。为了使不同结构的像素阵列具有相同的像素尺寸($15 \mu\text{m}$),在条形像素结构中,其彩色子像素的尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$;而在“品”字形像素结构中,其彩色子像素的尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$ 。假定在两种结构中,彩色子像素的间距均为 $0.5 \mu\text{m}$ 。图 2 所示是条形和“品”字形像素结构的空问反射率模拟图。在这两种结构中,均仅将绿色子像素点亮,以便分析单色显示时的器件色纯度。

通过观察,发现在两种像素结构中,大部分彩色漏光发生在蓝色子像素中;而在红色子像素中,较少发现彩色漏光。然而,更为明显的是,条形结构中的彩色漏光程度要高于“品”字形像素结构。在条形像素结构中,本应是暗态的蓝色子像素,有近 30% 的

像素面积被侧向边缘电场“误”点亮；而在“品”字形像素结构中，被侧向边缘电场“误”点亮的暗态蓝色子像素区域的面积要小得多。通过模拟，得到当仅有绿色子像素被点亮时，条形像素结构的色坐标^[10~13]为(0.224, 0.492)，而“品”字形像素结构的色坐标为(0.241, 0.560)。进而计算优化前后的色坐标与美国国家电视系统委员会(NTSC)所对应的绿色顶点的色差值。经过计算，优化前的色差值为0.2184，而优化后的色差值为0.1532。因此，可以判定“品”字形像素结构比条形像素结构的绿色更接近 NTSC 标准。同理，分别模拟了当红色或蓝色像

素单独点亮时，不同像素排列结构的色纯度。当仅有红色子像素被点亮时，条形像素结构的色坐标为(0.572, 0.351)，而“品”字形像素结构的色坐标为(0.601, 0.325)，优化前后的色坐标与 NTSC 红色顶点的色差值分别为 0.1002 和 0.0709；当仅有蓝色子像素被点亮时，条形像素结构的色坐标为(0.179, 0.219)，而“品”字形像素结构的色坐标为(0.157, 0.205)，优化前后的色坐标与 NTSC 红色顶点的色差值分别为 0.1444 和 0.1273。可见，“品”字形像素结构同条形像素结构相比，其红色及蓝色均更接近 NTSC 标准。

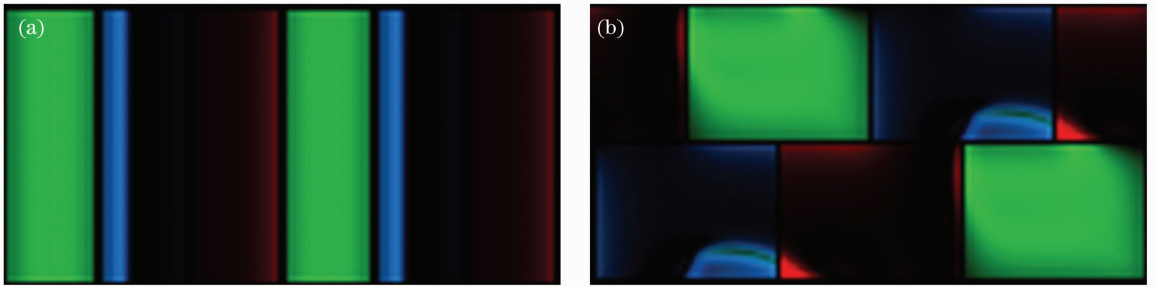


图 2 绿色子像素点亮时的(a)条形和(b)“品”字形像素结构的空间反射率模拟图

Fig. 2 Simulated spatial optical reflectance of (a) strip and (b) delta pixels when the green pixels are turned on

3.2 液晶取向层的摩擦结构

长方形或正方形的子像素具有有限的像素边缘和像素面积，液晶取向层相对于子像素边缘的摩擦结构在有限的像素面积上会产生不同程度的彩色漏光。因此，必定存在一个最优摩擦结构，它可以使彩色漏光现象最小化。然而，摩擦结构与液晶器件模式和光学系统的光轴存在对应关系。因此，摩擦角度不可以是任意的最优角度，否则便无法得到正常

的水平或垂直排列图像。基于这个考虑，对于一个 CF-LCoS 器件，仅有两种摩擦结构可供选择，它们之间相互垂直。

图 3(a)所示为图 2(b)中“品”字形像素的摩擦结构。相对于子像素的长边，像素阵列的摩擦取向为逆时针 45°，而玻璃面板的摩擦取向为顺时针 45°。将这个摩擦结构逆时针旋转 90°，并用三维光学模型对这一变换结构进行模拟，如图 3(b)所示。

