

垂直排列硅上液晶显示器件反射率的提升

李文娟, 郭玉强, 马红梅, 孙玉宝

引用本文:

李文娟, 郭玉强, 马红梅, 等. 垂直排列硅上液晶显示器件反射率的提升[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 947-953.

LI Wen-juan, GUO Yu-qiang, MA Hong-mei, et al. Improvement of reflectivity of vertical alignment liquid crystal on silicon[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 947-953.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0303>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅上液晶显示器件结构的优化

Optimized device structure of liquid crystal on silicon

液晶与显示. 2019, 34(10): 945-951 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193410.0945>

一种采用介电突起消除边缘场效应的LCoS

Eliminating fringe field effect using dielectric protrusions in LCoS

液晶与显示. 2020, 35(1): 12-18 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0012>

用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

Measurement of director distribution in reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique

液晶与显示. 2016, 31(6): 540-546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0540>

非等光强正交圆偏振光对液晶偏振光栅衍射特性的影响

Diffraction properties of liquid crystal polarization gratings with orthogonal circular polarization and different intensities waves

液晶与显示. 2018, 33(2): 144-149 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183302.0144>

液晶光谱偏振系统的透射谱研究

Transmittance spectrum in the liquid crystal spectro-polarimetric system

液晶与显示. 2017, 32(2): 97-103 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173202.0097>

文章编号:1007-2780(2021)07-0947-07

垂直排列硅上液晶显示器件反射率的提升

李文娟¹, 郭玉强², 马红梅^{1,3}, 孙玉宝^{1,3*}

(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. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

3. 河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要: 为了提升垂直排列硅上液晶(VA-LCoS)器件的反射率, 本文通过建立常黑型 VA-LCoS 的三维光学模型, 分别用圆偏振光和线偏振光入射, 研究了预倾角、液晶盒厚和入射光波长对 VA-LCoS 器件的反射率的影响。结果表明: 使用圆偏振光入射能彻底消除亮态像素内黑色区域。本文条件下, 1.6 μm 盒厚的 VA-LCoS 在圆偏振光入射时有最大的反射率。本研究的结论对 VA-LCoS 的设计和制备具有一定的指导意义。

关键词: 硅上液晶; 垂直排列; 反射率; 液晶盒厚; 预倾角

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0303

Improvement of reflectivity of vertical alignment liquid crystal on silicon

LI Wen-juan¹, GUO Yu-qiang², MA Hong-mei^{1,3}, SUN Yu-bao^{1,3*}

(1. *Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices,*

Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. *School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,*

Beihang University, Beijing 100191, China;

3. *Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)*

Abstract: To improve the reflectivity of vertical alignment Liquid Crystal on Silicon (VA-LCoS), we built a three-dimensional (3D) optical modeling for the normally black VA-LCoS mode, and investigated the effects of the gap of liquid crystal cell, the pretilt angle of liquid crystal and wavelength of incident light on reflection for linearly polarized light and circle polarized light as incident light, respectively. As a result, the black zone in the on-state pixel was eliminated by using circle polarized light as incident light. Moreover, the VA-LCoS has the highest reflection as the cell gap is 1.6 μm . The results have an important guiding significance for the design and preparation of VA-LCoS.

Key words: LCoS; vertical alignment; reflectivity; cell gap; pretilt angle

收稿日期: 2020-11-12; 修订日期: 2021-02-05.

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 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

1 引言

虚拟现实(Virtual Reality, VR)/增强现实(Augmented Reality, AR)头戴显示器(Head Mounted Display, HMD)代表了视觉和交互应用的下一前沿^[1-2]。硅上液晶器件(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)因其具有高分辨率、低功耗、质量轻、稳定性好、低成本等优点^[3-8],用于 VR/AR HMD 中的显示模块,这也是液晶显示器的重要发展领域^[9-12]。而垂直排列(Vertical Alignment, VA)在所有的 LCoS 显示模式中表现出较高的对比度和更优异的性能^[10, 13-16],所以它的应用也更为广泛。

