

文章编号:1007-2780(2019)10-0945-07

硅上液晶显示器件结构的优化

李文娟¹, 郭玉强¹, 马红梅^{1,2}, 孙玉宝^{1,2*}

(1. 河北工业大学 电子材料与器件天津重点实验室, 天津 300401;

2. 河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要: 对于硅上液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)器件而言, 由于其像素间距较小, 当某一像素施加电压后, 会影响其相邻不加电压的像素的光学特性。为了改善这一情况, 本文通过建立一种常白型 LCoS 的三维光学模型, 研究了 3 种参数对相邻不加电像素边缘的影响。结果表明: (1) 相邻像素边缘暗态的位置和面积会随着液晶分子取向的改变而改变, 当液晶分子取向方向为 45° 时, 相邻像素边缘受影响的程度最小; (2) 液晶盒的厚度越大, 相邻像素边缘受影响的程度越大; (3) 像素间距对相邻像素边缘的影响是变化的。本文条件下, 当像素间距为 $0.7 \mu\text{m}$ 时, 加电的中央像素对周围像素的反射率的影响最小。本研究的结论对高分辨率 LCoS 的设计和制备具有一定的指导意义。

关键词: 硅上液晶; 相邻像素; 反射率; 液晶盒厚; 像素间距

中图分类号: TP141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193410.0945

Optimized device structure of liquid crystal on silicon

LI Wen-juan¹, GUO Yu-qiang¹, MA Hong-mei^{1,2}, SUN Yu-bao^{1,2*}(1. *Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices,*
*Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*2. *Department of Applied Physics, Hebei University of Technology,*
Tianjin 300401, China)

Abstract: In terms of liquid crystal on silicon (LCoS) device, the optical properties of off-state pixels would be affected by the adjacent on-state pixel, because the distance between the adjacent pixels is small. To improve this issue, a three-dimensional (3D) optical modeling based on the normally white LCoS mode is built to investigate the effects of three parameters on the adjacent pixels' optical properties. As a result, (1) the position and area of dark zone on the edge of adjacent pixels change with the initial liquid crystal director. The least influence can be obtained for the adjacent pixels, when the initial liquid crystal director is 45° . (2) The thicker the LCD cell is, the greater the influence on the adjacent pixels is. (3) The influence of pixels' gap on the edges of adjacent pixels are varying. In this work, as the pixels' gap is $0.7 \mu\text{m}$, the on-state central pixel has the least influence on the reflectivity

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-06-16.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB0703701); 国家自然科学基金(No.61475042)

Supported by the National Key R&D Program of China (No.2018YFB0703701); National Natural Science Foundation of China (No.61475042).

* 通信联系人, E-mail: sun_yubao@163.com

of the adjacent pixels. This investigation has a certain guiding significance for the design and preparation of high resolution LCoS.

Key words: LCoS; adjacent pixel; reflectivity; gap of liquid crystal cell; pixels gap

1 引言

人类获取信息的 70%~80% 靠视觉系统,视觉系统又是虚拟现实(Virtual Reality: VR)技术当中最重要的感知通道^[1]。但是,目前阻碍其发展的问题是:微图像源上的像素需要通过头盔显示器光学系统成像到像空间。对于固定显示器,视场增大,分辨率降低,单位视场角(1°)内的像素数就会减少,即分辨率下降^[2-3]。

目前液晶 VR 技术中,硅上液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)是它的核心显示单元^[4],该显示技术是一种反射式液晶显示技术^[5]。LCoS 结合大规模集成电路工艺在硅片上直接实现驱动电路,并采用 CMOS 技术将有源像素矩阵制作在硅单晶衬底上,并以该晶片为衬底封装液晶盒,易于实现更小的像素尺寸和更高的显示分辨率^[6]。

