

彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模*

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, 香港九龙清水湾)

(2011年4月18日收到; 2011年5月31日收到修改稿)

本文针对彩色滤光膜 (color filter, CF) 硅覆液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 微显示器件 (microdisplay) 中的微型彩色像素建立了三维光学模型. 这个三维光学建模主要分为三个过程, 即彩色液晶器件的机电特性分析, 利用扩展琼斯矩阵 (extended Jones matrix) 计算器件的光反射率, 以及采用标准 RGB (standard RGB, sRGB) 协议将 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. 通过上述过程建立的三维光学模型用于 CF-LCoS 的光学特性研究并与实验数据进行比较. 比较结果显示, 模拟得到的 CF-LCoS 微显示器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, 微显示, 三维光学建模

PACS: 07.07.Hj

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^[1,2]. 它将彩色滤光膜集成在传统的 LCoS 面板上, 使微显示器本身就具备了全彩色显示的条件. 它具有两大优点. 一方面, 与传统的 LCoS 微显示投影设备^[3,4]相比, CF-LCoS 微显示器件所对应的投影光学系统设计得以大幅简化. 如图 1 所示, 它只需应用一个偏振分光棱镜 (polarization beam splitter, PBS) 就可将一束偏振光 s 入射到 CF-LCoS 微显示器件, 经过微显示器件的偏振调制作用, 此偏振光的偏振状态将旋转 90° , 成为出射偏振光线 p . p 光再通过 PBS 和投影镜头, 最终投射到显示屏幕上. 另一方面, 由于采用了空间彩色法, CF-LCoS 微显示器件的工作频率可以降低到 120 Hz; 而传统的微显示器件, 由于采用的是时序彩色法, 其工作频率一般在 360 Hz. 这就有效的降低了 LCoS 微显示器件的响应频率, 从而提高了它的生产良品率.

我们常见的薄膜晶体管液晶器件 (thin-film-transistor liquid-crystal-devices, TFT-LCDs) 的彩色滤光膜是制备在公用电极玻璃面板上. 这使得彩

色滤光膜和 TFT 有源矩阵在液晶器件封装时产生对准偏差. 由于 TFT-LCDs 的像素尺寸在 $300\ \mu\text{m}$ 左右, 这个对准偏差是可以容忍的. 然而, CF-LCoS 微显示器件的像素尺寸仅为 $10\ \mu\text{m}$ 左右, 如果我们将彩色滤光膜制备在公用电极玻璃面板上, 其对准公差会使显示画面产生色差. 为了解决这个问题, 彩色滤光膜就必须直接制备在 LCoS 微显示器件的像素电极上, 如图 1 所示. 由于在液晶器件与像素电极间加入绝缘材料 (彩色滤光膜), 这使得液晶器件的光电特性发生改变, 特别是其侧向场效应 (fringing field effect) 引起的彩色漏光. 显然, 为了研究此问题并优化器件性能, CF-LCoS 微显示器件的三维光学建模具有重要意义.

本文在三维模拟结构中加入了彩色滤光膜, 它作为一层绝缘材料出现在液晶材料与反射电极之间. 我们将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 (extended Jones matrix) 计算彩色像素在可见光谱范围内的光反射率; 最后, 我们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)^[5] 协议将像素阵

* 天津科技大学引进人才基金 (批准号: 922610001001) 资助的课题.

† E-mail: eezbl@tust.edu.cn

列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. 应用这种三维模型, 我们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.

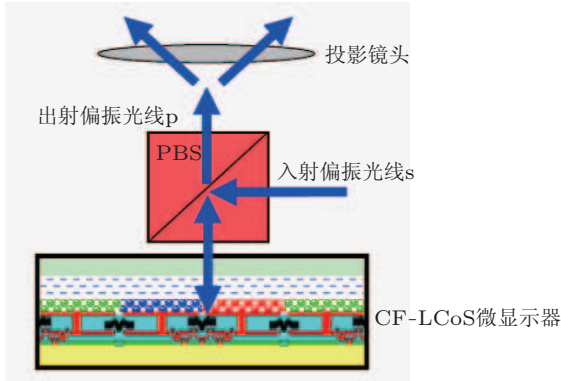


图1 CF-LCoS 微显示器投影光学结构图

2 液晶器件机电特性分析

建立三维光学模型的第一步是液晶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. 液晶指向矢可以通过对泊松方程进行数值求解和采用逐次超松弛迭代法 (SOR) 对连续方程进行数值求解得到 [6,7]. 泊松方程描述了电势分布 $V(x, y, z)$ 相对于液晶器件各向异性介电常数的分布关系, 其具体形式如下:

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

其中 $\epsilon(x, y, z)$ 是液晶器件介电常数张量, 它的分量 $\epsilon_{ij}(x, y, z)$ 可以表示成

$$\epsilon_{ij}(x, y, z) = \epsilon_v \delta_{ij} + (\epsilon_p - \epsilon_v) \times n_i(x, y, z)n_j(x, y, z), \quad (2)$$

在方程 (2) 中, δ_{ij} 是 delta 函数, ϵ_p 和 ϵ_v 分别是平行和垂直于液晶指向矢的介电常数, n_i 和 n_j 分别是液晶指向矢 \mathbf{n} 投影到 i 轴和 j 轴上的分量, 而 i, j 是 x, y 和 z 中的任意两个. 三维液晶指向矢 \mathbf{n} 可以通过求解下列连续方程得到:

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{d}{d_j} \left[\frac{\partial(F_s - F_e)}{\partial(\partial n_i / \partial j)} \right] - \frac{\partial(F_s - F_e)}{(\partial n_i)}, \quad (3)$$

其中 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 [8], 它们可以分别表示为

$$F_s = \frac{1}{2}K_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n}) + \frac{1}{2}K_{22}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2}K_{33}|(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})|^2 \quad (4)$$

和

$$F_e = \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \epsilon \mathbf{E}, \quad (5)$$

其中液晶指向矢 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]$, q_0 是旋光掺杂剂浓度, \mathbf{E} 是电场矢量, K_{11} , K_{22} 和 K_{33} 分别是液晶材料的展开、扭曲和弯曲系数.

我们将液晶器件机电特性分析分别应用于单色和彩色液晶单元的三维模拟结构中. 单色和彩色液晶单元的剖面图如图 2 所示. 这两种液晶单元都属于混合型扭曲向列相 (mixed twisted nematic, MTN) 结构 [9], 如果我们以像素长边作为基准, 液晶器件的扭曲角度为 90° , 起偏器角度为 20° , 预倾角度为 2° , 摩擦角度为 45° . 在模拟中, 由于选用了德国 Merck 生产的液晶材料 MLC-6043, 我们将液晶盒厚设计为 $2.5\mu\text{m}$, 从而得到 0.1 的光波延迟.

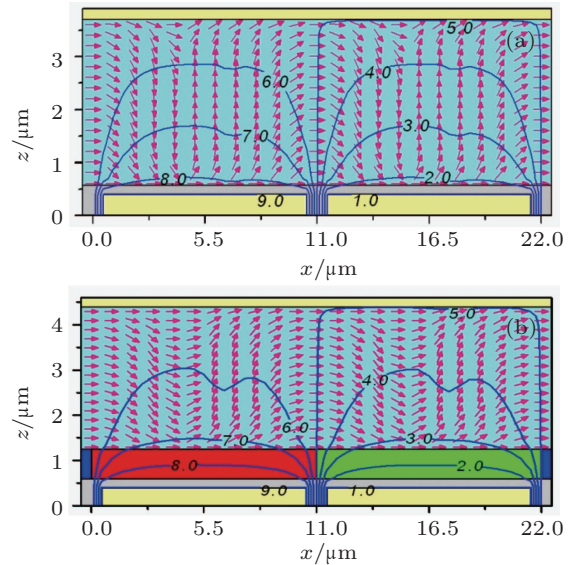


图2 液晶器件指向矢在电场作用下的模拟结构剖面图 (a) 单色; (b) 彩色

根据 CF-LCoS 微显示像素排列的周期性, 我们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. 这是求解微分方程的水平边缘条件. 在垂直方向, 彩色滤光膜和液晶材料在其交界面上的电位移是连续的. 另外, 我们假定液晶材料与摩擦取向膜之间存在强锚定势能. 彩色滤光膜的介电常数和电阻率可以通过实验测得 [1,2], 其厚度为 $0.75\mu\text{m}$. 这样, 我们就可以根据以上条件集合求解微分方程, 最终模拟出彩色液晶单元的机电特性.

