

文章编号:1007-2780(2022)07-0816-09

共面转换液晶显示器中降低离轴漏光的光学补偿方法

隆竹辉, 张美珊, 马红梅, 孙玉宝*
(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要:本文综述了在共面转换液晶显示器中使用光学补偿膜降低离轴漏光的方法,应用模拟软件研究了可见光的暗态漏光。首先总结了使用双轴膜补偿方法,发现两个双轴膜的补偿效果优于一个双轴膜;研究和比较了6种单轴膜补偿方法,获得了离轴漏光接近于零的方法;最后研究了8种补偿方法暗态漏光的角依赖性和波长依赖性。通过光学补偿膜提高液晶显示器中的宽视角特性具有重要的意义。

关键词:液晶显示器;漏光;光学补偿膜;可见光

中图分类号:TP141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0098

Optical compensation methods for eliminating the off-axis light leakage in in-plane switching liquid crystal display

LONG Zhu-hui, ZHANG Mei-shan, MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: This paper reviews optical compensation schemes for the elimination of off-axis light leakage in an in-plane-switching LCD. The dark-state light leakage of visible light is studied by using simulation software. Firstly, the method of optical compensation using biaxial membrane is summarized. The performance of the compensation methods that use two biaxial films is much better than that of the compensation methods using one biaxial film. Then, six methods of optical compensation using uniaxial films were investigated, and the methods of off-axis light leakage close to zero were obtained. Finally, we calculated the angle and wavelength dependence of the eight compensation methods. Optical compensation to improve the wide-viewing-angle characteristics is essential in a liquid crystal display (LCD).

Key words: liquid crystal display; light leakage; optical compensation; visible light

1 引言

目前,液晶显示器(LCD)和有机发光二极管

显示器(OLED)是最为广泛的显示设备^[1-4]。近年来,OLED的市场迅速增长,面对新型显示技术的挑战,液晶显示器需不断提高其显示技术。

收稿日期:2022-03-26;修订日期:2022-04-05.

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

液晶显示器的显示技术包括亮度、响应时间、驱动电压、色彩表现、对比度等。在各种液晶显示模式中,共面转换液晶显示器(IPS-LCD)有着最宽的视角特性,原因是液晶分子最初均匀排列在基板上呈现暗态,在电极产生的平行于基板的平面电场内水平旋转呈现亮态^[5-7]。

IPS-LCD的特点是液晶盒被夹在两个相互垂直的线性偏振片之间。当光垂直入射时,处于暗态的LC层没有调制从起偏器入射的线偏振光的偏振态。线性偏振光完全被正交的检偏振器吸收,得到很好的暗态。LCD中漏光的主要原因是斜入射方向两个偏振片吸收轴之间有效角度的变化,特别是正交偏振片的角平分线方向,两个正交偏振片的吸收轴之间有效角度的变化最大,在此方位角上的暗态漏光最大,因此称该方位角方向的漏光为离轴漏光^[8]。为了得到高质量的斜入射角度的暗态图像,人们提出了使用光学补偿膜进行光学补偿来降低离轴漏光^[9-15]。使用双轴膜来降低暗态漏光,可以得到很好的效果,但是双轴膜制作困难,成本较高。研究者又提出了单轴膜补偿方案,单轴膜制作简单,但是单轴膜具有一定的色散,会导致暗态的轻度漏光。现有的模拟研究中一般只针对单波长进行模拟计算,如550 nm光可以得到很好的视角特性,就认为具有了很好的白光视角特性,但实际上不同波长的光在不同补偿方案中的视角表现差别很大,因此需要详细研究可见光的暗态漏光和视角特性。

本文使用TechWiz软件研究了8种补偿膜方案在可见光下的离轴漏光。双轴膜补偿可以很好地降低暗态漏光,多个单轴膜补偿也可以得到

一个漏光接近于零的暗态。

2 液晶模式和离轴漏光

模拟计算中使用的是正性液晶,其参数为:弹性常数 $k_{11}=9.6\text{ pN}$, $k_{22}=5.3\text{ pN}$, $k_{33}=11.6\text{ pN}$,介电各向异性 $\Delta\epsilon=8.2$, $\Delta n=0.0987$ 。液晶层厚度为 $4\text{ }\mu\text{m}$,偏光片参数为: $n_e=1.5+1.929\times 10^{-3}\text{ i}$, $n_o=1.5+4.535\times 10^{-5}\text{ i}$,偏光片的厚度为 $230\text{ }\mu\text{m}$ 。IPS类型液晶显示器包括传统IPS模式和边缘场开关(FFS)模式,如图1所示。FFS模式相对于传统的IPS模式来说,解决了电极上方透过率低的问题,其显示原理与传统IPS模式基本相同。本文中仅对显示器的暗态漏光进行模拟计算,亮态使用FFS电极驱动的亮度视角图。

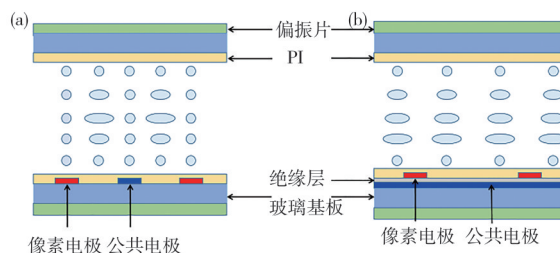


图1 IPS显示原理。(a)IPS模式;(b)FFS模式。

Fig. 1 IPS display principle. (a) IPS mode; (b) FFS mode.