现如今在继续提高头盔显示器的显示效果时,必须继续提高 LCoS 的分辨率,使得像素尺寸减小。像素尺寸的减小会使 LCoS 微显示器件子像素点的显示面积减少,其反射率也会下降^[7]。当分辨率不是很高时,视场内的单个像素能够大到可以独立地看见^[8],因此单像素的显示效果也就很重要,通常 LCoS 的像素尺寸为 7~20 μm 左右。为了避免单个像素尺寸的改变带来对头盔显示器的显示效果的影响,本文我们保持像素尺寸大小为 10 μm ^[9],研究和优化液晶盒部分的参数。

本文我们建立了 LCoS 微显示液晶器件的三维模型,使用 TechWiz LCD 3D 软件对该模型进行模拟。在不改变像素尺寸大小情况下,通过对不同的液晶分子取向、不同的液晶盒厚度和不同的像素间距进行模拟,研究以上 3 个参数对相邻像素的显示面积和反射率的影响,通过对液晶分子取向、液晶盒的厚度和像素间距的合理选取,使该影响程度最小化,从而达到优化和改善头盔显示器显示效果的目的。

2 建立模型

像素边长大小为 10 μm × 10 μm ,液晶器件的扭曲角度为 90°,预倾角为 2°,偏振分光棱镜的起偏角度与邻近基板表面处液晶的取向之间的夹角为 20°,则该液晶显示器为反射的常白模式^[7,9-11],入射光波长为 550 nm。液晶的材料参数设置为:介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 为 5.3,双折射率为 $\Delta n = 0.0969$,液晶盒厚为 2.8 μm 。

对单像素施加不同的电压(0~6 V),单个像素在电压由 0 V 增加到 6 V 的过程中,像素由亮态转为暗态,该像素的反射率随电压的变化,如图 1 所示。从图 1 中可以看出,当驱动电压约为 3.5 V 时,该像素达到暗态。

在上述单像素模型的基础上,我们建立九宫格模型如图 2 所示,本文出现的所有九宫格模型的像素序号如图 2 所示。本文研究不同因素下中央像素 5 对周其他像素电光性能的影响,主要是

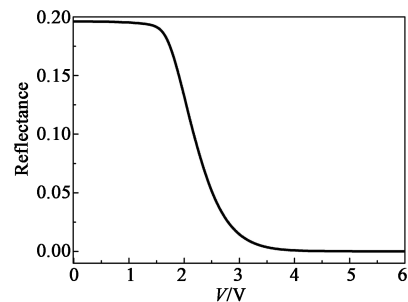


图 1 单像素在不同电压下的反射率

Fig.1 Reflectivity of one pixel with various voltage

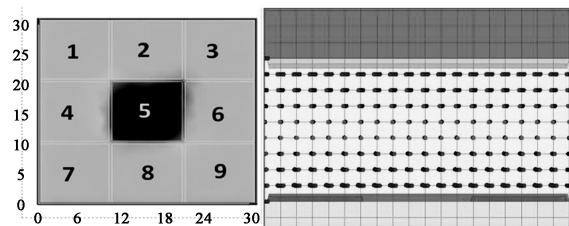


图 2 九宫格模型及其剖面图

Fig.2 Sudoku of model and its cross-section profile

对上下左右 4 个像素的影响。

采用的研究方法为:首先模拟中央像素 5 在施加 3.5 V 的电压时,不同液晶分子取向的模型。根据模拟结果,找到最优液晶分子取向,使得中央像素 5 在暗态时对周围相邻像素(2、4、6、8)的影响最小;其次,在最优分子取向的条件下,模拟不同的液晶盒厚度的模型,找到最优的盒厚,使得中央像素 5 在暗态时,对周围相邻像素(2、4、6、8)的影响最小;最后,在最优分子取向和最优盒厚的条件下,模拟不同的液晶像素间距的九宫格模型,观察总结和分析,找到最优的液晶像素间距使得中央像素 5 在暗态时,对周围相邻像素(2、4、6、8)的影响最小。