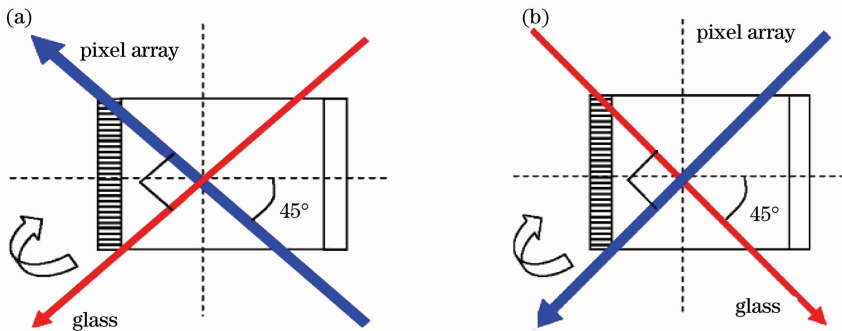


图 3 (a)初始摩擦结构和(b)优化后的摩擦结构

Fig. 3 (a) Normal and (b) optimized rubbing schemes

图 4 为同一“品”字形像素结构在具有如图 3 所示的两种不同摩擦结构时的空间反射率模拟图。同样首先分析当仅有绿色子像素被点亮，而红色或蓝

色像素为暗态时的绿色图像。可以明显看出，当摩擦方向旋转 90°时，彩色漏光从暗态像素的长边向暗态像素的短边转移。在图 4(a)中，彩色漏光更多

地出现在暗态像素的长边一侧,而在图 4(b)中,彩色漏光更多地出现在暗态像素的短边一侧。这就导致图 4(b)中彩色漏光面积相应地减小。通过实验发现,当彩色漏光从暗态像素的长边移到暗态像素的短边时,绿色坐标从(0.241, 0.560)变化为(0.247,

0.585),其色差值由 0.1532 降低到 0.1304。相似地,红色坐标从(0.601, 0.325)变化为(0.602, 0.310),其色差值由 0.0709 降低到 0.0692;蓝色坐标从(0.157, 0.205)变化为(0.148, 0.207),其色差值由 0.1273 降低到 0.1262。优化使颜色更接近于 NTSC 标准。

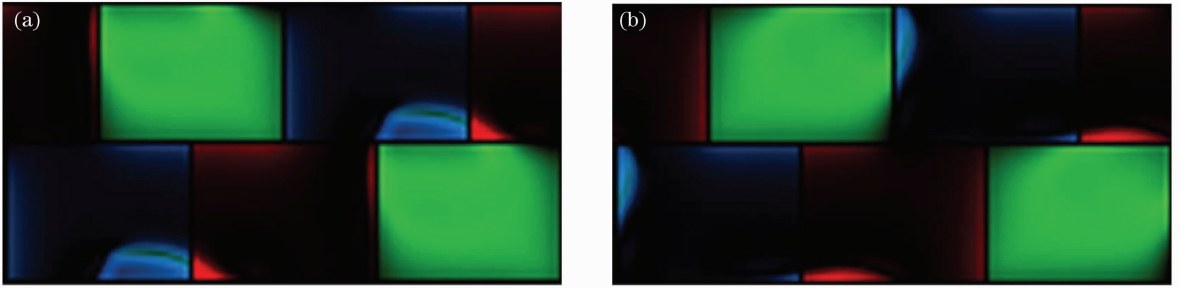


图 4 同一“品”字形像素结构在(a)初始摩擦结构和(b)优化摩擦结构时的空间反射率模拟图

Fig. 4 Simulated spatial optical reflectance of the delta pixels in (a) normal and (b) optimized rubbing schemes

3.3 液晶模式

除了 MTN 液晶模式之外,还有另外一种适合于 CF-LCoS 微显示器件的混合型扭曲向列相及双折射(MTB)^[14]液晶模式。通过对 MTB 液晶模式进行系统研究,发现 MTB 液晶模式具有非常低的

彩色漏光。图 5 所示为经过优化后的 MTN 液晶模式和一种低漏光 MTB 液晶模式的空间反射率模拟图。其中 MTB 液晶模式的扭曲角度为 80°,起偏角度为 18°,预倾角度为 2°,并且具有 0.25 的光学延迟量。

