

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

李丹 张宝龙 郭海成

Three-dimensional optical modeling of vertical alignment mode color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays

Li Dan Zhang Bao-Long Kwok Hoising

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 140701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.140701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全光固体条纹相机的理论及其静态实验研究

[Theoretical and static experiment research on all optical solid state streak camera](#)

物理学报.2014, 63(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060702>

彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模

[Three-dimensional optical modeling of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays](#)

物理学报.2012, 61(4): 040701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.040701>

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*

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)(香港科技大学显示技术研究中心, 香港九龙)

(2015年1月25日收到; 2015年3月6日收到修改稿)

针对垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器件中的微型彩色像素建立了三维光学模型. 首先, 对彩色液晶器件的机电特性进行了分析; 其次, 利用扩展琼斯矩阵计算出器件的光反射率; 最后, 采用标准 RGB 协议将所研究的垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器件中各像素点的光反射特性还原成彩色图像. 用上述过程所建立的三维光学模型进行了垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器件的光学特性研究, 并与实验数据进行了比较. 比较结果显示, 模拟得到的垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器件的光学特性与实验结果非常符合.

关键词: 彩色滤光膜, 硅覆液晶, 垂直向列型, 光学建模

PACS: 07.07.Hj

DOI: 10.7498/aps.64.140701

1 引言

在之前的工作中, 我们报道扭曲向列型 (twisted nematic, TN) 彩色滤光膜硅覆液晶 (color filter liquid-crystal-on-silicon, CF-LCoS) 微显示器件的制备方法、三维光学建模以及性能优化^[1-3]. 在 TN CF-LCoS 微显示器件的取向膜制备过程中, 人们经常采用摩擦或光诱导^[4]的方式. 实验数据显示, 这两种取向膜制备过程只适合于光照强度小于 8×10^6 lux 的眼镜微显示器件中^[4]. 当微显示器件应用于光照大于 15×10^6 lux 的投影机中时, 器件的稳定性将会大幅下降. 在强光照射下, 尽管彩色滤光膜具有足够的稳定性, 但是取向膜层却无法承受强光中紫外线的照射^[5], 进而导致 CF-LCoS 微显示器件的对比度以及色彩饱和度等光学参数的大幅下降.

本文报道我们对垂直向列型 (vertical alignment nematic, VAN) CF-LCoS 微显示器件的研究

结果. 在该器件中, 我们采用真空溅射二氧化硅薄层作为无机取向层, 用以增强 CF-LCoS 微显示器件的光稳定性. 由于 VAN 模式的暗常态特性, VAN CF-LCoS 微显示器件的对比度可以得到大幅度提升. 应用三维光学模型针对该 VAN CF-LCoS 微显示器件进行了光学分析.

2 三维光学建模

VAN CF-LCoS 微显示器件的三维光学建模是在其 TN 模式建模^[1]的基础上延伸而得的, 它可以分为三个部分: 液晶器件的机电特性分析、光反射率分析及根据标准 RGB (standard RGB, sRGB) 协议还原彩色像素.

2.1 液晶器件机电特性分析

在三维光学建模之初, 首先要对液晶指向矢在矩形网格架构中的分布进行数值求解, 这就是

* 天津市科技支撑计划 (批准号: 12ZCZDZX02600) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lidan@tust.edu.cn

VAN CF-LCoS微显示器件的机电特性分析,其目的是得到液晶器件指向矢与外加电场的函数关系.

液晶指向矢的三维分布可以通过联立求解三维泊松方程

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

以及连续方程

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

而获得,其中 $\varepsilon(x,y,z)$ 是液晶器件介电常数张量; $V(x,y,z)$ 是空间电势函数; γ 是旋转黏度系数; F_s 和 F_e 分别是弹性和静电能量密度函数[5]; n_i 是液晶指向矢投影到*i*轴上的分量,*i*是*x*、*y*和*z*轴中的任一个.