VA 模式通常采用介电各向异性为负的液晶材料,在偏光片与液晶的共同作用下,关态(不施加电压)为常黑模式。但是,由于边缘场效应^[17],开态(施加电压)时像素内存在暗区,这会影 VA-LCoS 器件的整体反射率,进而影响器件的整体亮度。前期的研究中,Wu 课题组^[18]用二维光学模型,Iwamoto 等人^[19]用圆偏振片加多畴垂直向列相液晶模式,均能减小亮态像素内的黑色区域。此外,李丹等人^[20]用圆偏振入射光代替线偏振入射光的结论是边缘场效应导致的亮态像素内的黑色区域缩小,但是黑色区域的交点不能彻底消除。为了消除 VA-LCoS 器件亮态像素内的黑色区域,进一步提升 VA-LCoS 器件的电光性能,本文展开了研究。

本文建立了 VA-LCoS 器件的三维模型,使用 TechWiz LCD 3D 商用软件对该模型进行研究。分别用线偏振光和圆偏振光作为入射光,研究不同的液晶分子预倾角、不同的液晶盒厚度和不同的入射光波长对 VA-LCoS 器件的反射率的影响。通过对液晶分子预倾角、液晶盒厚度和入射光波长的合理选取,得到最大反射率,改善了 VA-LCoS 器件的光学性能,从而达到优化 VA-LCoS 器件的目的。

2 模型及原理

通常 LCoS 器件的像素尺寸约为 7~20 μm ^[21],本文保持像素尺寸大小为 10 μm ,研究和优化液晶盒部分的参数。图 1 展示了 VA-LCoS

器件的剖面结构图,像素尺寸大小为 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,像素间隙为 0.5 μm ,上下玻璃基板上涂有聚酰亚胺(PI)层^[22-23],基板表面处液晶分子的预倾角为 88°,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 0°。本模拟采用高阻率液晶材料,液晶的材料参数设置为:双折射率 $\Delta n = 0.0966$ (@550 nm),介电各向异性 $\Delta \epsilon$ 为 -3.1 (@1 kHz)。

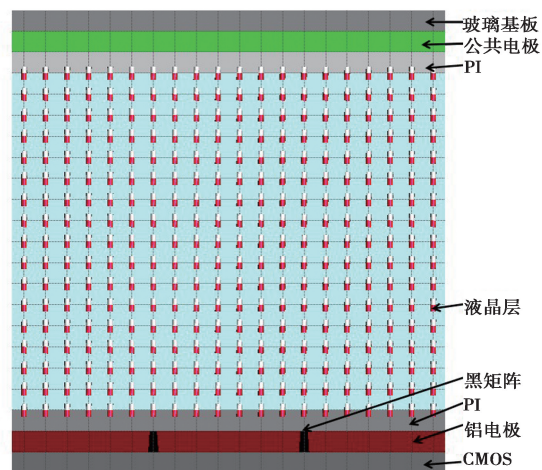


图 1 VA-LCoS 模型的剖面图

Fig.1 Cross-section profile of VA-LCoS

对于垂直排列液晶器件,不加电压时液晶显示器有很好的暗态,为常黑模式^[5]。对于透射型的液晶显示器,当 Δnd 约为 $\lambda/2$ 时,显示器的相位延迟可达 1π ,透过率可达 100%。本文建立的 VA-LCoS 模型为反射式液晶显示器^[24-25],要想得到 100% 的反射率,就要求 Δnd 约为 $\lambda/4$ 。首先在人眼敏感的绿光(550 nm)波长附近条件下研究了 VA-LCoS 器件的光学性能,VA-LCoS 器件的盒厚分别为 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 μm 。研究了不同波长的入射光对反射率的影响。

在理论方面,反射率为出射光的光强与入射光的光强之比^[20]:

$$R = \frac{|E_{so}|^2 + |E_{po}|^2}{|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2}, \quad (1)$$

其中, E_{po} 和 E_{so} 分别为出射光光强的平行方向的分量和垂直方向的分量,它们满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} E_{po} \\ E_{so} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_o \cdot \mathbf{M}(-\theta, \varphi, -\Delta\varphi) \cdot \mathbf{M}(\theta, \varphi, \Delta\varphi) \cdot \mathbf{P}_i \begin{bmatrix} E_{pi} \\ E_{si} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, θ 为液晶分子的倾角, φ 为液晶分子的扭曲

角度, $\Delta\varphi$ 为相位延迟, E_{pi} 和 E_{si} 分别为入射光光强的平行方向分量和垂直方向的分量, P_o 和 P_i 分别为圆偏振的起偏器和检偏器的传输矩阵, $M(\theta, \varphi, \Delta\varphi)$ 和 $M(-\theta, \varphi, -\Delta\varphi)$ 分别为液晶盒的透射传输矩阵和反射传输矩阵。线偏振光入射时, 偏振分光棱镜既作为起偏器又作为检偏器, 而圆偏振光入射是通过线偏振片加 $1/4$ 波片来实现的, 圆偏振检偏器 P_o 和起偏器 P_i 的矩阵表达式为:

$$P_o = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$P_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