在图 2 所示的模拟结构剖面图中有三个电极. 在顶部玻璃基板上的公共电极, 其电压保持在恒定 5 V. 底部两个像素电极的电压在 0—4 V 之间变

化, 导致公共电极与像素电极之间存在 5—1 V 的均方根电压. 我们用帧反转方式对液晶单元进行驱动. 与列反转和行反转相比, 帧反转驱动方式可以得到较小的边缘电场效应. 在单色微显示器件中, 这个小的边缘电场可以被忽略, 因为在单色微显示器件中, 边缘电场只改变相邻像素亮态或暗态区域的面积, 而不影响器件整体的亮度和对比度. 但是在 CF-LCoS 微显示器件中, 由于相邻像素颜色的不同, 帧反转驱动中的边缘电场效应则不可以被忽略. 这是因为, 相邻像素亮态或暗态区域面积的变化将导致颜色泄露并将大大降低显示器件的色彩饱和度.

在机电特性分析中, 液晶器件被平均分成 50 薄层. 并且, 我们将模拟过程中的迭代公差设为 1.0×10^{-6} . 在这些参数条件下求解方程, 得到液晶指向矢和电势的收敛数值结果. 同时, 由于电场是电势分布的负梯度, 我们也可以得到液晶层中的电场分布图. 模拟得到的三维液晶指向矢的剖面图已经标示在模拟结构图 2 中. 底部像素电极分别为 4 V 和 1 V, 用以在帧反转驱动中产生最大的侧向边缘电场. 由于部分外加电压耗散在了彩色滤光膜上, 侧向电场对彩色像素的影响大于对单色像素的影响. 这表明彩色单元与单色单元相比有更严重的边缘效应.

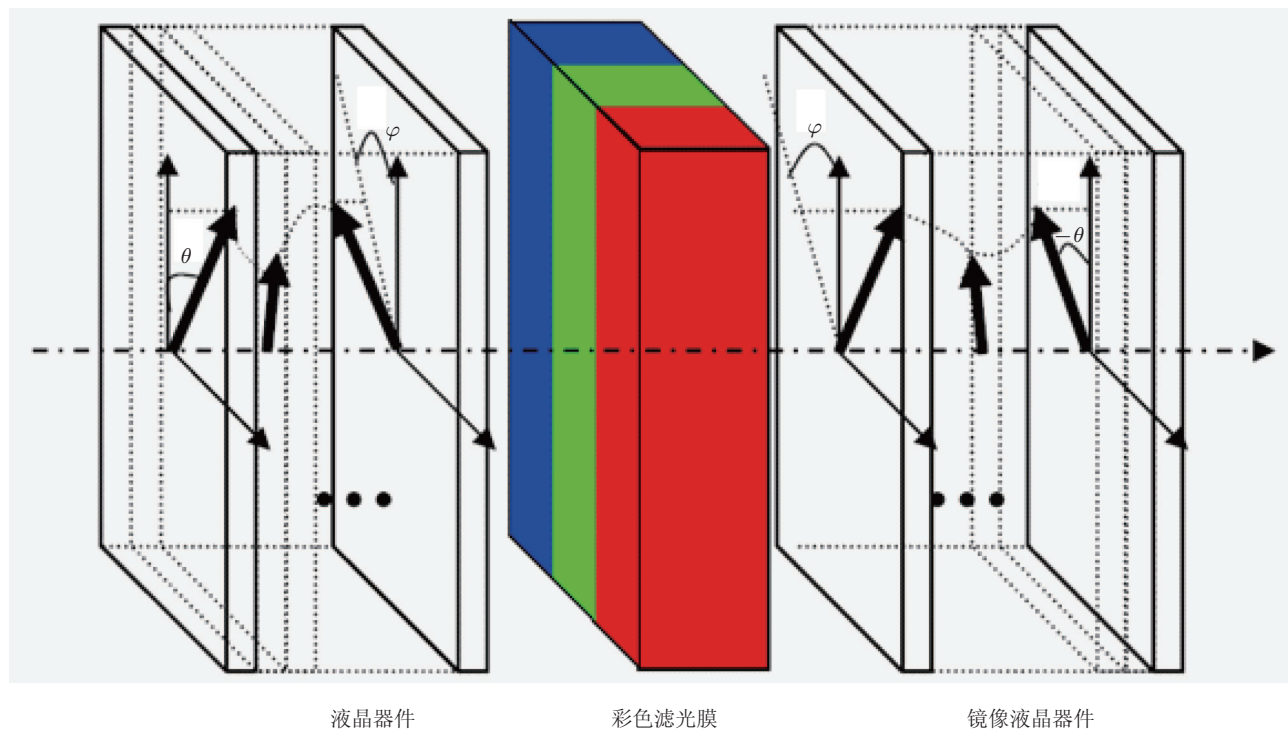


图 3 CF-LCoS 微显示器件光反射率分析模型

3 光反射率分析

经过上述机电分析过程, 我们可以得到液晶指向矢的三维分布. 另外, 通过彩色滤光膜的光学特性研究, 我们可以得到它的光学常量, 如折射率 n 和消光系数 k ^[1,2]. 有了这些基础, 我们便可以通过扩展琼斯矩阵^[10], 在可见光范围内进一步分析 CF-LCoS 的光反射率.