图2(a)是无补偿膜时的暗态漏光特性。光线正入射时,暗态透过率远低于 0.01% 。随着观看视角增大,暗态漏光逐渐增大,当 $\theta=57^\circ$ 时,暗态透过率超过了 1% 。图2(b)是FFS-LCD的亮态视角图,可以看到亮态透过率是非常均匀的。

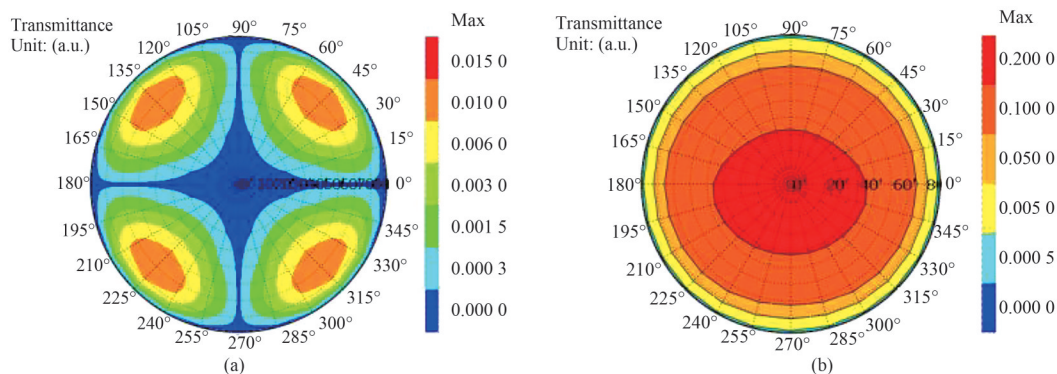


图2 等透过率视角图。(a)暗态透过率;(b)亮态透过率。

Fig. 2 Iso-transmittance contours. (a) Dark state; (b) Bright state.

图 3 所示为无补偿膜时的对比度视角图,在极角 20° 的范围内等对比度达到了 1 000:1。超过极角 37° 的区域等对比度则低于 100:1。原因是在斜视角下离轴漏光强烈,所以降低离轴漏光是提高显示器视角性能的重要途径。

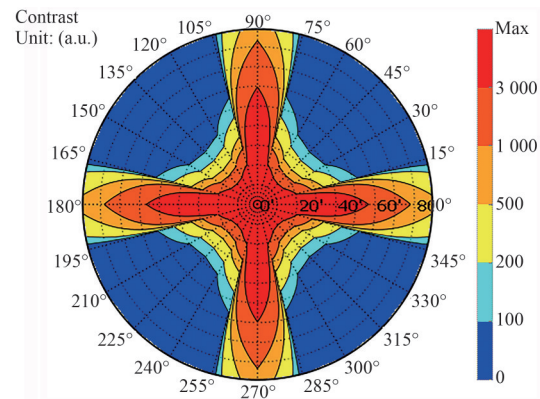


图 3 等对比度图
Fig. 3 Iso-contrast ratio

3 补偿方案

3.1 双轴膜的补偿方案

图 4(a)是 Saitoh 等人提出的一个双轴膜降低斜视角漏光的结构示意图^[16]。双轴膜的光轴(x 方向)平行于检偏器的吸收轴,它的延迟值和 N_z 分别是 185 nm 和 0.5。其中 $N_z = (n_x - n_z) / (n_x - n_y)$ (n_x, n_y, n_z 分别为 x, y, z 方向的折射率)。图 4(b)是 Takahiro Ishinabe 等人提出的使用两种不同折射率的双轴膜降低离轴漏光的结构示意图^[17]。两

个双轴膜的光轴都平行于检偏器的吸收轴,两个双轴膜的延迟值分别是 73 nm 和 26 nm。它们 N_z 分别是 0.35 和 0.55,表 1 是这些双轴膜折射率的具体参数。

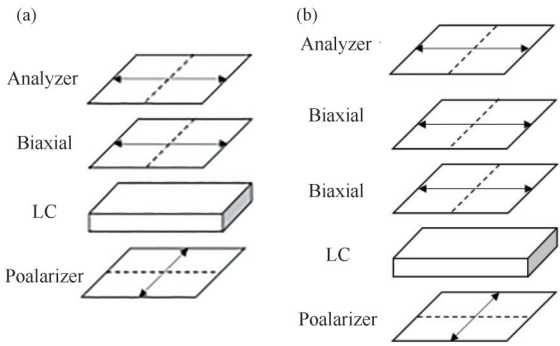


图 4 一个双轴膜(a)和两个双轴膜(b)的补偿方案结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of compensation scheme using single biaxial film (a) and two biaxial films (b)