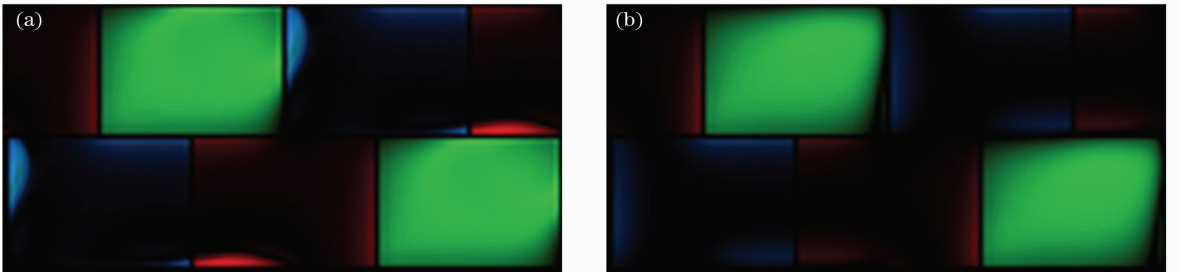


图 5 (a)经过优化后的 MTN 液晶模式和(b)低漏光 MTB 液晶模式的空间反射率模拟图

Fig. 5 Simulated spatial optical reflectance of (a) the optimized MTN mode and (b) a low-leakage MTB mode

同样,适当设计 MTB 液晶模式的摩擦结构,使其彩色漏光出现在像素的短边一侧。当仅有绿色子像素被点亮时,绿色坐标由优化 MTN 液晶模式的(0.247, 0.585)进一步变化为漏光 MTB 液晶模式的(0.243, 0.603),其色差值由 0.1304 降低到 0.1120。相似地,红色坐标从(0.602, 0.310)变化为(0.641, 0.308),其色差值由 0.0692 降低到 0.0364;蓝色坐标从(0.148, 0.207)变化为(0.136, 0.182),其色差值由 0.1262 降低到 0.1021。优化使颜色更接近于 NTSC 标准。

由图 5 可以观察到,在低漏光 MTB 液晶模式中,绿色像素的亮态区域面积略有缩小。其直接结果就是绿色画面的峰值反射率由 MTN 液晶模式的 13%降低到低漏光 MTB 液晶模式的 11.9%,如图 6 所示。也就是说,单色画面色纯度的提高是建

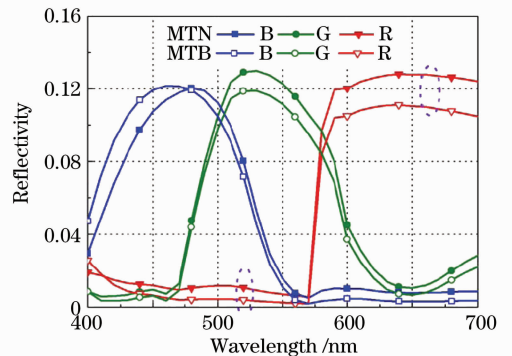


图 6 彩色 MTN 和 MTB 液晶器件的单色反射率模拟曲线

Fig. 6 Simulated reflectivity of the color images for both the color MTN and MTB LC cells

立在轻微降低单色画面亮度的基础之上的。在空间上,由于每一个单色显示仅为白色显示的 1/3,所以

图 6 中的 CF-LCoS 微显示器件的单个峰值反射率分别为红色 11.9%，绿色 12.2% 和蓝色 11.1%。然而，值得注意的是，当像素阵列被完全点亮时，其白色画面亮度在 MTN 和 MTB 液晶模式中基本相同，如图 7 所示。这是因为，当红、绿、蓝三色子像素被相同电压同时点亮时，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。图 7 中所示的白场显示反射率要远高于图 6 中的单色显示反射率，也是由于白场显示时，彩色侧向场效应消失的原因。

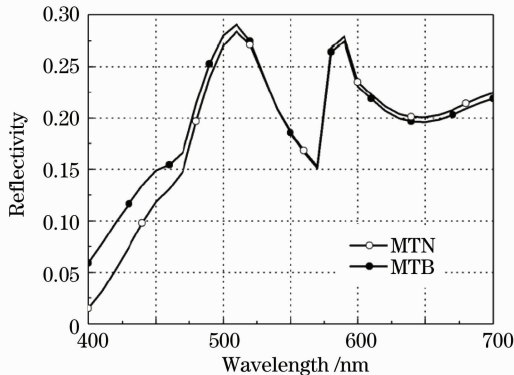


图 7 彩色 MTN 和 MTB 液晶器件的白场反射率模拟曲线

Fig. 7 Simulated reflectivity of the white image for both the color MTN and MTB LC cells