如图 3 所示, 为了简化反射式液晶器件的分析复杂度, 我们可以把它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, 我们插入一层各向同性的、吸收式

彩色滤光膜材料^[2], 且其厚度为反射式器件中彩色滤光膜的一倍.

3.1 液晶器件光透过率分析

与机电特性分析相对应, 在光反射率分析中, 我们将液晶器件分成 50 个具有双折射特性的薄层. 在每一薄层中其光轴便可以被视作为固定的. 进而, 该薄层液晶材料便可以被视作一层具有有限厚度的且夹在两层无限薄的各向同性介质中的单轴晶体.

我们将入射光分解成 s 和 p 两个偏振方向, 并且

将液晶器件中的透射光分解成寻常光线和快轴光线(o光和e光)两个组成部分. 光在单轴晶体和各向同性介质界面的折射行为, 可以用如下矩阵方程表示:

$$\begin{bmatrix} E'_e \\ E'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{pi} \\ E'_{si} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E'_{pi} \\ E'_{si} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, E'_{si} 和 E'_{pi} 是输入s和p向量的电场幅度; E'_o 和 E'_e 分别是单轴晶体中o和e向量的电场幅度. $R(p, e)$, $R(s, e)$, $R(p, o)$ 和 $R(s, o)$ 分别是向量p到e, s到e, p到o和s到o的转化系数. 我们定义 $\begin{bmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{bmatrix}$ 为该界面的动态矩阵. 因此, 光线在各向同性介质、单轴晶体及各向同性介质中的传输过程可以用如下矩阵方程表示:

$$\begin{bmatrix} E'_{po} \\ E'_{so} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E'_{pi} \\ E'_{si} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $J = S^{-1}GS$ 是琼斯矩阵. E'_{so} 和 E'_{po} 分别是输出s和p向量的电场幅度. 矩阵 G 是光在各向异性介质中的传输方程, 其矩阵表达式为

$$G = \begin{bmatrix} \exp(-iK_{ez}h) & 0 \\ 0 & \exp(-iK_{oz}h) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 K_{oz} 和 K_{ez} 分别是o和e向量在 z 轴方向上的分量; h 是单轴晶体薄层的厚度. 这样, 光线在液晶器件中的传输过程, 可以用如下方程表示:

$$M = J_N J_{N-1} \cdots J_n \cdots J_2 J_1, \quad (9)$$

其中 N 是液晶器件的层数. 在本文模拟结构中, 其数值为 50.

3.2 彩色滤光膜光透过率分析

彩色滤光膜作为各向同性的吸收性介质, 其复数形式的折射系数 n_{CF} 可以表示为

$$n_{CF} = n - ik, \quad (10)$$

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]. 光线在彩色滤光膜材料中的传输特性可以用以下矩阵表示:

$$P_{CF} = \begin{bmatrix} \exp(n_{CF}Kd) & 0 \\ 0 & \exp(n_{CF}Kd) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 K 和 d 分别是入射光的波数和彩色滤光膜的厚度. 彩色滤光膜和液晶器件之间的界面可以被

视作两个各向同性介质的界面, 并可以用如下矩阵表示:

$$D_{LC \rightarrow CF} = \begin{bmatrix} \frac{2n_o}{(n_{CF} + n_o)} & 0 \\ 0 & \frac{2n_o}{(n_{CF} + n_o)} \end{bmatrix} \quad (12a)$$

和

$$D_{CF \rightarrow LC} = \begin{bmatrix} \frac{2n_{CF}}{(n_{CF} + n_o)} & 0 \\ 0 & \frac{2n_{CF}}{(n_{CF} + n_o)} \end{bmatrix}, \quad (12b)$$