表 1 双轴膜的折射率参数

Tab. 1 Biaxial retardation film parameters

	n_x	n_y	n_z
Biaxial-0.5	1.511	1.509 5	1.510 25
Biaxial-0.35	1.502 8	1.5	1.501 8
Biaxial-0.55	1.513 5	1.506 75	1.509 75

令 LC 层的预倾角为 0°, 计算的光波长范围为 450~650 nm。使用 TechWiz 1D 模拟软件计算暗态的等透过率图,结果如图 5 所示,等对比度视角结果如图 6 所示。

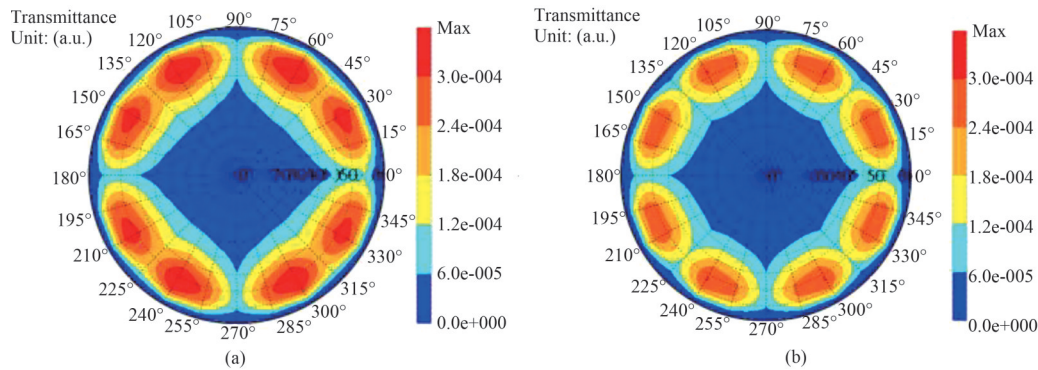


图 5 暗态透过率视角图。(a)一个双轴膜;(b)两个双轴膜。

Fig. 5 Iso-transmittance contours of the dark states for (a) single biaxial film and (b) two biaxial films

如图 5 所示,使用一个双轴膜,在极角大于 46° 时暗态透过率超过 0.01%。而使用两个双轴

膜,极角大于 50° 时暗态透过率超过 0.01%。如图 6(a)所示,使用一个双轴膜,在极角 46° 范围内

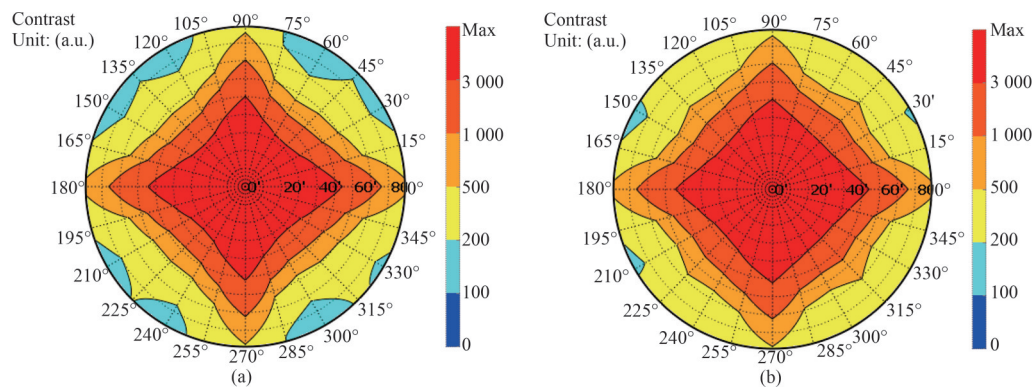


图 6 等对比度视角图。(a)一个双轴膜;(b)两个双轴膜。

Fig. 6 Iso-contrast ratio for (a) single biaxial film and (b) two biaxial films

等对比度为 1 000:1。如图 6(b)所示,使用两个双轴膜,在极角 52°范围内等对比度为 1 000:1。两个双轴膜降低离轴漏光的效果明显优于单个补偿膜的效果,这是由于两个双轴膜的波长色散可以互相补偿,从而降低离轴漏光。使用双轴膜可以有效降低离轴漏光,但是双轴膜的制作难度高,生产成本较高。为了平衡成本和补偿效果,研究者提出了使用单轴膜的补偿方案。

3.2 单轴膜的补偿方案

单轴膜的种类有 +A、-A、+C、-C 膜,这些补偿膜的不同组合有着不同的补偿方案和效果。如 +A-A^[18]、+A+C^[19]、+A+C+A^[20],用单轴膜组成的补偿方案同样可以用于降低离轴漏光。文中使用的单轴膜的参数如表 2,负性膜 $n_e=1.52$, n_o 为表中正性膜的 n_e 的数值。