根据VAN CF-LCoS微显示像素排列的周期性,假定在模拟结构的左、右边缘,其液晶指向矢、电势以及它们的一阶导数都是连续的.选择两个像素作为基本模拟结构,而每个像素又包含红、绿和蓝三个子像素.模拟结构的俯视图如图1(a)所示.在模拟结构中,将微显示像素的尺寸定义为 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$,其子像素的尺寸为 $10\mu\text{m} \times 7.5\mu\text{m}$,且三个子像素按照“品”字形排列,并保持 $0.5\mu\text{m}$ 的子像素间距.模拟结构剖面图如图1(b)所示.我们用帧反转方式对液晶单元进行驱动.在顶部玻璃基板上的公共电极,其电压保持在恒定5V,底部绿色子像素电极的电压设定在0V,这样公共电极与绿色子像素电极之间存在5V的均方根电压.由于VAN模式是通常暗态(normally black)液晶模式,因此,绿色子像素为点亮状态.相应地,红色和蓝色子像素的电压设定为4V,处于关断(暗)状态.在模拟过程中,彩色滤光膜的厚度设定为 $0.75\mu\text{m}$,液晶盒厚度设定为 $3\mu\text{m}$.为了与实际制备的VAN CF-LCoS微显示器件相比较,同样在模拟中选用了德国Merck生产的液晶材料MLC-6608.

模拟得到的VAN CF-LCoS微显示器件的三维液晶指向矢分布已经标示在模拟结构剖面图中,如图1(b)所示.由于VAN CF-LCoS微显示器件采用的是垂直取向(homeotropic alignment)模式,在红和蓝两个关断状态的子像素中,液晶指向矢是垂直于器件电极表面的.在这种状态下,液晶材料相对于入射光线引入的双折射系数为0,因此,在垂直偏振片的作用下,VAN CF-LCoS器件在关断状态下具有非常好的暗态性能,这一特性保证了该器件具有非常高的对比度.由于VAN CF-LCoS微显

示器件的液晶材料具有负介电各向异性,当外部施加电场作用时,液晶分子会根据电场作用的强弱发生倾斜,直至与电极表面平行.此时,该子像素处于点亮状态,如图1(b)中绿色子像素所示.

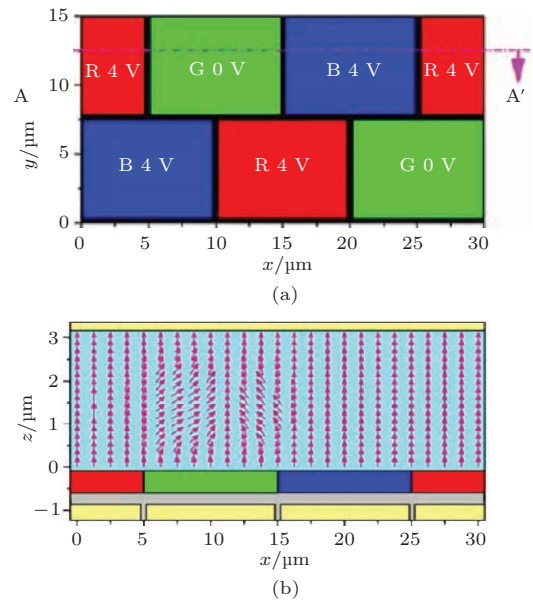


图1 (网刊彩色) VAN CF-LCoS模拟结构的(a)俯视图和(b)剖面图

Fig. 1. (color online) The (a) top and (b) cross section view of VAN CF-LCoS simulation structure.

2.2 光反射率分析

通过扩展琼斯矩阵[6],在可见光范围内进一步分析VAN CF-LCoS的光反射率.为了简化反射式液晶器件的分析复杂度,可以将其视为一个透射式液晶器件和一个与之镜像的透射式液晶器件的组合.在这两个液晶器件之间,插入一层彩色滤光膜材料,如图2所示.在模拟结构中,液晶器件可以视为一系列各向同性介质、单轴晶体以及

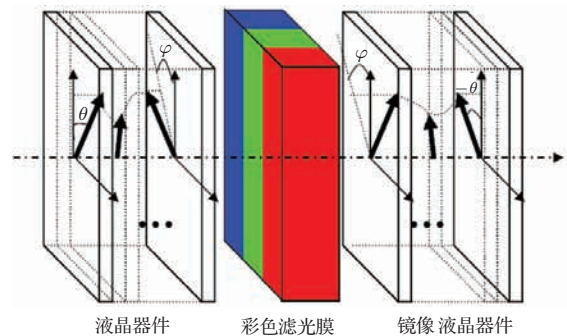


图2 (网刊彩色) VAN CF-LCoS微显示器件光反射率分析模型

Fig. 2. (color online) The optical reflectance model of the VAN CF-LCoS microdisplays.

各向同性介质的堆叠; 而彩色滤光膜可以视作一层各向同性的、吸收式彩色滤光膜材料^[7], 且其厚度为反射式器件中彩色滤光膜的一倍.