3 不同参数对相邻像素边缘的影响

3.1 液晶分子取向对周围相邻像素的影响

在上述单像素模型的基础上,建立九宫格模型,研究分子取向的影响。液晶盒的厚度为 2.8 μm ,像素大小为 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,液晶像素间距为 0.5 μm ,液晶取向分别为 0° , 20° , 40° , 45° , 50° , 60° , 80° , 90° 。模拟后所得结果如图 3 所示。

通过观察图 3,对比不同的液晶分子取向的模拟结果可知,当施加电压为 3.5 V 时,中央像素为暗态,周围相邻像素的边缘区域显示暗态的面积大小和角度会随着液晶分子取向角度的改变而改变。在液晶分子取向为 0° 时,像素 4 和像素 6 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域显示变暗的面积比较大,像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域没有变暗,对于中央像素 5 的上下边缘区域会出现亮态;液晶分子取向的角度逐渐增加到 45° 时,像素 4 和像素 6 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域显示变暗的面积减

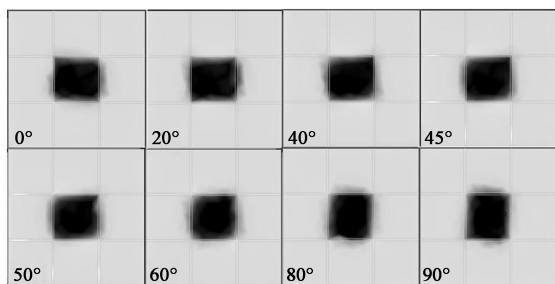


图 3 不同取向角度的液晶盒的模拟结果

Fig.3 Simulation results of the different alignment directions of liquid crystal display

少,像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域基本没有出现暗态,对于中央像素 5 的上下边缘几乎不出现亮态;当液晶分子取向的角度继续增大到 90° 时,像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘变暗,像素 4 和像素 6 靠近中央像素 5 一侧的边缘没有出现暗态,对于中央像素 5 的左右边缘出现亮态。

现在我们以中央像素为基准,分别在 X(左右)方向和 Y(上下)方向进行分析,得到的液晶分子取向的反射率如图 4 所示。在 X 方向上,中央像素为暗态,液晶分子取向 0° 时,像素 4 和像素 6 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域变暗,但液晶分子取向为 80° 时,像素 4 和像素 6 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域出现亮态,且比较明显,可知 X 方向上相邻像素对中间像素的影响比较大。Y 方向上,液晶分子取向 0° 时,中央像素为暗态,像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域出现亮态,但液晶分子取向为 80° 时,像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域变暗,且比较明显,中间像素 5 对像素 2 和像素 8 靠近中央像素 5 一侧的边缘区域的影响比较大。可见液晶分子取向对相邻像素的显示有影响,相邻像素对中央

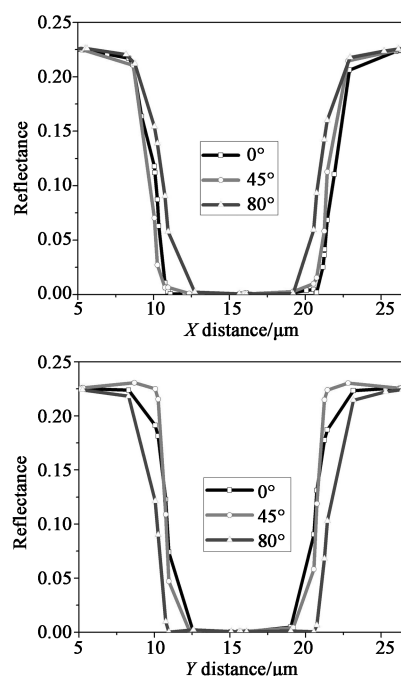


图 4 不同取向角度的液晶盒的 X 方向和 Y 方向的反射率

Fig.4 Reflectivity of different alignment directions of liquid crystal display at X direction and Y direction