表 2 单轴膜的折射率参数

Tab. 2 Uni-axial retardation film parameters

	$n_e(n_o=1.52)$		
	450 nm	550 nm	650 nm
First +A	1.52 108	1.521	1.52 097
Second +A	1.52 166	1.521	1.52 039
+C	1.52 105	1.521	1.52 096

图 7(a)是用一个 +A 膜和一个 -A 膜来降低离轴漏光的结构示意图。其中 +A 膜的光轴平行于检偏器的吸收轴, -A 膜的光轴垂直于检偏器的吸收轴。它们的延迟值都是 93 nm。图 7(b)是 +A+C 补偿方案的结构示意图。+A 膜的光轴平行于检偏器的吸收轴。它们的延迟值分别是 141 nm 和 91 nm。图 7(c)是 +A+C+A 补偿

方案的结构示意图。位于 +C 膜之下的 +A 膜的光轴平行于检偏器的吸收轴,位于 +C 膜之上的 +A 膜的光轴垂直于检偏器的吸收轴。两个 +A 膜有着相同的折射率且延迟值都是 92 nm。+C 膜的延迟值是 152 nm。

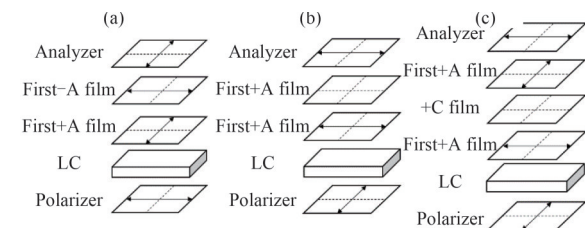


图 7 单轴补偿膜方案结构示意图。(a) +A-A; (b) +A+C; (c) +A+C+A。

Fig. 7 Schematic diagram of compensation scheme using uniaxial films. (a) +A-A; (b) +A+C; (c) +A+C+A.

3 种方案的暗态透过率计算结果如图 8 所示。图 8(a)中, +A-A 补偿方案在极角大于 38°时暗态透过率超过 0.01%。图 8(b)中, +A+C 补偿方案在极角大于 37°时暗态透过率超过 0.01%。图 8(c)显示了 +A+C+A 补偿方案在极角大于 37°时暗态透过率超过 0.01%。3 种方案的等对比度计算结果如图 9 所示。图 9(a)是 +A-A 补偿方案的等对比度视角图。图中可以看出在极角 39°范围内等对比度为 1 000:1。图 9(b)是 +A+C 补偿方案的等对比度视角图,图中可以得到等对比度在极角为 36°范围内为 1 000:1。图 9(c)是 +A+C+A 补偿方案的等对比度视角图,在极角为 39°范围的等对比度为 1 000:1。这 3 种使用单轴膜的补偿方案虽然

能够在一定程度上减弱斜视角下的离轴漏光,但是因为薄膜本身具有一定的波长色散,且在方位角 φ 为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 时暗态漏光值依旧不小。

要解决由所使用的单轴膜本身带来的波长色散而导致的暗态漏光,可以增加光轴与其正交方向的单轴膜去降低波长色散,达到在全波长降低暗态漏光的目的。比如 $+A+A+C^{[21]}$ 、 $+A+A-A^{[22]}$ 、 $+A+A+C+A+A^{[23]}$ 这 3 种补偿模式,通过相互垂直的单轴膜进行相位补偿去降

低单轴膜的波长色散带来的暗态漏光,在全波长范围内得到更好的暗态透过率。

图 10(a) 是 $+A+A+C$ 补偿方案的结构示意图。从图中可以看出 First+A 膜和 Second+A 膜的光轴分别平行和垂直检偏器的吸收轴。First+A 膜、Second+A 膜和 +C 膜的延迟值分别为 185 nm 、 38 nm 和 125 nm 。可以通过设置补偿膜的参数有效降低波长色散,两个正交的 +A 膜中,First+A 膜波长色散低,延迟值高,Second+A 膜波长色散高,延迟值低。