当以标准光源 D65 作为 CF-LCoS 微显示器件的照明光源时，将白场显示的整体反射率定义为

$$R_{D65} = \frac{\int_{400}^{700} R_{\text{white}}(\lambda) L_{D65}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{700} L_{D65}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中 $R_{\text{white}}(\lambda)$ 为图 7 中得到的白场画面光反射率曲线， $L_{D65}(\lambda)$ 是经过归一化的 D65 辐射光谱曲线， $V(\lambda)$ 是视亮度函数。经过计算，彩色 MTN 和 MTB 液晶器件的白场反射率基本相同，分别为 22% 和 22.1%。

图 8 所示为色纯度优化趋势图。器件的色纯度从条形像素结构的 32% NTSC，优化至“品”字形像素结构的 47% NTSC；进而，通过优化液晶取向层的摩擦结构，将色纯度优化至 56% NTSC；最后，采用低漏光 MTB 液晶模式后，色纯度优化至 63% NTSC。

4 结 论

利用三维光学模型进行模拟仿真，并通过改变

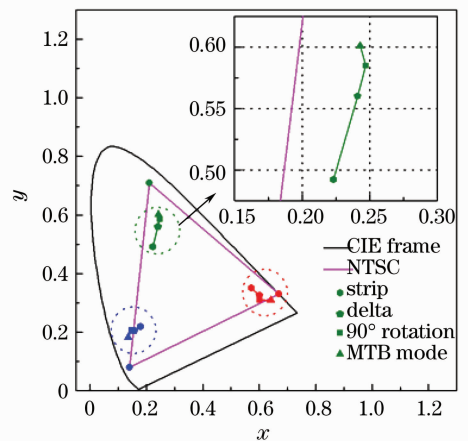


图 8 色纯度优化趋势图

Fig. 8 Improvement of color with respect to the pixel arrangement, rubbing direction, and LC mode in the CIE 1931 color space

CF-LCoS 微显示器件的像素排列结构、液晶取向层的摩擦结构以及液晶模式等条件优化器件的侧向边缘电场效应，进而提高了器件的色纯度。结果显示，这个优化过程没有以大幅牺牲器件的单色显示亮度为代价。

参 考 文 献

- 1 H. C. Huang, B. L. Zhang, H. S. Kwok *et al.*. Color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [C]. Proceedings of the 43rd SID, 2005. 880~883
- 2 H. C. Huang, B. L. Zhang, H. J. Peng *et al.*. Processes, characterizations, and system applications of color-filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2006, **14**(5): 499~508
- 3 B. L. Zhang, H. J. Peng, H. C. Huang *et al.*. Three-dimensional optical analyses of fringing effect in small color pixels [C]. Proceedings of the 43rd SID, 2005. 1302~1305
- 4 B. L. Zhang, H. S. Kwok, H. C. Huang. Three-dimensional optical modeling and optimizations of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(12): 123103
- 5 J. E. Anderson, P. E. Watson, P. J. Bos. LC3D: Liquid Crystal Display 3-D Director Simulator Software [M]. Norwood: Artech House, 2001. 1~15
- 6 A. Lien. Simulation of three-dimensional director structures in twisted nematic liquid crystal displays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1079~1081
- 7 C. Gu, P. Yeh. Extended Jones matrix method II [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(5): 966~973
- 8 M. Stokes, M. Anderson, S. Chandrasekar *et al.*. A standard default color space for the internet-sRGB [OL]. [2011-10-31]. <http://www.color.org/sRGB.html>
- 9 S. T. Wu, C. S. Wu. Mixed-mode twisted nematic liquid crystal cells for reflective displays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(11): 1455~1457
- 10 G. Wyszecki, W. S. Stiles. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae [M]. New York: Wiley, 1982
- 11 Lu Chenguang. Decoding model for color vision and its

- verifications [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(2): 158~163
鲁晨光. 色觉的译码模型及其验证[J]. 光学学报, 1989, **9**(2): 158~163
- 12 Lin Yue, Ye Liewu, Liu Wenjie *et al.*. Optimization algorithm of correlated color temperature for LED light sources by dichotomy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2791~2794
林 岳, 叶烈武, 刘文杰 等. 二分法优化计算 LED 光源相关色温[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2791~2794
- 13 Dai Caihong, Yu Jialin, Yu Jing *et al.*. Uncertainty analysis of the colour temperature and the correlated colour temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 547~552
代彩红, 于家琳, 于 靖 等. 颜色温度和相关色温的不确定度评定方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 547~552
- 14 J. Chen, P. W. Cheng, S. K. Kwok *et al.*. Generalized mixed mode reflective liquid crystal displays for three-panel color projection applications [C]. Proceedings of the 37th SID, 1999. 754~757

栏目编辑:何卓铭