像素的显示也有影响,影响是相互的。总之,液晶分子的取向会影响像素的显示。综合中央像素对相邻像素显示的影响和相邻对中央像素显示的影响,以及相邻对上下像素和左右像素影响的不同,很显然液晶分子取向在 45° 时,像素的显示达到最优,即 45° 是我们模型需要的最优角度。

3.2 盒厚对周围像素显示面积的影响

选取上述最优液晶分子取向(45°)的模型,改变液晶盒的厚度进行模拟。液晶盒的厚度分别为 $2.0, 2.4, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4\ \mu\text{m}$ 时所得模拟结果如图 5 所示,反射率曲线如图 6 所示。

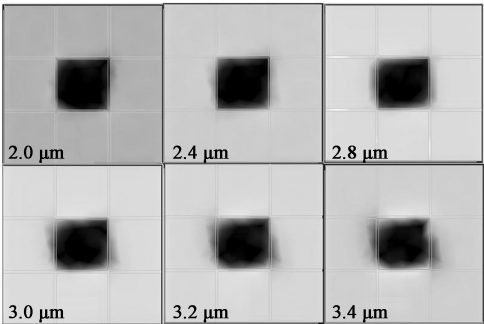


图 5 不同液晶盒的厚度的模拟结果
Fig.5 Simulation results of different gaps of liquid crystal cell

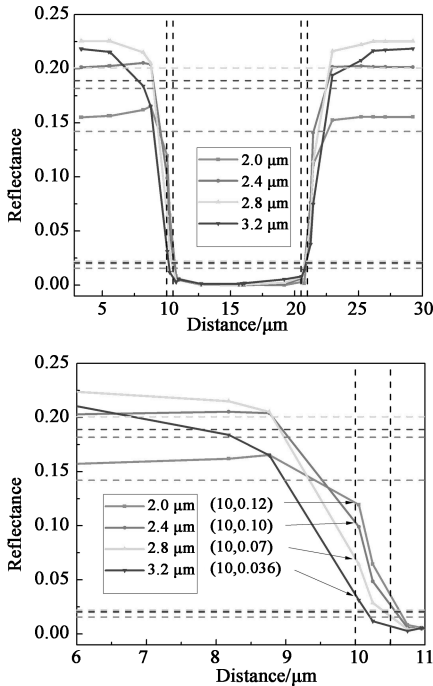


图 6 不同液晶盒的厚度的反射率曲线
Fig.6 Reflectivity of different gaps of liquid crystal cell

为了更清楚地描述中间像素对边缘像素电光性能的影响,本文定义相邻像素靠近中间像素边缘位置(即 Distance 为 $10\ \mu\text{m}$)处的反射率(R_1)与亮态反射率(R_2)的比值: R_1/R_2 。表 1 中,盒厚从 $2.0\ \mu\text{m}$ 增大到 $3.2\ \mu\text{m}$,比值 R_1/R_2 从 $0.759\ 4$ 减小到 $0.171\ 4$,随着盒厚的增加,比值 R_1/R_2 越小。结合图 5 可知,比值 R_1/R_2 越小,像素 4 靠近中央像素侧边缘的暗态就越暗,视觉上暗态越明显,即中央像素对相邻像素的反射率的影响越大。

表 1 不同液晶盒厚度的 LCoS 的 R_1/R_2 值			
Tab.1 R_1/R_2 of different gaps of liquid crystal cell			
盒厚/ μm	亮态反射率	$10\ \mu\text{m}$ 处反射率	R_1/R_2
2.0	0.158	0.120	0.759 4
2.4	0.202	0.100	0.495 0
2.8	0.223	0.070	0.313 9
3.2	0.210	0.036	0.171 4

一般地,人们认为反射率的 90% 可以看作是亮态,反射率的 10% 为暗态。本文中像素 4 达到 90% 亮态的位置为 X_1 , X_1 到 $10\ \mu\text{m}$ 的距离定义为 ΔX 。

由表 2 可知:随着液晶盒的厚度的增加, ΔX 逐渐增大,结合图 6 可知, ΔX 越大,像素 4 靠近中央像素 5 边缘的暗的面积就越大,视觉上暗态越明显,即中央像素对相邻像素显示面积的影响越大。