后文的电光性能即在上述的理论基础上计算而来。其中, VA-LCoS 器件的液晶分子的预倾角、盒厚、入射光的偏振态和波长等参数会被调节。

3 结果与讨论

理论上, VA-LCoS 器件的盒厚 d 约为 $\lambda/(4\Delta n)$, 为了更加精确地研究 VA-LCoS 器件的光学性能, 我们对盒厚分别为 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 μm 的 VA-LCoS 器件进行了研究。图 2(a) 给出了不同液晶盒厚条件下线偏振光和圆偏振光入射的 VA-LCoS 器件的反射率随电压变化的曲线, 盒厚为 1.8 μm 时不同电压下线偏振光和圆偏振光入射的 VA-LCoS 器件的模拟结果如图 2(b) 和 2(c) 所示。为了更好地对 VA-LCoS 器件的光学性能进行对比, 后文中的电光性能均采用归一化 R-V 曲线来表示。

根据图 2(a) 结果显示: 无论入射光是线偏振光还是圆偏振光, 改变液晶盒厚均对 VA-LCoS 器件的 R-V 曲线有一定影响, 所以研究人员可以从改变液晶盒厚方面对 VA-LCoS 器件的反射率进行微调。本文条件下, 对于入射光为线偏振光, 盒厚为 1.8 μm 的反射率最高。对于入射光为圆偏振光, 在电压小于 14 V 时, 盒厚为 1.8 μm 有最高的反射率; 在电压大于 14 V 时, 盒厚为 1.6 μm 有最好的反射率。

通过对比图 2 中的 (b) 与 (c) 可知: 对于同一液晶盒厚, 圆偏振光入射的 VA-LCoS 器件的反射

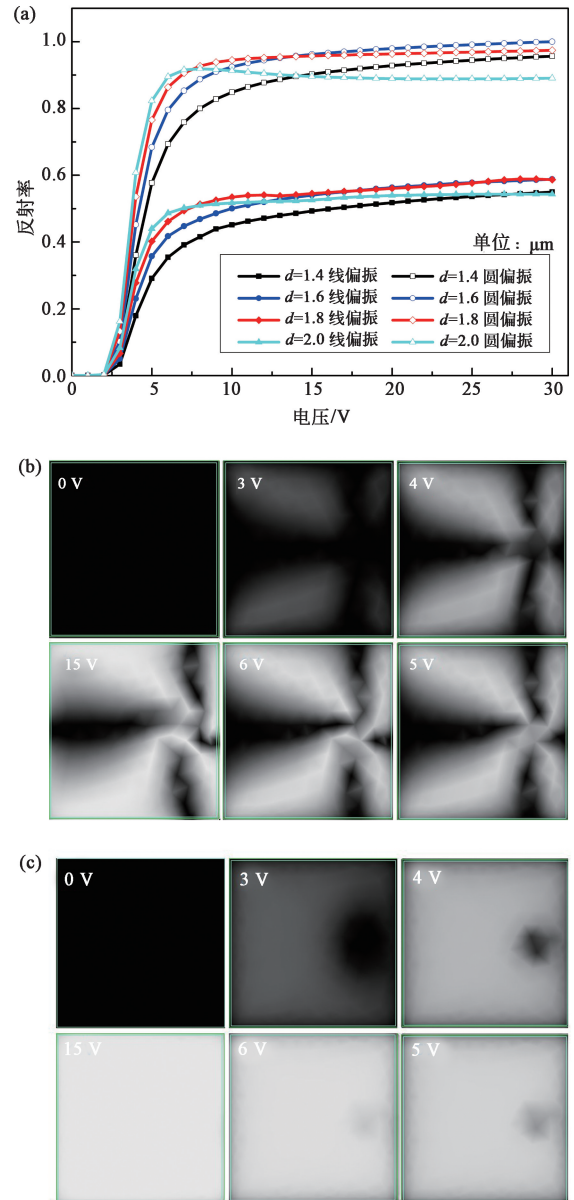


图 2 (a) 不同液晶盒厚下线偏振光和圆偏振光入射的 VA-LCoS 器件的 R-V 曲线; (b) 不同电压下线偏振光入射的 VA-LCoS 器件的模拟结果; (c) 不同电压下圆偏振光入射 VA-LCoS 器件的模拟结果。

Fig.2 (a) Simulated R-V curves of VA-LCoS with different gaps of liquid crystal cell using linearly polarized light and circle polarized light as incident light; (b) Simulation results of VA-LCoS with different voltages using linearly polarized light as incident light; (c) Simulation results of VA-LCoS with different voltages using circle polarized light as incident light.