由于将 VAN CF-LCoS 微显示器件等效成液晶器件、彩色滤光膜层和镜像液晶器件的组合物, 再加上起偏器和检偏器, 其整体光学反射率可以由下式表示:

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

其中 P_i 和 P_o 是起偏器与检偏器的矩阵表达形式; 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; $M(-\theta, \phi, -\Delta\phi)$ 和 $M(\theta, \phi, \Delta\phi)$ 分别代表透射式液晶器件和与之镜像的透射式液晶器件的传输矩阵. P_{CF} 是光线在彩色滤光膜材料中的传输特性, 它可以用以下矩阵表示

$$P_{CF} = \begin{bmatrix} \exp(n_{CF}Kd) & 0 \\ 0 & \exp(n_{CF}Kd) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 K 和 d 分别是入射光的波数和彩色滤光膜的厚度, n_{CF} 是彩色滤光膜折射系数的复数表达形式, 它可以表示为

$$n_{CF} = n - ik, \quad (5)$$

其中 n 和 k 分别是实验所得到的折射系数和消光系数^[1,2]. $D_{CF \rightarrow LC}$ 和 $D_{LC \rightarrow CF}$ 分别代表彩色滤光膜和液晶器件之间的界面矩阵, 以及液晶器件和彩色滤光膜之间的界面矩阵, 并可以用如下矩阵表示:

$$D_{CF \rightarrow LC} = \begin{bmatrix} 2n_{CF}/(n_{CF} + n_0) & 0 \\ 0 & 2n_{CF}/(n_{CF} + n_0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$D_{LC \rightarrow CF} = \begin{bmatrix} 2n_0/(n_{CF} + n_0) & 0 \\ 0 & 2n_0/(n_{CF} + n_0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 n_0 是液晶材料的寻常折射系数.

在本文中, 我们假定系统所使用的偏振分光棱镜是一个具有 3000 : 1 消光系数, 且光线入射极

限为 $\pm 7^\circ$ 的实际棱镜. 这一偏振分光棱镜的实际起偏与检偏矩阵 P_i 和 P_o 可以分别表示为

$$P_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/3000 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$P_o = \begin{pmatrix} 1/3000 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

VAN CF-LCoS 微显示器件的光学反射率可以定义为器件出射光强与入射光强的比值. 综上, 它可以表示为

$$R = \frac{|E_{so}|^2 + |E_{po}|^2}{|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2}. \quad (10)$$

2.3 根据 sRGB 协议还原彩色像素

得到 VAN CF-LCoS 微显示器件的光反射率后, 可以通过国际照明委员会 CIE1931 彩色空间标准^[8,9] 将器件的光反射率波谱转化为色空间坐标, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = C \int_{380}^{780} R(\lambda)S(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda, \quad (11)$$

其中 λ 是光的波长; $R(\lambda)$ 是反射率波谱函数; $S(\lambda)$ 是照明光源的光谱; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 是 CIE 标准光度学系统中的色坐标对应函数; C 是归一化常数, 并可用下述公式计算

$$C = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (12)$$

这个色坐标参数可以直观地表述显示器件的色纯度. 但我们无法通过色坐标直观地分析彩色像素由于边缘场作用而导致的彩色漏光现象.

为了将微观像素的彩色漏光现象可视化, 我们利用 sRGB 协议将像素阵列的空间光反射率还原成像素阵列的彩色显示图像. 在照明光源为标准 D65 光源时, 这个转化可以用如下关系式表示:

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65}. \quad (13)$$

2.4 三维光学分析

应用三维光学模型模拟所得的VAN CF-LCoS微显示器件的彩色像素阵列图像如图3所示. 在模拟中, 我们假定液晶指向矢的预倾角度为理想值 88° , 且在绿色像素上施加5 V的均方根电压使之处于点亮状态.



图3 (网刊彩色)应用三维光学模型模拟所得的VAN CF-LCoS微显示器件的彩色像素阵列图像

Fig. 3. (color online) Simulated color pixels of the VAN CF-LCoS microdisplays.

观察图3可以发现在点亮的绿色子像素内存在四条黑线, 且这四条黑线呈风车状将该像素分割成四个部分, 这种现象是由于侧向场效应所引起的. 通过计算可以得出, 在发光二极管光源照射下这幅绿色画面的色坐标为(0.237, 0.610). 由于处于关断状态的红色和蓝色子像素具有很好的暗态效果, 因此和混合扭曲向列相液晶(MTN)模式CF-LCoS微显示器件^[1-3]单色显示效果相比, VAN CF-LCoS在色纯度这一参数上具有大幅提升. 然而, 由于点亮像素中间存在的四条黑线, 点亮像素的亮度会明显下降. 模拟得出的MTN及VAN CF-LCoS微显示器件的光反射率比较如图4所示.