通过观察上述模拟结果可知,液晶盒的厚度对像素的显示有影响。中央像素为暗态时,不同的液晶盒的厚度对相邻像素显示面积的影响不同,对相邻像素的反射率的影响不同。液晶盒的厚度大时,中央像素对周围相邻像素暗态的面积影响大,且对周围相邻像素靠近中央像素 5 边缘的反射率的影响也大,故周围相邻像素暗态就明显;液晶盒的厚度小时,中央像素对周围相邻像素显示的影响小。可见,液晶盒的厚度越小越好。目前反射式液晶盒的厚度影响着像素之间的影响,包括对周围相邻像素的暗态面积和对周围相邻像素的反射率影响。所以要尽量减小液晶盒的厚度使中央像素对周围相邻像素显示的影响达到最小。

表 2 不同液晶盒厚度的 LCoS 的 ΔX Tab.2 ΔX of different gaps of liquid crystal cell

盒厚/ μm	$X_1/\mu\text{m}$	$\Delta X = 10 - X_1$
2.0	9.436	0.564
2.4	9.032	0.968
2.8	8.796	1.204
3.2	7.753	2.247

3.3 像素间距对周围相邻像素暗态面积的影响

在上述最优分子取向(45°)和最优液晶盒的厚度($2.0\ \mu\text{m}$)的基础上,模拟计算液晶像素间距分别为 $0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.2\ \mu\text{m}$ 的显示效果。模拟结果如图 7 所示,反射率曲线如图 8 所示。

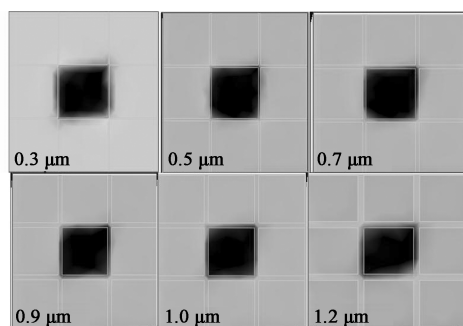


图 7 不同像素间距的模拟结果

Fig.7 Simulation results of different distances between the adjacent pixels

当像素间距从 $0.7\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.3\ \mu\text{m}$, R_1/R_2 值逐渐减小。 R_1/R_2 值越小,中央像素 5 对像素