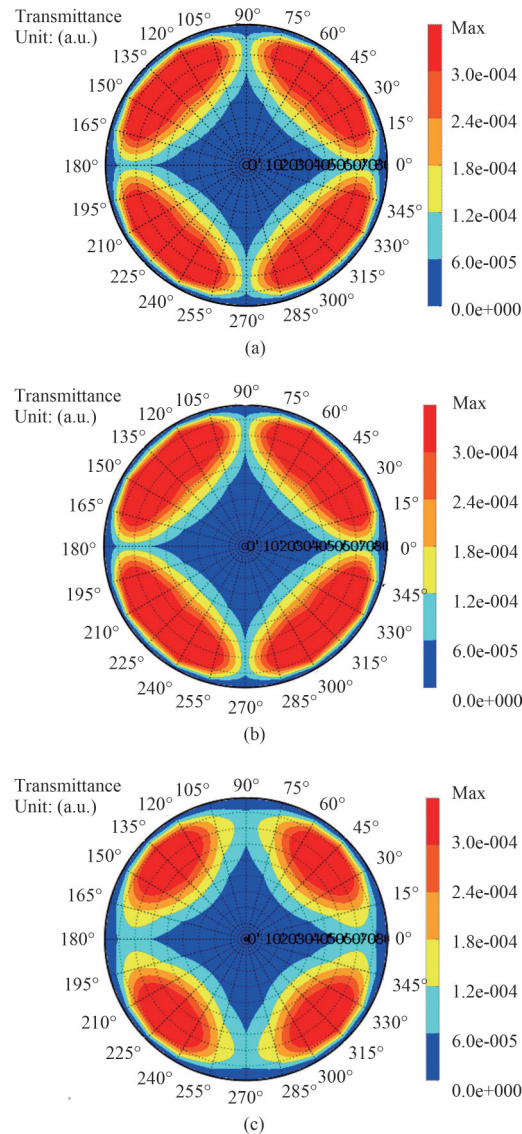


图 8 暗态透过率视角图。(a) $+A-A$ ；(b) $+A+C$ ；(c) $+A+C+A$ 。
Fig. 8 Iso-transmittance contours of the dark states of (a) $+A-A$, (b) $+A+C$ and (c) $+A+C+A$ configuration.

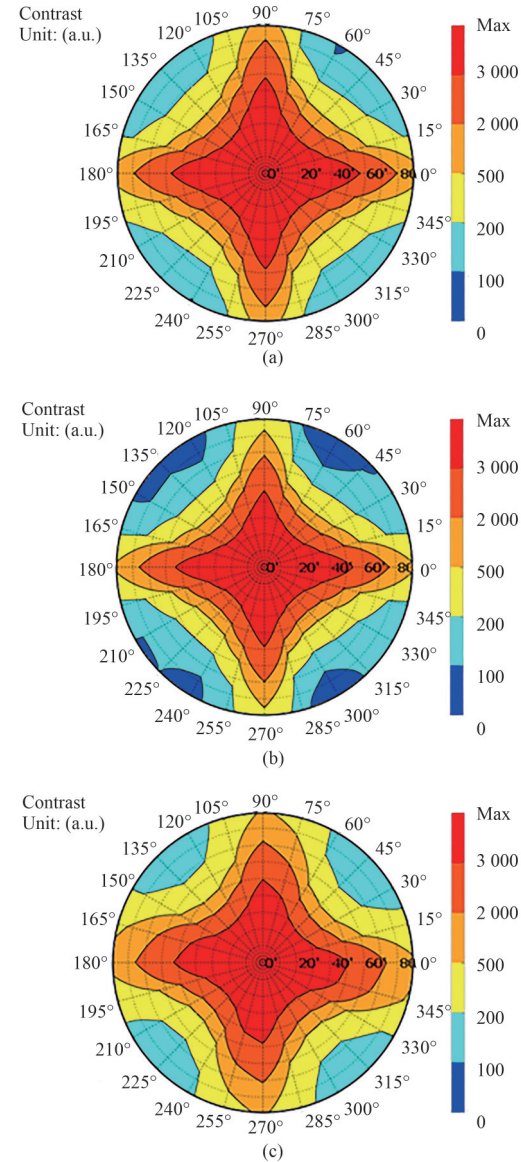


图 9 等对比度图。(a) $+A-A$ ；(b) $+A+C$ ；(c) $+A+C+A$ 。
Fig. 9 Iso-contrast ratio of (a) $+A-A$, (b) $+A+C$ and (c) $+A+C+A$.

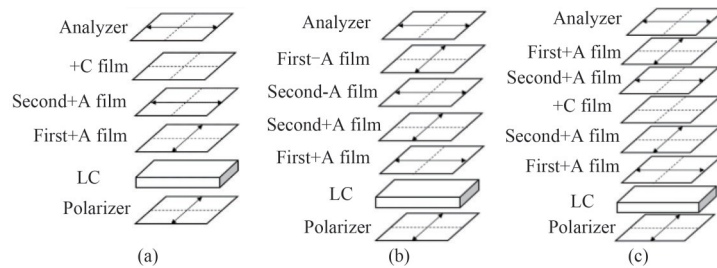


图10 单轴补偿膜方案示意图。(a) +A+A+C;(b) +A+A-A-A;(c) +A+A+C+A+A。

Fig. 10 Schematic diagram of compensation scheme using uniaxial films. (a) +A+A+C; (b) +A+A-A-A; (c) +A+A+C+A+A.