其中 n_o 是液晶材料的寻常折射系数. 由于我们将 CF-LCoS 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体, 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:

$$\begin{bmatrix} E_{po} \\ E_{so} \end{bmatrix} = P_o \cdot M(-\theta, \phi, -\Delta\varphi) \cdots D_{CF \rightarrow LC} \\ \times P_{CF} D_{LC \rightarrow CF} \cdot M(\theta, \phi, \Delta\varphi) \\ \times P_i \cdot \begin{bmatrix} E_{pi} \\ E_{si} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中 $P_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 和 $P_o = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 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. 因此, CF-LCoS 的光反射率可以由下式表示:

$$R = \frac{|E_{so}|^2 + |E_{po}|^2}{|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2}. \quad (14)$$

3.3 CF-LCoS 器件光反射率分析

如图 4(a) 所示, 在 CF-LCoS 的模拟结构中, 我们将微显示像素(子像素)按照“品”字形排列, 并且将绿色像素点亮. 在“品”字形像素排列中, 子像素的尺寸为 $10\mu\text{m} \times 7.5\mu\text{m}$, 其构成的整体像素尺寸即为 $10\mu\text{m} \times 7.5\mu\text{m}$. 我们假定一束具有 550 nm 波长的光线入射到像素阵列上并计算它的光学反射率. 图 4(b) 是通过模拟得到的像素阵列的光反射率轮廓图.

我们将单一波长时, 像素阵列的光反射率在整个像素空间进行积分, 进而归一化, 就得到了在该波长的系统反射率. 当光源波长在可见光波长 (400—700 nm) 范围内变化时, 重复上述

计算过程, 我们就得到了 CF-LCoS 微显示器件的光谱响应.

为了验证模拟结果的正确性, 我们制备了与模拟条件 (如像素尺寸和液晶模式) 相同的 CF-LCoS 微显示器件, 并用显微镜观察并记录器件在红、绿、蓝发光二极管 (LED) 分别照射下的光谱响应曲线. 为了比较的一致性, 在模拟中, 我们同样采用实验中 LED 器件的辐射光谱作为照明光源进行计算. 图 5 所示是模拟和实验所得到的彩色像素阵列的光反射率波谱比较图. 通过比较, 我们不难发现归一化的模拟结果与实验结果基本符合.

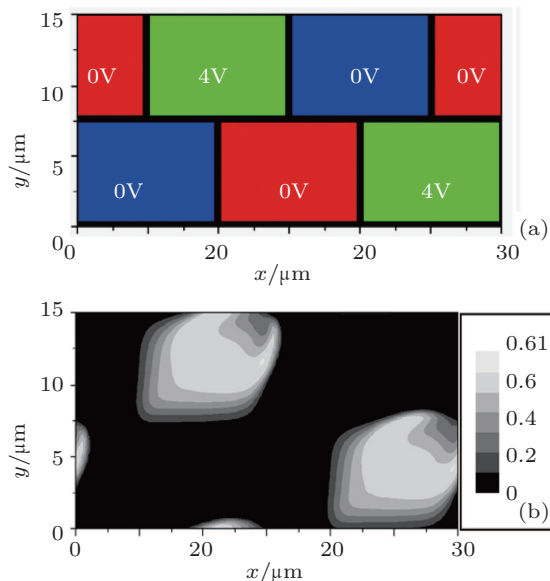


图 4 (a) 模拟结构中“品”字形像素排列结构; (b) 模拟得到的像素阵列的光反射率轮廓图

4 根据 sRGB 协议还原彩色像素

CF-LCoS 微显示器件的光反射率分析, 不仅可以得到器件分析中重要的单色参数, 如对比度、反射率等; 还可以进一步得到器件分析所需要的重要彩色参数. 我们通过 CIE1931 彩色空间标准 [11] 将器件的光反射率波谱转化为色空间坐标, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C \int_{380}^{780} R(\lambda) S(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda, \quad (15)$$

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:

$$C = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (16)$$

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

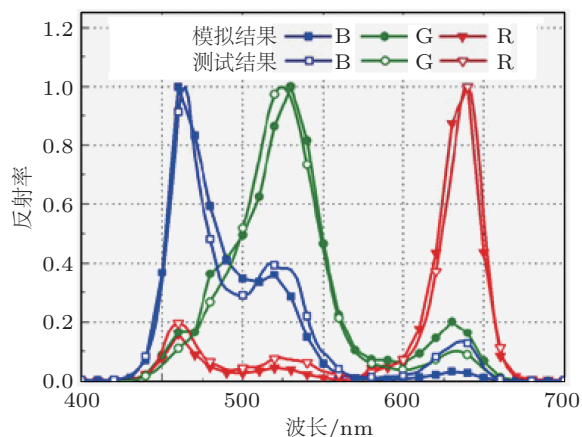


图 5 模拟和实验所得到的彩色像素阵列的光反射率波谱比较图

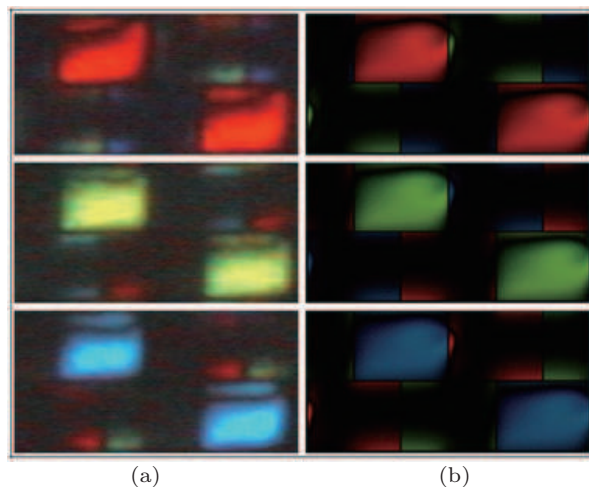


图 6 实验观察到的和模拟得到的彩色像素阵列图像 (a) 实验; (b) 模拟

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:

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65}. \quad (17)$$

图 6 所示是实验观察到的和模拟得到的彩色像素阵列图像. 我们设定驱动和模拟条件使单色像素点亮, 其余两色像素处于暗态. 通过对比, 不难发现, 无论是实验还是模拟得到的结果, 亮态像素中都存在一条暗线. 这条暗线就是由于侧向边缘电场影响而产生的, 它只影响 CF-LCoS 微显示器单色显示时的系统亮度, 但不会影响色纯度. 然而, 在亮态像素上方、下方和右侧均存在彩色漏光区域, 且上方和右侧漏光较为严重. 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 CF-LCoS 微显示器单色的色纯度. 我们在 CF-LCoS 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互符合, 这说明三维光学模型的建立可以指导实验, 为优化 CF-LCoS 微显示器器件的

侧向电场效应奠定了基础.

5 结论

本文建立了 CF-LCoS 微显示器器件三维光学模型. 这个三维建模包括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 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. 并且, 我们将三维光学模型用于 CF-LCoS 的光学特性研究并与实验数据进行比较. 比较结果显示, 模拟得到的 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 CF-LCoS 微显示器器件的侧向电场效应奠定了基础.

-
- [1] Huang H C, Zhang B L, Kwok H S, Cheng P W, Chen Y C 2005 *Proceedings of the 43rd SID, Boston, Massachusetts, United States of America*, May 22–27, 2005, p880
- [2] 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
- [3] Dove D B, Kisco M 1997 *U. S. Patent*: 5,658,060
- [4] Sharp G D 1988 *U. S. Patent*: 5,751,384
- [5] Stokes M, Anderson M, Chandrasekar S, Motta R 1996 <http://www.color.org/sRGB.html>
- [6] Anderson J E, Watson P E, Bos P J 2001 *LC3D: Liquid Crystal Display 3-D Director Simulator Software*, (Norwood, MA: Artech House), p1
- [7] Lien A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1079
- [8] Dickmann S, Eschler J, Cossalter O, Mlynski D 1993 *Proceedings of the 31st SID, Seattle, Washington, United States of America*, 1993, p638
- [9] Wu S T, Wu C S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1455
- [10] Gu C, Yeh P 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 966
- [11] Wyszecki G, Stiles W S 1982 *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, (New York: Wiley) Chap.3

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

Zhang Bao-Long^{1)†} Li Dan¹⁾ Dai Feng-Zhi¹⁾ Yang Shi-Feng¹⁾ Hoising Kwok²⁾

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 18 April 2011; revised manuscript received 31 May 2011)

Abstract

A three-dimensional (3D) optical model is developed for small color pixels in color filter liquid-crystal-on-silicon (CF-LCOS) microdisplays. The 3D optical model includes an LC electromechanical analysis of color LC cells, a calculation of optical reflectance using the extended Jones matrix, and a standard RGB (sRGB) representation of the optical reflectance in the pixel array. The simulated optical reflectance accords well with the experimental result.

Keywords: color filter, LCoS, microdisplay, three-dimensional optical modeling

PACS: 07.07.Hj

* Project supported by the Talent Fund of Tianjin University of Science and Technology, China(Grant No.922610001001).

† E-mail: eezbl@tust.edu.cn