率远远大于线偏振光入射的反射率。采用圆偏振光入射可以显著降低亮态像素中的黑色区域,甚至消除亮态像素中的黑色区域。结果表明,液晶盒厚为 1.4;1.6;1.8,2.0 μm 时,圆偏振光入射的反射率分别是线偏振光入射的 1.74 倍、1.71 倍、1.66 倍和 1.64 倍。

从电场分布上来看,可以得到更清晰的解释。VA-LCoS 器件在外电场驱动下的液晶分子取向分布如图 3 所示。图 3(a)为 XY 面的液晶分子取向分布,图 3(b)为 XZ 面的液晶分子取向分布。当线偏振光入射时,亮态像素中会出现黑色区域,如图 2(b)所示。该黑色区域是由边缘场效应引起的,对于采用了负性液晶的垂直排列液晶器件,在未施加外界电压时,液晶分子均垂直于玻璃基板排列,无论是线偏振光入射还是圆偏振光入射,反射光线均不能通过检偏器,整个像素为暗态,如图 2 中的(b)与(c)的 0 V 时的模拟结果。当施加外界电压比较小时,液晶分子会向着垂直于电场线方向旋转却未达到平行于玻璃基板方向,如图 2(b)和(c)中 3~6 V 的模拟结果。当继续增加电压达到饱和电压,除上下基板表面处液晶分子外,其他层的液晶分子的指向式基本上平行于玻璃基板排列,如图 3(b)所示,模拟效果如图 2 中的(b)与(c)的 15 V 所示。现以中间层的液晶分子为例,当中央像素施加饱和电压,该层的液晶分子从垂直于玻璃基板排列扭转到平行于玻璃基板排列,由于中央像素施加电压,周围相邻像素不加电压,电场线成圆形,负性液晶分子垂直于电场线分布,在 XY 面内成辐射状态分布,如图 3(a)所示。

在饱和电压下,液晶分子平行于基板排列。在线偏振光入射时,偏振分光棱镜既作为起偏器又作为检偏器,出射光只有平行于偏振分光棱镜的方向才能通过检偏器,而垂直于偏振分光棱镜方向的出射光,不能通过检偏器。对于采用负性液晶材料的反射型的 VA-LCoS 器件来说,在饱和电压下在 XY 面内,当液晶分子的方位角度与偏振分光棱镜的起偏角度之间的夹角为 45° 时,线偏振光能通过检偏器,该区域为亮态,而当液晶分子的方位角度与偏振分光棱镜的起偏角度之间的夹角为 0° 和 90° 时,线偏振光不能通过检偏器,该区域为暗态;在圆偏振光入射时,通过线偏振片

加 $1/4$ 波片来实现圆偏振光,在饱和电压下在 XY 面内,圆偏振光不受液晶分子方位角度的约束,在每个方向均有分量,且经反射后再经 $1/4$ 波片射出,在平行于检偏器方向均有分量,因此不出现黑色区域,整个像素内均为亮态,这大幅提升了 VA-LCoS 器件的反射率和开口率,提升了 VA-LCoS 器件的光学性能。

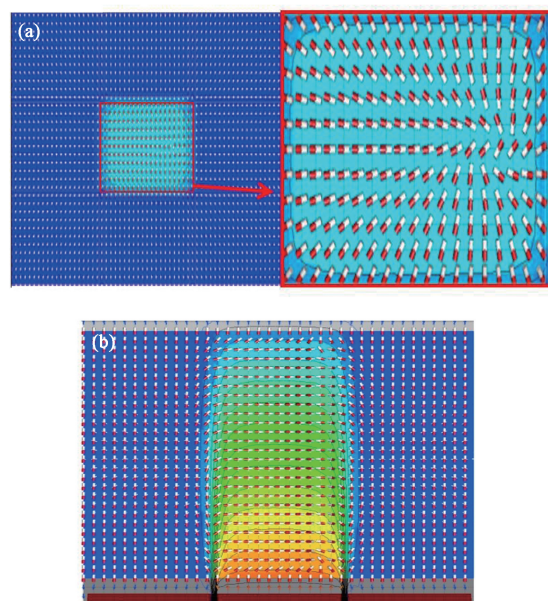


图 3 (a)XY 平面和(b)XZ 平面的液晶分子取向和电场强度分布图

Fig.3 LC director distribution and electric field intensity distribution in (a) XY plan and (b) XZ plan