图10(b)是+A+A-A-A补偿方案的结构示意图。从图中可以看出First +A膜和Second -A膜的光轴与检偏器的吸收轴平行, Second +A膜和First -A膜的光轴与检偏器的吸收轴垂直。First +A(Second -A)膜和Second +A(First -A)膜的延迟值分别是111 nm和16 nm。两组相互垂直且对称的单轴膜可以有效降低波长色散的影响。但是这种方案使用了负性A光学补偿膜,成本稍高。

图10(c)是+A+A+C+A+A补偿方案的结构示意图。使用两组+A膜和一个+C膜用来降低离轴光泄漏,成本较低。两个First +A膜的延迟值为121.5 nm,两个Second +A膜的延迟值为24.5 nm,+C膜的延迟值为207 nm。两个First +A膜的光轴分别平行和垂直检偏器的吸收轴,两个Second +A膜的光轴分别垂直和平行检偏器的吸收轴。此方案中,同种单轴膜的延迟值相等且光轴互相垂直,可以有效降低不同极角和方位角上的暗态漏光,这是因为+C膜下方两个+A膜波长色散带来的相位差异完全被上方的两个+A膜完全抵消。

图11是3种补偿方案的暗态透过率视角图。图11(a)是+A+A+C补偿方案的暗态透过率,在极角大于53°时,暗态透过率超过0.01%。图11(b)是+A+A-A-A补偿方案的暗态透过率,在极角大于51°时暗态透过率超过0.01%。图11(c)是+A+A+C+A+A补偿方案的暗态透过率,在全视角范围内暗态透过率皆小于0.01%,非常好地降低了离轴漏光。图12(a)是+A+A+C补偿方案的等对比度视角图,可以得到+A+A+C补偿方案的等对比度在极角为56°时为1 000:1。如图12(b)所示,+A+A-A-A补偿方案的等

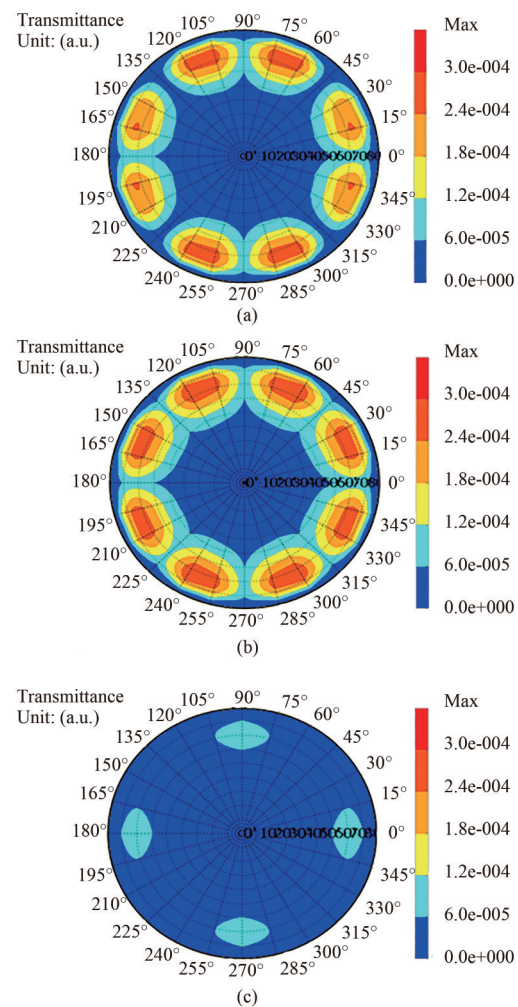


图11 暗态透过率视角图。(a) +A+A+C;(b) +A+A-A-A,(c) +A+A+C+A+A。

Fig. 11 Iso-transmittance contours of the dark states. (a) +A+A+C; (b) +A+A-A-A; (c) +A+A+C+A+A.

对比度在极角为54°时为1 000:1。如图12(c)所示,+A+A+C+A+A补偿方案的等对比度在极角69°时为1 000:1。

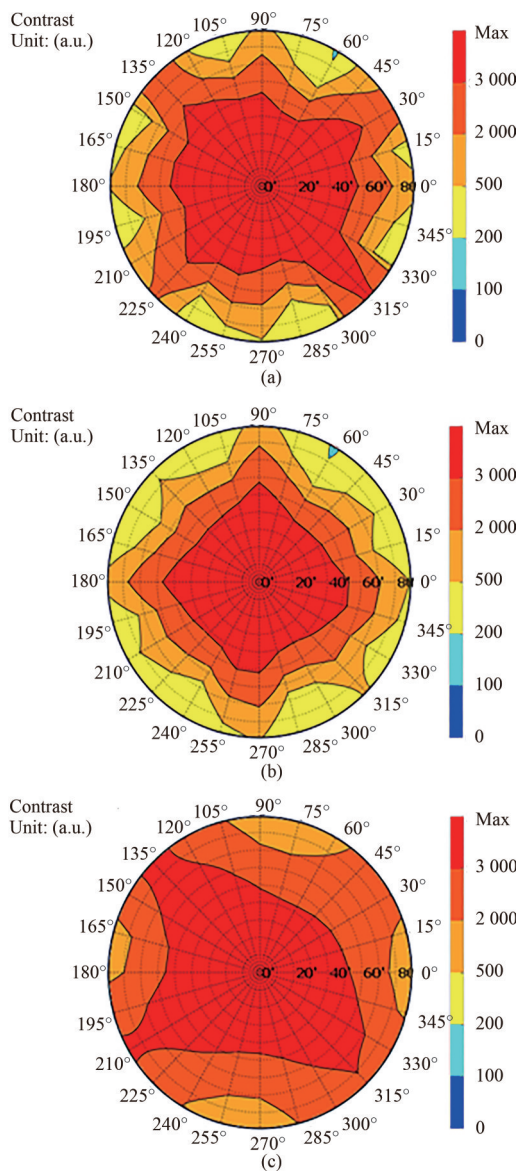


图 12 等对比度图。(a) +A+A+C; (b) +A+A-A-A; (c) +A+A+C+A+A。

Fig. 12 Iso-contrast ratio of (a) +A+A+C, (b) +A+A-A-A and (c) +A+A+C+A+A.