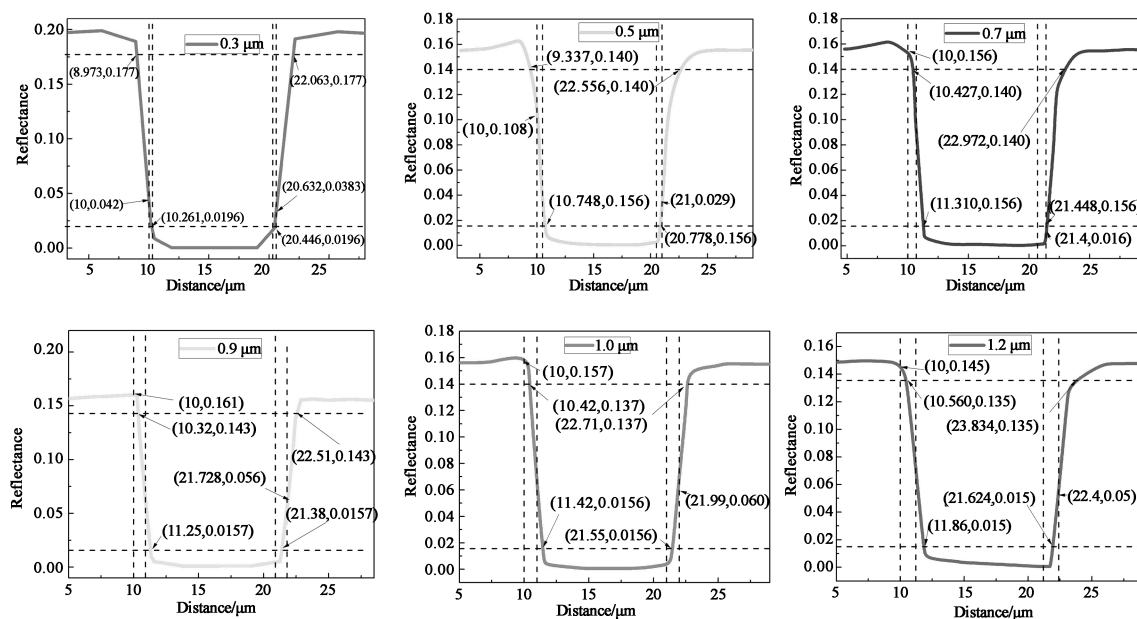


图 8 不同像素间距的反射率曲线

Fig.8 Reflectivity of different distances between the adjacent pixels

4 靠近中央像素一侧显示的反射率的影响就越大。我们的总目标是减小像素间距来增大显示器的分辨率,但是通过分析 R_1/R_2 值,像素间距越小对周围像素的反射率的影响就越大,要求尽量增大像素间距来减小像素之间对反射率的影响。

分析表 3,液晶像素的间距在 $0.7\ \mu\text{m}$ 时, R_1/R_2 值为 0.987,接近于 1。液晶像素 $0.7\ \mu\text{m}$ 增加到 $1.2\ \mu\text{m}$, R_1/R_2 值在 1 的上下波动。综合 R_1/R_2 值和减小像素间距增加分辨率两种因素, $0.7\ \mu\text{m}$ 为最优值。

表 4 给出不同像素间距时 ΔX 的变化。液晶像素间距为 $0.3\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \mu\text{m}$, ΔX 为正值,像素 4 中出现暗态;液晶像素间距为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的 ΔX 比液晶像素间距为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 ΔX 大,即液晶像素间距为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的模型的像素 4 中暗态显示面积比液晶像素间距为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的像素 4 中暗态显示面积大。液晶像素间距为 $0.7 \sim 1.2\ \mu\text{m}$, ΔX 为负值,像素 4 没有出现暗态,间距 $0.7\ \mu\text{m}$ 的 X_1 值为 $10.427\ \mu\text{m}$, $10.427\ \mu\text{m}$ 位于 $10\ \mu\text{m}$ 和 $10.7\ \mu\text{m}$ 之间,即像素 4 和像素 5 的间隙为亮态和暗态的

分界处。同理,间距为 0.9,1.0,1.2 μm 的模型中,亮态和暗态的分界处都位于像素 4 和像素 5 的间隙。我们的总目标是减小像素间距来增大显示器的分辨率,但是通过 ΔX 分析可知,像素间距小于 0.7 μm 时,像素间距越小对周围相邻像素的暗态显示面积的影响就越大。考虑到 ΔX 值,即对周围相邻像素显示暗态面积的影响最合适的像素间距为 0.7 μm 。

表 3 不同像素间距的 R_1/R_2 值
Tab.3 R_1/R_2 of different distances between the adjacent pixels

盒厚/ μm	亮态 反射率	10 μm 处 反射率	R_1/R_2
0.3	0.197	0.042	0.213
0.5	0.156	0.108	0.692
0.7	0.156	0.154	0.987
0.9	0.157	0.161	1.025
1.0	0.156	0.156	1.000
1.2	0.150	0.145	0.967

通过观察,中央像素为暗态时,比较不同像素间距的模拟结果可知,不同的像素间距对周围像素的显示面积的影响不同。在减小像素间距来增大显示器的分辨率的总目标下,综合分析 R_1/R_2 值和 ΔX 值,像素间距为 0.7 μm 时,中央像素