对于不同的液晶分子的预倾角,当给像素施加外界电压后,像素内的白色区域和黑色区域分布不同,这将影响 VA-LCoS 器件的电光性能,图 4 给出了入射光分别为线偏振和圆偏振的 VA-LCoS 器件在不同预倾角下的反射率随电压变化的曲线。对于入射光为线偏振的 VA-LCoS 器件,其反射率受液晶分子预倾角大小的影响,液晶分子的预倾角越接近 90° ,VA-LCoS 器件的反射率越大,反之越小。为了更直观地观察液晶分子预倾角变化对 VA-LCoS 器件反射率的影响,图 4 (b)给出了入射光为线偏振的 VA-LCoS 器件在不同倾角下的亮态像素的模拟结果。红色圆圈标注了亮态像素内 4 个黑色区域的交点,结果表明,液晶分子预倾角越接近 90° ,交点就越靠近像素的中心,且每个像素内的黑色区域就越小,即像素

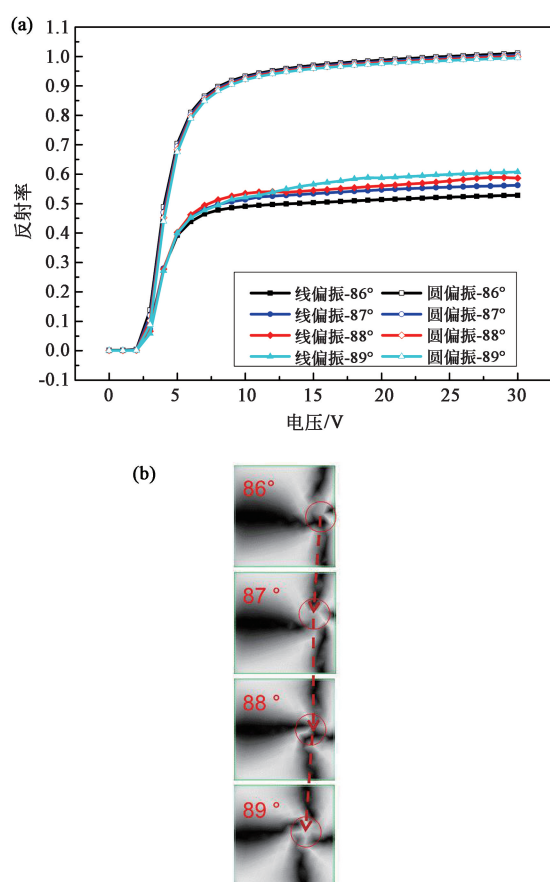


图4 (a)不同预倾角下线偏振光和圆偏振光入射的VA-LCoS器件的R-V曲线;(b)不同倾角下线偏振光入射的VA-LCoS器件的模拟结果。

Fig.4 (a) Simulated R-V curves of VA-LCoS with different pretilt angles using linearly polarized light and circle polarized light as incident light; (b) Simulation results of VA-LCoS with different pretilt angles using linearly polarized light.

内的白色区域就越大,整个像素的反射率增大,进而提高了VA-LCoS器件的整体亮度。对于入射光为圆偏振的VA-LCoS器件来说,反射率几乎不受液晶分子预倾角的影响。

入射光的波长对VA-LCoS器件的电光性能存在影响,图5展示了红、绿、蓝三波长下的R-V曲线。从图中的结果可以看出:无论入射光是线偏振光还是圆偏振光,对于红光($\lambda_{\text{红光}} = 650 \text{ nm}$),反射率随着盒厚的增大而增大;对于绿光($\lambda_{\text{绿光}} = 550 \text{ nm}$),反射率随盒厚变化比较小;对于蓝光($\lambda_{\text{蓝光}} = 450 \text{ nm}$),反射率会随着液晶盒厚的增大反而减小。通过对比图5中的(a)、(b)和(c)可