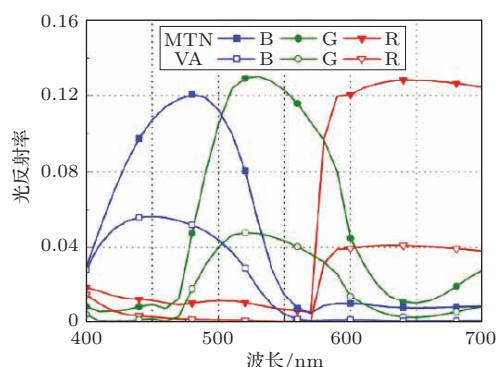


图4 (网刊彩色) 模拟得出的MTN及VAN CF-LCoS微显示器件的光反射率比较

Fig. 4. (color online) The simulated reflectivity of the color images for both the MTN and VAN CF-LCoS microdisplays.

通过对比不难得出, VAN CF-LCoS微显示器件在显示绿色画面时, 其峰值反射率仅为4.7%,

这个数值远远小于MTN CF-LCoS微显示器件的13%. 同样, 在显示红色及蓝色画面时, 可以观察到相同的光反射率变化规律.

3 三维光学模型的验证

为了验证VAN CF-LCoS微显示器件三维光学模型的准确性, 我们将模拟得到的结果与在显微镜下观测到的微显示器件的显示效果进行对比. 值得注意的是, 在制备VAN CF-LCoS微显示器件的取向层时, 采用 SiO_2 溅射的制备方法以增强取向膜的光稳定性. 通过对溅射参数的调整, 在玻璃基板表面制备出具有 88° 预倾角的 SiO_2 薄层. 用同样的参数对CF-LCoS基板进行溅射, 但由于彩色滤光膜薄层的表面材质与平整度的影响, 在CF-LCoS基板表面制备得到的 SiO_2 薄层只能产生 85° 的预倾角. 因此在模拟中, 我们将玻璃基板的液晶材料预倾角设定为 88° , 而在CF-LCoS一端的液晶材料预倾角设定为 85° . 实验观察和模拟得到的VAN CF-LCoS微显示器件空间光反射率图像对比如图5所示.

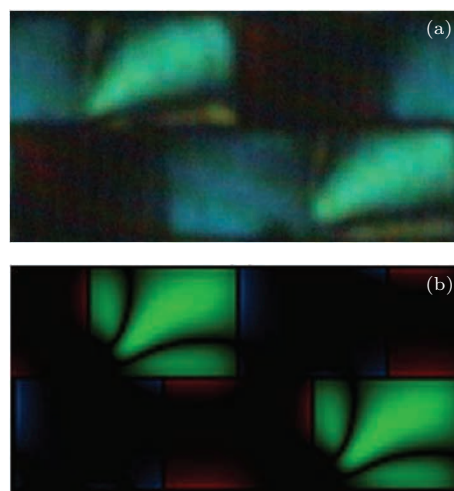


图5 (网刊彩色) (a) 实验观察和 (b) 模拟得到的VAN CF-LCoS微显示器件空间光反射率图像对比

Fig. 5. (color online) The (a) observed and (b) simulated color pixels of the VAN CF-LCoS microdisplays.

通过观察发现, 图5(b)所示结果与图3所示结果存在较大差异. 在图3中, 由于侧向场的作用, 亮态子像素中存在四条黑线, 且这四条黑线将亮态子像素分割成四个区域. 而在图5(b)中, 亮态子像素中存在两条黑线, 且这两条黑线将亮态子像素分割成了三个区域. 造成这一差异的主要原因是液晶材料预倾角的不同. 在图3的模拟结构中, 我们采用的是 88° , 而在图5的模拟结构中, 我们采用了符

合实际测量值的 85° 预倾角. 3° 的预倾角差异, 使得图 5 模拟结果中液晶材料的指向矢更容易在电场的作用下发生倾斜, 进而使侧向场作用得到的黑线交叉点图像向左下方移动, 直至左下方两条黑线消失.