4 结果与讨论

图 13、14 中的漏光值为波长 450~650 nm 范围内每个波长的漏光值的平均值(取波长间隔 1 nm)。当方位角 $\varphi=45^\circ$ 时,不同极角下的漏光值如图 13 所示。+A-A、+A+C、和 A+C+A 补偿方案在不同极角下都有着较大的漏光值,而 One-Biaxial、Two-Biaxial、+A+A+C、+A+A-A-A 和 +A+A+C+A+A 补偿方案的漏光值较低。

图 14 所示为在 $\theta=70^\circ$ 时,不同方位角的漏光

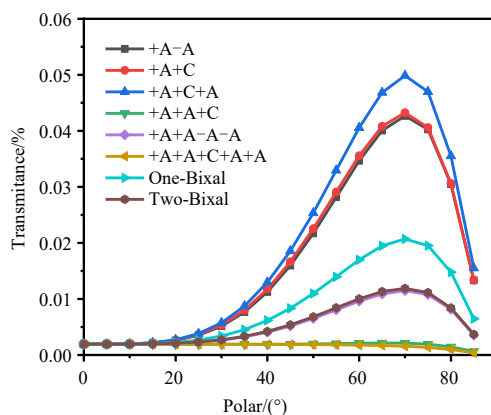


图 13 暗态漏光的极角(θ)依赖性($\varphi=45^\circ$)

Fig. 13 Polar angle dependent light leakage at $\varphi=45^\circ$

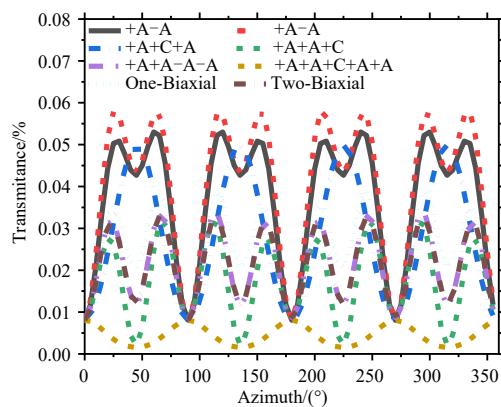


图 14 暗态漏光的方位角角(φ)依赖性($\theta=70^\circ$)

Fig. 14 Azimuthal angle dependent light leakage at $\theta=70^\circ$

值。图中可以看出+A-A补偿方案在 φ 为 60° 、 120° 、 240° 、 300° 时漏光值最大,为0.053 0%。A+C补偿方案在 φ 为 25° 、 155° 、 205° 、 335° 时漏光值最大,为0.057 9%。+A+C+A补偿方案在 φ 为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 时漏光值最大,为0.049 8%。+A+A+C补偿方案在 φ 为 70° 、 110° 、 250° 、 290° 时漏光值最大,为0.031 5%。+A+A-A-A补偿方案在 φ 为 65° 、 115° 、 245° 、 295° 时漏光值最大,为0.033 9%。One-Biaxial和Two-Biaxial补偿方案在 φ 为 65° 、 115° 、 245° 、 295° 时漏光值最大,分别为0.038 7%和0.032 9%。而+A+A+C+A+A补偿方案在 φ 为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 时漏光值最小,低于 $\varphi=0^\circ$ 时的漏光值。此方案在 $\varphi=45^\circ$ 时能够很好地降低离轴漏光。使用一个对称结构且两组互相垂直的单轴膜补偿方案在制造中也更加方便,有利于成本的降低。

图15所示为在 $\theta=70^\circ$, $\varphi=45^\circ$ 时,各种补偿方案在不同波长下的暗态透过率。在550 nm处,暗态漏光值都为最小值,同时向两边呈增长趋势。 $+A-A$ 、 $+A+C$ 、 $+A+C+A$ 三种方案由于单轴膜本身具有一定的波长色散,只在

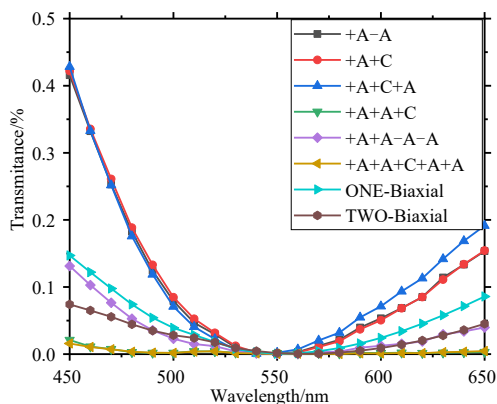


图15 暗态漏光的波长依赖性($\varphi=45^\circ$, $\theta=70^\circ$)