暗态对周围像素的反射率的影响最小,对周围像素暗态显示面积的影响最小。

表 4 不同间距的 ΔX 值
Tab.4 ΔX of different distances between the adjacent pixels

盒厚/ μm	$X_1/\mu\text{m}$	$\Delta X=10-X_1$
0.3	8.973	1.027
0.5	9.337	0.663
0.7	10.427	-0.427
0.9	10.320	-0.32
1.0	10.368	-0.368
1.2	10.450	-0.56

4 结 论

本文所建立的模型,得到了最优分子取向(45°)、最优盒厚(2.0 μm)和最优像素间距(0.7 μm)。利用 TechWiz LCD 3D 软件对硅上液晶微显示器件(LCoS)的九宫格模型进行模拟,研究了在饱和电压下中央像素为暗态时,通过合理选取液晶分子取向、液晶盒的厚度和像素间距等条件,减小了对周围相邻像素显示面积和反射率的影响,从而优化了硅上液晶微显示器的显示特性,进而提高了显示器件的分辨率,最后达到改善头盔显示器件显示效果的目的。

参 考 文 献:

[1] 赵沁平.虚拟现实综述[J].中国科学 F 辑:信息科学,2009,39(1):2-46.
ZHAO Q P. A survey on virtual reality [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(3): 348-400.

[2] 高源,刘越,程德文,等.头盔显示器发展综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(6):896-904.
GAO Y, LIU Y, CHENG D W, *et al.* A review on development of head mounted display [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 896-904. (in Chinese)

[3] 孟祥翔.大视场虚拟现实头盔显示器光学系统研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2015.
MENG X X. Study on large field of view optical system of virtual reality head-mounted display [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

[4] 张楠,翁冬冬,王涌天,等.一种大视场普及型头盔显示器的系统设计[C]//中国光学学会 2011 年学术大会摘要.深圳:中国光学学会,2011:254.
ZHANG N, WENG D D, WANG Y T, *et al.* A universal and smart helmet-mounted display of large FOV [C]// *The Chinese Optical Society Optical Assembly in 2011*. Shenzhen: Chinese Optical Society, 2011: 254. (in Chi-

nese)

- [5] 代永平.LCOS微显示技术[J].液晶与显示,2009,24(4):471-477.
DAI Y P. Technology for LCOS microdisplay [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24 (4): 471-477. (in Chinese)
- [6] 魏文君,徐亨,刘学清,等.现代显示技术发展展望[J].功能材料与器件学报,2015,21(5):99-106.
WEI W J, XU H, LIU X Q, *et al.* Development of current display technology and its prospect [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2015, 21(5): 99-106. (in Chinese)
- [7] 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.
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. (in Chinese)
- [8] 宋治刚,王琰.虚拟现实系统中头盔显示器的构建技术[C]//中国图象图形学会第十届全国图像图形学术会议(CIG'2001)和第一届全国虚拟现实技术研讨会(CVR'2001)论文集.宁波:中国工程图学学会,2001:488-493.
SONG Z G, WANG Y. Head mounted display building technology in virtual reality system [C]//*Tenth National Symposium on Image Graphics of the Chinese Society of Image Graphics*. Ningbo: Chinese Society of Engineering Graphics, 2001: 488-493. (in Chinese)
- [9] 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.
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. (in Chinese)
- [10] 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.
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*, 2012, 31(12): 1226001. (in Chinese)
- [11] 姜丽,范伟,代永平,等.混合扭曲向列相模式的液晶盒参数对硅基液晶显示器的影响[J].液晶与显示,2011,26(3):311-314.
JIANG L, FAN W, DAI Y P, *et al.* Influence of MTN-LCD parameters to liquid crystal on silicon display device [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 311-314. (in Chinese)

作者简介:



李文娟(1985—),女,河北邯郸人,博士研究生,2013年于河北工业大学获得硕士学位,主要从事液晶显示器方面的研究。E-mail: lwj_hebut@163.com



孙玉宝(1975—),男,河北沧州人,教授,2010年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶显示器件方面的研究。E-mail: sun_yubao@163.com