通过图 5 中两幅图像的对比不难发现, 无论是实验还是模拟得到的结果, 亮态子像素中都存在两条黑线, 且这两条黑线将亮态子像素分割成了三个区域. 这两条黑线就是由于侧向边缘电场的影响而产生的, 它会降低 VAN CF-LCoS 微显示器件在单色显示时的系统亮度. 同时, 在亮态像素四周均存在彩色漏光区域. 这种现象也是由于侧向边缘电场的影响而产生的, 它使得本应为暗态的像素产生彩色漏光, 进而影响 VAN CF-LCoS 微显示器件在单色显示时的色纯度. 因此, 在 VAN CF-LCoS 微显示器件的设计过程中应该尽可能优化系统参数, 减小侧向边缘电场的影响. 由于实验和模拟结果相符合, 这说明三维光学模型的建立可以指导实验, 为优化 CF-LCoS 微显示器件的侧向电场效应奠定了基础.

4 结 论

本文建立了 VAN CF-LCoS 微显示器件三维光学模型. 通过对彩色液晶器件的机电特性、光反射率的分析, 以及采用 sRGB 协议将 VAN CF-LCoS 微显示阵列中各像素点的光反射特性还原成彩色图像等三个过程对其光学特性进行了分析; 应用该三维光学模型对 VAN CF-LCoS 的光学特性进行了

研究, 并与实际制备的器件特性进行比较. 比较结果显示, 模拟得到的 VAN CF-LCoS 微显示器的光学特性与实验结果非常符合. 这个三维模型的建立, 可以指导实验, 为优化 VAN CF-LCoS 微显示器件的侧向电场效应奠定了基础.

参考文献

- [1] Zhang B L, Li D, Dai F Z, Yang S F, Kwok H S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 040701 (in Chinese) [张宝龙, 李丹, 戴凤智, 杨世凤, 郭海成 2012 物理学报 **61** 040701]
- [2] Zhang B L, Li D, Dai F Z, Yang S F, Kwok H S 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1226001 (in Chinese) [张宝龙, 李丹, 戴凤智, 杨世凤, 郭海成 2011 光学学报 **31** 1226001]
- [3] Zhang B L, Li D, Dai F Z, Yang S F, Kwok H S 2011 *Chin. J. Liquid Crystals and Displays* **26** 760 (in Chinese) [张宝龙, 李丹, 戴凤智, 杨世凤, 郭海成 2011 液晶与显示 **26** 760]
- [4] Zhang B L, Li K K, Chigrinov V G, Kwok H S, Huang H C 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 3983
- [5] Dickmann S, Eschler J, Cossalter O, Mlynski D 1993 *Proceedings of the 31st SID Seattle Washington, United States of America*, May 16–21, 1993 p638
- [6] Gu C, Yeh P 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 966
- [7] Zhang B L, Peng H J, Huang H C, Kwok H S 2005 *Proceedings of the 43rd SID Boston, Massachusetts, United States of America*, May 22–27 2005 p1302
- [8] Wyszecki G, Stiles W S 1982 *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (New York: Wiley) Chap. 3
- [9] Yakovenko S, Kononov V, Brennesholtz M 2004 *Soc. for Info. Disp. Symp. Digest*, United States of America, May 23–28 2004 p64

Three-dimensional optical modeling of vertical alignment mode color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays*

Li Dan^{1)†} Zhang Bao-Long¹⁾ 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, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China*)

(Received 25 January 2015; revised manuscript received 6 March 2015)

Abstract

A three-dimensional (3D) optical model is developed for small color pixels in vertical alignment nematic (VAN) mode color filter liquid-crystal-on-silicon (CF-LCoS) microdisplays. First of all, the electromechanical characteristics of color liquid crystal (LC) cells are analyzed to achieve the orientation structure of the LC director. Then, the optical reflectance of the cell is calculated by using the extended Jones matrix. Finally, the optical reflectance on the pixel array is reduced into the displayed color image by adopting a standard RGB representation. In order to verify the accuracy of this 3D optical model, the simulation result and the observed result are compared. The simulated optical reflectance is in good agreement with the experimental result.

Keywords: color filter, LCoS, vertical alignment nematic, optical modeling

PACS: 07.07.Hj

DOI: [10.7498/aps.64.140701](https://doi.org/10.7498/aps.64.140701)

* Project supported by the Technology supporting plan of Tianjin Government, China (Grant No. 12ZCZDGX02600).

† Corresponding author. E-mail: lidan@tust.edu.cn