Fig. 15 Wavelength dependent light leakage at $\varphi=45^\circ$ and $\theta=70^\circ$

550 nm时效果最好,在蓝光和红光处有较大的漏光。 $+A+A+C$ 和 $+A+A+C+A+A$ 两种补偿方案受波长影响最小,证明带有色散的单轴膜也可以达到很好的降低离轴漏光的效果,但是, $+A+A+C$ 方案的最大漏光值相比 $+A+A+C+A+A$ 方案大很多。所以,最佳方案为 $+A+A+C+A+A$ 方案。

5 结 论

本文对各种IPS-LCD中光学补偿膜方案在可见光下的暗态漏光进行了模拟计算。双轴膜对降低斜视角下的离轴漏光有很好的效果。对称结构的单轴膜补偿方案可以降低补偿膜色散带来的暗态漏光,从而获得很好的视角特性。本文总结了IPS-LCD中光学补偿膜对视角特性进行改善的各种方案,对提高IPS-LCD的生产有一定的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17168.
- [2] HAN J M, SUK H J. Do users perceive the same image differently? Comparison of OLED and LCD in mobile HMDs and smartphones [J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(1): 31-38.
- [3] HSIANG E L, YANG Z Y, YANG Q, *et al.* Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(6): 446-465.
- [4] TAN G J, HUANG Y G, Li M C, *et al.* High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [5] OH-E M, KONDO K. Electro-optical characteristics and switching behavior of the in-plane switching mode [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(26): 3895-3897.
- [6] OH-E M, YONEYA M, KONDO K. Switching of negative and positive dielectro-anisotropic liquid crystals by in-plane electric fields [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(2): 528-535.
- [7] LEE S H, LEE S L, KIM H Y. Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(20): 2881-2883.
- [8] ZHU X Y, GE Z B, WU S T. Analytical solutions for uniaxial-film-compensated wide-view liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(1): 2-20.
- [9] JI S H, LEE G D. Advanced wide viewing angle technology in liquid crystal display modes [J]. *Liquid Crystals*, 2009, 36(6/7): 657-668.
- [10] ISHINABE T, MIYASHITA T, UCHIDA T, *et al.* A wide viewing angle polarizer and a quarter-wave plate with a wide wavelength range for extremely high quality LCDs [C]//*Proceedings of the SID Conference Record of the International Display Research Conference*. Nagoya: SID, 2001: 485-488.
- [11] ISHINABE T, MIYASHITA T, UCHIDA T. Improvement of viewing angle properties of IPS-mode LCD by using super-wide-viewing-angle polarizer [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, 410(1): 381-390.

- [12] YANG S, LEE J H. Optical simulation of viewing angle property of biaxial nematic bent-core liquid crystal [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(4): 510-514.
- [13] DI PASQUALE F, DENG H F, FERNANDEZ F A, *et al.* Theoretical and experimental study of nematic liquid crystal display cells using the in-plane-switching mode [J]. *IEEE Transactions Electron Devices*, 1999, 46(4): 661-668.
- [14] LIM Y, LEE J, KIM K, *et al.* Study of off-axis contrast ratio improvement for HDR display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 921-923.
- [15] LIM Y J, SONG J H, KIM B C, *et al.* Novel achromatic polariser for the homogeneously aligned nematic liquid crystal displays [J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(5): 665-671.
- [16] SAITOH Y, KIMURA S, KUSAFUKA K, *et al.* Optimum film compensation of viewing angle of contrast in in-plane-switching-mode liquid crystal display [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(9R): 4822-4828.
- [17] ISHINABE T, MIYASHITA T, UCHIDA T. Wide-viewing-angle polarizer with a large wavelength range [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(7R): 4553-4558.
- [18] ZHU X Y, WU S T. Super wide view in-plane switching LCD with positive and negative uniaxial A-films compensation [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1164-1167.
- [19] ANDERSON J E, BOS P J. Methods and concerns of compensating in-plane switching liquid crystal displays [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(11R): 6388-6392.
- [20] HOMG Q, WU T X, ZHU X Y, *et al.* Designs of wide-view and broadband circular polarizers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 8318-8331.
- [21] OH S W, PARK B W, LEE J H, *et al.* Achromatic optical compensation using dispersion of uniaxial films for elimination of off-axis light leakage in a liquid crystal cell [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(32): 7785-7790.
- [22] OH S W, YOON T H. Achromatic wide-view circular polarizers for a high-transmittance vertically-aligned liquid crystal cell [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4683-4686.
- [23] OH S W, YOON T H. Elimination of light leakage over the entire viewing cone in a homogeneously-aligned liquid crystal cell [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5808-5817.

作者简介:



隆竹辉(1998—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2020年于哈尔滨学院获得学士学位,主要从事液晶器件方面的研究。
E-mail: 18593472430@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,主要从事液晶器件物理和液晶的新型应用等方面的研究。E-mail: sun_yubao@163.com