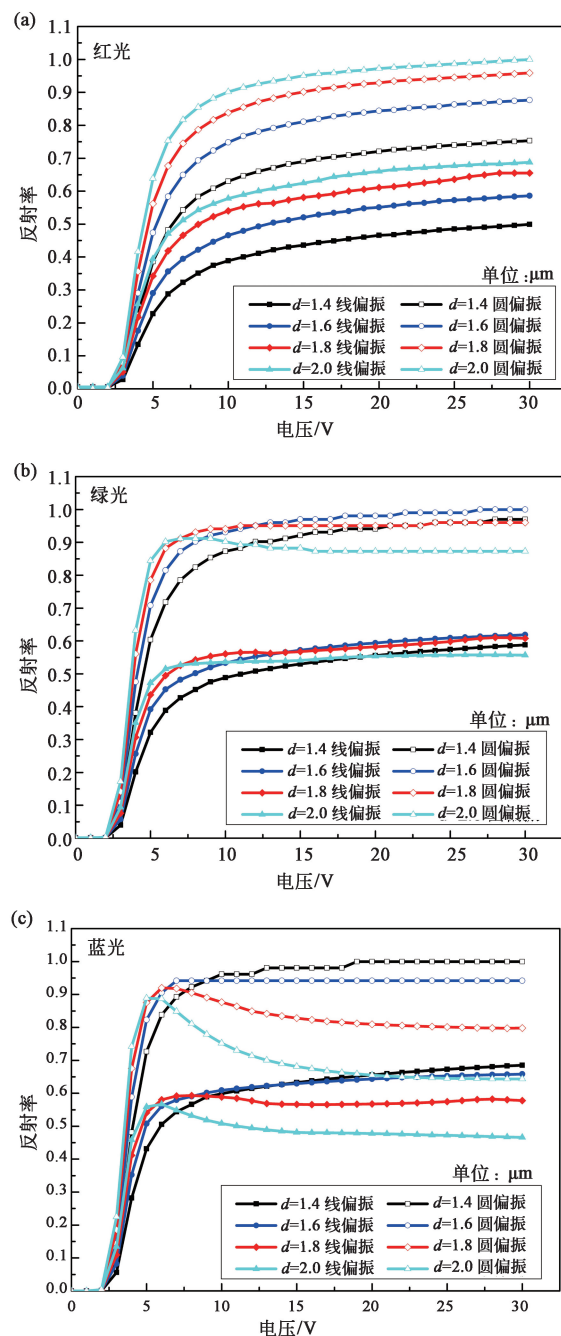


图5 不同波长的线偏振光和圆偏振光入射的VA-LCoS器件的R-V曲线

Fig.5 Simulated R-V curves of VA-LCoS with different wavelength using linearly polarized light and circle polarized light as incident light, respectively.

知,在不同波长下,圆偏振光入射时的反射率远大于线偏振光入射时的反射率。这说明,使用圆偏振光入射可以提高显示器的对比度和亮度,进而可以改善VA-LCoS器件的光学性能。

4 结 论

本文对用圆偏振光和线偏振光入射的 VA-LCoS 器件进行了对比研究,研究了预倾角、液晶盒厚、入射光波长等情况对 VA-LCoS 器件反射率的影响,旨在提升其电光性能。结果表明,圆偏振光入射能彻底消除亮态像素内黑色区域;液晶分子预倾角影响线偏振光入射 VA-LCoS 器件的反射率;改变盒厚可对 VA-LCoS 器件的反射率进行微调。本文条件下,1.6 μm 盒厚的 VA-LCoS 器件在圆偏振光入射时有最大的反射率。在小的电压范围($\leq 6\text{ V}$),用圆偏

振光代替线偏振光入射,边缘场导致的开(亮)态像素内的黑色区域被显著缩小,只剩下黑线的交点。并且随着驱动电压的增大,该黑线交点会逐渐减小,当驱动电压大于 7 V,黑线交点彻底消失。与线偏振入射光相比,彻底消除了亮态像素内由边缘场引起的黑色区域,提高了光的利用率,提升了 VA-LCoS 器件的亮度,增大了显示屏的开口率,提高了显示器的对比度。可以根据实际需要,通过选取合适的参数,使 VA-LCoS 器件反射率达到最大,从而提升硅上液晶微显示器的光学特性,最后达到优化 VA-LCoS 器件电光性能的目的,为实际生产和实验提供了指导。

参 考 文 献:

- [1] BHOWMIK A K. Recent developments in virtual-reality and augmented-reality technologies [J]. *Information Display*, 2017, 33(6): 20-32.
- [2] HAAS G. Microdisplays for wearable augmented reality— OLED vs LED based systems [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 713-716.
- [3] CHEN R, HUANG Y G, LI J, *et al.* High-frame-rate liquid crystal phase modulator for augmented reality displays [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(2): 309-315.
- [4] CHEN H W, GOU F W, WU S T. Submillisecond-response nematic LC for wearable displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 377-380.
- [5] ANDERSON J E, CHEN C, BOS P J. Fast VAN LCoS microdisplay [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1366-1369.
- [6] FAN CHIANG K H, CHEN S H, WU S T. Diffraction effect on high-resolution liquid-crystal-on-silicon devices [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(5R): 3068-3072.
- [7] FAN-CHIANG K H, WU S T, CHEN S H. Fringing-field effects on high-resolution liquid crystal microdisplays [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 304-313.
- [8] PENG J, WANG S Y, WANG C J, *et al.* Improvement on fringe field in VA mode LCOS panels [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1294-1297.
- [9] ZHANG Y L, WANG B, CHUNG D B, *et al.* Reflective polarization independent LC phase modulator with polymer wall [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1178-1181.
- [10] CUYPERS D, DE SMET H, VAN CALSTER A. VAN LCOS microdisplays: a decade of technological evolution [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(3): 127-134.
- [11] PENG F L, GOU F W, CHEN H W, *et al.* A submillisecond-response liquid crystal for color sequential projection displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(4): 241-245.
- [12] ZHU X Y, WU S T. Normally black reflective twisted-nematic cell for microdisplay application [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(12): 7660-7664.
- [13] XING Y F, GUO Z B, LI Q. Reflective blue phase liquid crystal displays with double-side concave-curved electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(4): 507-512.
- [14] CHEN Y, PENG F L, WU S T, *et al.* A vertically-aligned LCOS with submillisecond response time [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 898-901.
- [15] CHEN C H. Liquid crystal on silicon (LCoS) [M]//KRIS M. *Handbook of Digital Imaging*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2015: 1-20.

- [16] SHIN H K, KIM K H, YOON T H, *et al.* Vertical alignment nematic liquid crystal cell controlled by double-side in-plane switching with positive dielectric anisotropy liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(8): 084515.
- [17] FAN CHIANG K H, WU S T, CHEN S H. Fringing field effect of the liquid-crystal-on-silicon devices [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(7R): 4577-4585.
- [18] CHIANG K H F, ZHU X Y, WU S T, *et al.* Eliminating fringing field effects of vertically aligned liquid-crystal-on-silicon by using circularly polarized light [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1290-1293.
- [19] IWAMOTO Y, IIMURA Y. Transmittance enhancement for randomly aligned liquid crystal displays with circular polarizers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(12A): L1383-L1385.
- [20] 李丹,张宝龙,郭海成.基于三维光学模型的彩色边缘场效应优化[J].中国激光,2019,46(7):0703002.
LI D, ZHANG B L, KWOK H. Optimization of color fringing field effect based on three-dimensional optical model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0703002. (in Chinese)
- [21] 李文娟,郭玉强,马红梅,等.硅上液晶显示器件结构的优化[J].液晶与显示,2019,34(10):945-951.
LI W J, GUO Y Q, MA H M, *et al.* Optimized device structure of liquid crystal on silicon [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(10): 945-951. (in Chinese)
- [22] 刘丹枫,丁明明,张丽丽,等.热场效应下聚酰亚胺纤维力学性质有限元分析[J].应用化学,2020,37(2):190-197.
LIU D F, DING M M, ZHANG L L, *et al.* Finite element analysis of mechanical properties of polyimide fiber under thermal field [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(2): 190-197. (in Chinese)
- [23] 文璞山,何瑞,赵光练,等.可溶性聚酰亚胺液晶取向膜的制备与性能[J].应用化学,2020,37(12):1403-1410.
WEN P S, HE R, ZHAO G L, *et al.* Preparation and properties of soluble polyimides as the liquid crystal alignment layer [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(12): 1403-1410. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] COATES D, REANEY S, SABIR J. Vertically aligned dyed cholesteric LCoS microdisplay [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, 33(1): 464-467.

作者简介:



李文娟(1985—),女,河北邯郸人,博士,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,博士,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